

**EVALUACIÓN GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y GEOTECNICA PARA  
DETERMINACION DE AMENAZAS Y GENERACION DE ALERTAS TEMPRANA  
EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARIA EN LA JURISDICCION DE LA  
CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).**

**JOHN STEVEN MORENO TORRES**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA  
U.P.T.C.  
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA  
SOGAMOSO  
2016**

**EVALUACIÓN GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y GEOTECNICA PARA  
DETERMINACION DE AMENAZAS Y GENERACION DE ALERTAS TEMPRANA  
EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARIA EN LA JURISDICCION DE LA  
CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).**

**JOHN STEVEN MORENO TORRES**

**Proyecto de grado para obtener el título de ingeniero geólogo**

**Modalidad de proyecto de investigación**

**Director  
RORY RENE FORERO  
Ingeniero Geólogo**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA  
U.P.T.C.  
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA  
SOGAMOSO  
2016**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

**Director de Escuela**

---

**Director**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

## Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por ser mi guía, quien me acompaña y bendice día a día, ya que gracias a él hoy me es posible culminar esta etapa, donde estuve rodeado por personas extraordinarias de quienes siempre tendré grandes recuerdos

A mi Padre y Madre ,Efraín Moreno y Cristina Torres, por ser el motor de mi vida, por darme su amor, su apoyo incondicional, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por sus consejos y sus sacrificios para hacer de mí una mejor persona.

Las palabras no me alcanzan para darte las gracias por sus infinito cariño, por tu paciencia, por cuidar de mí, por enseñarme con ternura las cosas buenas de la vida, por aceptar mis errores y ayudármelos a corregir de la manera más amorosa, por guiarme con paciencia para hacer de mí una mejor persona y por ser mi modelo a seguir y mi principal motivación para estar aquí, como me dijiste un día, este logro es principalmente de los tres.

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por darnos la oportunidad de conocernos y poder realizar este proyecto.

A mis padres, por ser guías y apoyo incondicional en nuestra formación personal y por ende en la realización de nuestro proyecto de grado; son nuestra mayor inspiración para lograr nuestros objetivos.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por encaminarnos en nuestra futura profesión, para así desempeñar un buen papel como profesionales.

A los Ingenieros Rafael Pérez y Ernesto Gutiérrez por su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto, por orientarnos mediante sus conocimientos, por su constante motivación en la investigación y su capacidad de enseñar la disciplina del aprendizaje constante.

A los ingenieros Omar Pérez, Liliana Vargas, Fabián Fonseca por su colaboración y consejos en cuanto al desarrollo de adquisición de datos e información.

A los ingenieros Héctor Fonseca y Andrea Ceballos, por la oportunidad de participar en el convenio interadministrativo Específico 1610 de 2015 UPTC-Gobernación de Boyacá – CAR: Investigación aplicada a la modelación del territorio a partir del análisis geomorfológico del departamento de Boyacá. Código SGI 1637.

A nuestros profesores por darnos las herramientas y aporte de conocimientos para nuestro crecimiento intelectual y profesional.

A nuestros amigos y compañeros de universidad por hacer parte de nuestra formación, por su amistad incondicional, consejos y experiencias vividas durante nuestra etapa universitaria

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b> .....	21
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	22
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	22
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	22
<b>1.2.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	22
<b>1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b> .....	22
<b>1.3 LOCALIZACIÓN</b> .....	23
<b>1.3.1 Vías de acceso</b> .....	24
<b>1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	25
<b>1.4.1 Alcances</b> .....	25
<b>1.4.2 Limitaciones</b> .....	25
<b>1.5 JUSTIFICACIÓN</b> .....	25
<b>1.6. METODOLOGIA</b> .....	26
<b>1.7 ESTADO DEL ARTE</b> .....	27
<b>1.7.1 Estudios realizados en el Municipio de Santa Maria</b> .....	28
<b>1.7.2 Información</b> .....	28
<b>1.7.3 Metodología Geomorfológica</b> .....	29
<b>1.8 Metodología para la zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa</b> .....	29
<b>1.9 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	29
<b>1.10 TRABAJO DE CAMPO</b> .....	30
<b>2. GEOLOGIA</b> .....	31
<b>2.1 ESTRATIGRAFIA</b> .....	31
<b>2.2 UNIDAD DE PALEOZOICO</b> .....	31
<b>2.2.1 Grupo Farallones (Dcf) Devónico - Carbonífero</b> .....	31
<b>2.3 UNIDADES DEL CRETÁCICO</b> .....	32
<b>2.3.1 Formación Bata (Jb)</b> .....	32
<b>2.3.2 Formación Calizas del Guavio (Kicg)</b> .....	33

2.3.3 Formación Lutitas de Macanal (Kilm).....	34
2.3.4 Areniscas de las Juntas (Kiaj).....	35
2.3.5 CUATERNARIO ALUVIAL .....	35
2.3.6 Llanura aluvial o de inundación (Qal).....	36
2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	37
2.4.1 Falla de Santa María.....	37
2.4.2 Falla de Lengupá .....	38
2.4.3 Falla Colorado .....	39
3. ANALISIS HIDROLOGICO.....	40
3.1 Característica Hidrometeorológica .....	41
3.1.1 Precipitación.....	41
3.1.1.2 Precipitación Media.....	42
3.2 Temperatura.....	44
3.3 Humedad Relativa .....	45
3.4 Evaporación.....	45
3.5 Evapotranspiración Potencial (ETP).....	47
3.6 Escorrentía (Q) .....	48
3.7 Balance Hídrico .....	52
4.1 ACUÍFERO .....	55
4.1.1 Acuíferos Confinados .....	55
4.1.2 Acuíferos Libres .....	55
4.1.3 Acuíferos Semi-confinados .....	55
4.2 ACUITARDO Y/O ACUICIERRE.....	56
4.3 ACUIFUGO .....	56
4.4 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS .....	56
4.4.1 ACUÍFEROS .....	56
4.4.1.1 Depósitos de Cuaternarios (Q):.....	56

4.4.1.2 Grupo Farallones (Dcf) :.....	56
4.4.1.3 Formación Bata (Jb) Berriasiano:.....	56
4.4.1.4 Areniscas de las Juntas (Kiaj):.....	56
4.4.1.5 Formación Calizas del Guavio (Kicg). ....	57
4.4.2 ACUITARDOS Y/O ACUICIERRE: .....	57
4.4.2.1 Formación Lutitas de Macanal (Kilm): .....	57
<b>5 GEOMORFOLOGÍA .....</b>	<b>58</b>
<b>5.1 METODOLOGÍA APLICADA .....</b>	<b>58</b>
<b>5.2 AMBIENTE MORFOGENETICOS.....</b>	<b>60</b>
5.2.1 Inclinación.....	60
5.2.2 Sombreado artificial del terreno. ....	62
<b>5.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3.1 GEOFORMAS DE ORIGEN ESTRUCTURAL .....</b>	<b>62</b>
5.3.1.1 Escarpe de línea de falla (Sife) .....	63
<b>5.4.1 GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL .....</b>	<b>64</b>
5.4.2 Ladera erosiva .....	65
5.4.3 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft) .....	65
5.4.4 Colina remanente (Dcre) .....	66
5.4.5 Escarpe de erosión menor (Deeme) .....	67
<b>5.5 GEOFORMAS DE ORIGEN FLUVIAL.....</b>	<b>68</b>
5.5.1 Cauce aluvial (Fca): .....	68
5.5.2 Plano o llanura de inundación (Fpi):.....	69
<b>6. ZONIFICACION DE LA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....</b>	<b>70</b>
<b>6.1 METODO HEURISTICO .....</b>	<b>70</b>
6.1.1 MÉTODO DE PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) .....	71
<b>6.2 MAPAS E INSUMOS TEMATICOS.....</b>	<b>73</b>
6.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM).....	73
<b>6.3 INSUMOS TEMATICOS .....</b>	<b>73</b>
6.3.1 Geología .....	73

6.3.1.1 Densidad de Fracturamiento .....	73
6.3.1.2 Fabrica y/o Estructura .....	74
6.3.1.3 Resistencia.....	76
6.3.1.4 Susceptibilidad geológica.....	77
<b>6.3.2 Geomorfología.....</b>	<b>78</b>
6.3.2.1 Morfometría.....	79
6.3.2.2 Morfogénesis.....	84
6.3.2.3 Morfodinámica.....	85
6.3.2.4 Susceptibilidad Geomorfológica.....	90
<b>6.3.3 Suelos.....</b>	<b>91</b>
6.3.3.1 Textura .....	92
6.3.3.2 Taxonomía .....	93
6.3.3.3 Profundidad.....	95
6.3.3.4 Tipo de arcilla .....	95
6.3.3.5 Susceptibilidad de suelos total .....	96
<b>6.3.4 Cobertura de la tierra .....</b>	<b>96</b>
6.3.4.1 Profundidad radicular .....	97
6.3.4.2 Drenaje profundo .....	98
6.3.4.3 Numero de estratos.....	98
6.3.4.4 Evapotranspiración .....	99
6.3.4.4 Calculo total del atributo cobertura de la tierra.....	100
<b>6.4 ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD.....</b>	<b>101</b>
6.4.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	101
<b>9. ZONIFICACION DE AMENAZAS.....</b>	<b>104</b>
9.1 METODOLOGIA UTILIZADA.....	104
9.2 EVALUACION DE DETONANTES .....	106
9.2.1 Condiciones climáticas.....	106
9.2.1.1 Precipitación media anual y temperatura media anual.....	107
9.2.1.2 Precipitación máxima diaria .....	108

9.2.2 Cobertura del detonante climático.....	109
9.2.3 Detonante sísmico .....	110
9.3 Propuesta sistemática para el valor climático.....	113
<b>10. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA .....</b>	<b>115</b>
10.1.1 Antecedentes .....	115
10.2 TRABAJO DE CAMPO.....	115
<b>10.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA DESLIZAMIENTO LA ARGENTINA .....</b>	<b>116</b>
10.3.1 Localización.....	116
10.3.2 Descripción del problema.....	116
10.3.2.1 Factores detonantes .....	116
10.3.2.2 Factores contribuyentes .....	116
10.3.3 Geología .....	117
10.3.3.1 Cuaternario residual:.....	117
10.3.3.2 Formación Lutitas de Macanal: .....	117
10.3.4 Geomorfología.....	117
10.3.4.1 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft) .....	117
10.3.4.2 Cauce aluvial (Fca): .....	118
10.3.5 Exploración indirecta .....	118
10.3.5.1 Geofísica.....	118
10.3.5.2 Tomografía.....	119
10.3.5.3. Análisis de resultados de la tomografía.....	120
10.3.6 EXPLORACIÓN DIRECTA.....	122
10.3.6.1 Sondeos .....	122
10.3.6.2 Nivel freático.....	122
10.3.7.1 TRABAJO DE LABORATORIO .....	123
10.3.7.1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO .....	123
10.3.8 Análisis de estabilidad del talud deslizamiento La Argentina .....	123

<b>10.3.9 La modelación del deslizamiento La Argentina mediante SLIDE</b>	<b>124</b>
<b>10.3.9.1 Análisis de modelamiento software Slide</b>	<b>127</b>
<b>10.3.10 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA DESLIZAMIENTO CAÑO CANGREJO</b>	<b>128</b>
<b>10.3.10 Localización</b>	<b>128</b>
<b>10.3.10.1 Descripción del problema:</b>	<b>128</b>
<b>10.3.10.2 Factores detonantes</b>	<b>128</b>
<b>10.3.10.3 Factores contribuyentes</b>	<b>129</b>
<b>10.3.11 GEOLOGIA</b>	<b>129</b>
10.3.11.1 Depósito coluvial	129
10.3.11.2 Depósito residual:	129
10.3.11.3 Formación Bata (Jb) Berriasiano:	129
<b>10.3.12 GOMOMORFOLOGIA</b>	<b>129</b>
10.3.12.1 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft):	129
10.3.12.2 Cauce aluvial (Fca):	130
<b>10.3.13 Monitoreo del deslizamiento de Caño Cangrejo:</b>	<b>130</b>
<b>10.3.13.1 Técnicas aplicada por (Corpochivor) para el monitoreo del deslizamiento Caño Cangrejo:</b>	<b>131</b>
10.3.13.1.1 Monitoreo Geotécnico:	131
10.3.13.1.2 Análisis de estabilidad del talud deslizamiento de Caño Cangrejo:	133
10.3.13.1.3 Análisis de modelamiento	135
<b>10.3.14 PROPIEDADES GEOMECANICAS DE MACIZO ROCOSO</b>	<b>135</b>
<b>10.3.14.1 Localización</b>	<b>136</b>
<b>10.3.14.2 Descripción del problema</b>	<b>137</b>
<b>10.3.14.3 Metodología para la clasificación de Macizo Rocoso</b>	<b>137</b>
<b>10.3.14.3.1 ANALISI DE CALASIFIACACION DE MASIZO ROCCOSO POR HOEKY BROWN GSI</b>	<b>139</b>
10.3.14.3.2 Estimación de GSI:	139

10.3.14.4 CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOS MOHR-COULOMB.....	140
10.3.14.5 CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOS BIENIAWSKI.....	142
10.3.14.5 .1 Análisis de resultados .....	145
10.3.15 COMPORTAMIENTO GEOMECHANICAS DEL MACIZO .....	146
10.3.15.1 Orientación de discontinuidades .....	147
10.3.15.2 Datos estructurales del talud .....	149
10.3.15.3 FALLA PLANAR.....	150
10.3.15.4 FALLA POR VOLTEO .....	151
10.3.15.5 FALLA EN CUÑA .....	151
10.3.15.6 Análisis de Resultados .....	152
11: PLAN DE MONITOREO .....	153
11.1 EQUIPOS INSTALADOS .....	153
11.1.1 Equipos de medición de desplazamiento: .....	153
11.1.2 Equipos de medición de niveles freáticos: .....	153
11.2 PROPUESTA DE PLAN DE MONITOREO.....	156
11.2.1 Tipos de instrumento .....	156
11.2.2 Control Piezométricos .....	156
11.2.3 Inclínometros.....	157
12) GENERACION DE ALERTAS TEMPRANA EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARIA EN LA JURISDICCION DE LA CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).....	159
12.1 Determinación niveles de alerta caño cangrejo bajo, municipio de santa Maria.....	161
12.3 Calibración del Método: .....	162
CONCLUSIONES .....	163
RECOMENDACIONES.....	165
BIBLIOGRAFÍA .....	166

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de localización del área de estudio.....	23
Tabla 2: Estaciones hidrometereologicos .....	40
Tabla 3: Precipitación media por método de las isoyetas .....	42
Tabla 4: Cálculo de ETP Media del área de estudio.....	47
Tabla 5 : Valore de CN para suelos .....	49
Tabla 6: Clasificación suelos Según Clase Hidrológica. ....	50
Tabla 7: Determinación de Numero de Curva.....	51
Tabla 8: Valores de Escorrentía.....	52
Tabla 9: Balance Hídrico.....	53
Tabla 10: Rangos de inclinación de la ladera .....	61
Tabla 11: Relación entre Métodos, Niveles y Tipos de Zonificación de acuerdo con la escala y el propósito del proyecto. ....	71
Tabla 12: Rangos de Line Density y Calificación para Zonificación de Susceptibilidad.....	74
Tabla 13: Textura/Fabrica de las rocas.....	74
Tabla 14: Calificación propuesta para Fabrica/Estructura .....	75
Tabla 15: Clasificación Fabrica/Estructura de las unidades geológicas de la zona de estudio. ....	75
Tabla 16: Calificación de resistencia geológica de depósitos. ....	76
Tabla 17: Calificación de resistencia de las unidades del área de estudio. ....	77
Tabla 18: Rangos de clasificación y calificación de susceptibilidad del parámetro rugosidad. ....	81
Tabla 19: Rangos de clasificación del atributo Acuenca.....	83
Tabla 20: Clasificación y calificación de las unidades morfogénicos .....	85
Tabla 21: Calificación de las unidades geomorfológicas del área de estudio. ....	85
Tabla 22: Calificación de la inclinación de ladera. ....	87
Tabla 23: Calificación de los depósitos.....	89
Tabla 24: Clasificación textural de suelos.....	93
Tabla 25: Calificación de la taxonomía de suelos según orden. ....	93
Tabla 26: Calificación del drenaje natural del suelo.....	94
Tabla 27: Calificación de profundidad total. ....	95
Tabla 28: Calificación de tipo de arcillas.....	96
Tabla 29: Categorización y calificación de la profundidad efectiva. ....	98
Tabla 30: Categorización y clasificación del atributo drenaje profundo. ....	98
Tabla 31: Categorización y calificación del atributo número de estratos. ....	99
Tabla 32: Coeficientes de cultivos adaptados de FAO .....	99

Tabla 33: Categorización y calificación del atributo Evapotranspiración.....	100
Tabla 34: Calificación de susceptibilidad de cobertura de la tierra. ....	101
Tabla 35: Valor de periodos de retorno de 25 años. ....	108
Tabla 36: Calificación de la lluvia máxima diaria según su contribución a los movimientos en masa. ....	108
Tabla 37: Calificación de detonante por factores climáticos a partir de la zonificación climática nacional de lluvias máximas diarias, de acuerdo con su contribución a los movimientos en masa. ....	109
Tabla 38: Calificación del detonante sismo según su contribución a movimientos en masa. ....	111
Tabla 39: Resistividad de diferentes materiales.....	119
Tabla 40: Resistividades de los materiales presentes en el área de estudio. ....	120
Tabla 41 : Coordenadas de los sondeos realizados .....	122
Tabla 42: Niveles piezómetros tenidos para el análisis de talud.....	124
Tabla 43: Materias con sus propiedades .....	125
Tabla 44: Resultados Fs, nivel freático de 2 metros .....	126
Tabla 45: Resultados Fs, nivel freático de 4.68 metros .....	127
Tabla 46: Resultados Fs, nivel freático de 7.25 metros. ....	127
Tabla 47: Valore de amenaza .....	128
Tabla 48 Niveles freáticos (m) .....	131
Tabla 49: Materiales con sus características .....	133
Tabla 50: Niveles Freáticos tenidos para el análisis de talud .....	133
Tabla 51: Resultados Fs, nivel freático de 0.8281 metros. ....	134
Tabla 52: Resultados Fs, nivel freático de 2.41 m .....	134
Tabla 53: Resultados Fs, nivel freático de 4.m .....	135
Tabla 54: Estimación del Índice Geológico de resistencias (GSI).....	139
Tabla 55: Calificación de macizo rocos mediante GSI.....	140
Tabla 56: Resultados Mohr-Coulomb .....	141
Tabla 57: Parámetro: resistencia de la roca sana.....	142
Tabla 58: Cálculo del R.Q.D. ....	143
Tabla 59: La separación o el espaciamiento de las discontinuidades están clasificados según la tabla que a continuación se observa:.....	143
Tabla 60: Aberturas de las discontinuidades. ....	144
Tabla 61: Rugosidad de las discontinuidades.....	144
Tabla 62: Relleno de discontinuidades .....	144
Tabla 63: Alteración de discontinuidades .....	144
Tabla 64: Tabla para obtener el parámetro de la presencia del agua.....	145
Tabla 65: Valoración de Talud .....	145
Tabla 66: Sumatoria de puntuación para clasificación RMR.....	146

Tabla 67: Calidad del rocoso con relación macizo al Índice RMR .....	146
Tabla 68: Datos de diaclasas del afloramiento .....	147
Tabla 69: Dirección del talud .....	149
Tabla 70: Los parámetro del material del macizo rocoso.....	149
Tabla 71: Familias de diaclasa.....	149
Tabla 72: Mojones en el área de estudio .....	153
Tabla 73: Mojones y vector de desplazamiento .....	154

## LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
<b>Gráficos</b>	
Grafico1: Valores de precipitación media multianual. ....	42
Grafico 2: Escorrentía Superficial. ....	52
Grafico 3: Balance Hídrico .....	54
Grafico 4: Niveles Freáticos .....	132
Grafico 5: Precipitaciones Santa Maria.....	132
Grafico 6: Nivel freático.....	155
Grafico 7: Precipitaciones Santa Maria.....	155

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localización del Municipio de Santa Maria. ....	24
Figura 2: Ruta Bogotá – Santa Maria.....	24
Figura 3: Mapa de sombras. ....	39
Figura 4: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas. ....	41
Figura 5: Mapa de Isoyetas del área de estudio .....	44
Figura 6: Mapa de Isotermas del área de estudio.....	45
Figura 7: Mapa de Humedad Relativa del área de estudio. ....	46
Figura 8: Mapa de Evaporación del área de estudio.....	46
Figura 9: Mapa de Evapotranspiración Potencial (ETP) Promedio Multianual.....	48
Figura 10 : Mapa balance hídrico.....	54
Figura 11: Mapa Hidrogeológico del área de estudio.....	57
Figura 12: Esquema de jerarquización geomorfológica .....	59
Figura 13: Mapa de pendientes .....	61
Figura 14: Mapa de sombras realizado a partir de (DEM) .....	62
Figura 15: Modelo Heurístico por Movimientos en Masa utilizando (SIG) .....	72
Figura 16: Modelo jerárquico Analítico para susceptibilidad. ....	72
Figura 17: Esquema de clasificación de las unidades geológicas. ....	73
Figura 18: Mapa susceptibilidad geológico de movimientos en masa. ....	78
Figura 19: Mapa de pendientes para la zonificación.....	80
Figura 20: Mapa de Rugosidad de la zona de estudio.....	81
Figura 21: Diagrama de flujo de generación del parámetro Acuenca. ....	82
Figura 22: Mapa del atributo Acuenca de la zona de estudio. ....	83
Figura 23: Mapa Morfométrico.....	84
Figura 24: Proceso metodológico en la construcción del atributo morfodinámico. ....	86
Figura 25: Determinación del parámetro Relieve Relativo .....	87
Figura 26: Mapa de inclinación de ladera del área de estudio.....	88
Figura 27: Mapa de Susceptibilidad Morfodinámica .....	90
Figura 28: Mapa de susceptibilidad Geomorfológica total. ....	91
Figura 29: diagrama de atributos del variable suelo con sus porcentajes.....	92
Figura 30: Atributos de la variable cobertura de la tierra. ....	97
Figura 31: Diagrama de susceptibilidad total con porcentajes.....	102
Figura 32: Mapa de Susceptibilidad total. ....	103
Figura 33: Clasificación de mapa de zonificación .....	106
Figura 34: Calificación de la zonificación climática .....	107
Figura 35: Valor de Aceleración máxima horizontal.....	110
Figura 36: Mapa de amenaza .....	112

Figura 37: Mapa de amenaza con de 80 % al detónete sismo y climático.....	114
Figura 38: Ubicación de la tomografía en el área de estudio.....	120
Figura 39: Perfil 1 tomografía.....	121
Figura 40: Perfil Litológico .....	121
Figura 41: Coeficientes de aceleración sísmica para el departamento de .....	125
Figura 42: Modelamiento con un nivel freático de 2 metros.....	126
Figura 43: Modelamiento con un nivel freático de 4.68 metros.....	126
Figura 44: Modelamiento con un nivel freático de 7.25 metros.....	127
Figura 45: Modelamiento con un nivel freático de 0.8281 metros.....	133
Figura 46: Modelamiento con un nivel freático de 2.41 metros.....	134
Figura 47: Modelamiento con un nivel freático de 4.m.....	135
Figura 48: Resultados arrojados RocLab.....	140
Figura 49: Envolvente de Mohr-Coulomb -Software RocLab.....	141
Figura 50: Representación de las discontinuidades en la roseta.....	148
Figura 51: Datos estructurales del talud .....	150
Figura 52: Falla plana .....	150
Figura 53: Falla por volteo .....	151
Figura 54:Falla en cuña .....	152
Figura 55: Áreas planeadas para la instalación de piezómetros.....	157
Figura 56 : Aproximación teórica del nivel de alerta del deslizamiento.....	160
Figura 57: Análisis de estabilidad del talud caño cangrejo .....	161
Figura 58: Aproximación teórica del nivel de alerta temprana talud caño cangrejo .....	162

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1: Movimiento a la margen derecha de la Quebrada Argentina.....	29
Fotografía 2 : Grupo Farallones (Dcf) .....	32
Fotografía 3: Formación Bata.....	33
Fotografía 4: Formación Calizas del Guavio. ....	34
Fotografía 5: Formación Lutitas de Macanal.....	34
Fotografía 6: Afloramientos de arenitas) .....	35
Fotografía 7 : Cañón del Rio Bata v. ....	36
Fotografía 8: Falla de Santa Maria.....	37
Fotografía 9: La Falla de Lengupá. ....	38
Fotografía 10: Se observa el escarpe.....	63
Fotografía 11: Ladera de contrapendiente,.....	64
Fotografía 12: Laderas erosivas. ....	65
Fotografía 13: Conos dedeslizamiento indiferenciado.....	66
Fotografía 14: Colina remanente .....	67
Fotografía 15: Escarpe de erosión menor, .....	67
Fotografía 16 : Rio Bata y Llanura de inundación.....	68
Fotografía 17: Se puede evidenciar que la quebrada Caño cangrejo .....	113
Fotografía 18: Afectación vía .....	117
Fotografía 19: Quebrada La Argentina.....	118
Fotografía 20: Macizo . ....	136

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. COLUMNA ESTRATIGRAFICA

Anexo B. MAPA GEOLOGICO REGIONAL.

Anexo C. MAPA GEOMORFOLOGICO.

Anexo D. INVETARIO DE DESLIZAMIENTOS

Anexo E. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Anexo F. MAPA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Anexo G..ENSAYOS DE LABORATORIO

## **INTRODUCCION**

El estudio se desarrolló en el municipio de Santa María en el cual consistió en determinar el análisis geológico, geomorfológico y geotécnico en las diferentes zonas de inestabilidad en el Municipio de Santa María en el sector de Carichana, para lograr entender el comportamiento de los diferentes materiales que lo componen, los detonantes de los diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa, para la determinación de zonificación de susceptibilidad y amenazas y así poder implementar un plan de monitoreo para la generación de alertas tempranas de amenaza propuesto por la Corporación Autónoma Regional de Chivor e implementarse en los diferentes sectores de alta importancia del departamento de Boyacá, dentro de la metodología planteada para cumplir con los objetivos trazados se plantean las diferentes etapas .

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El municipio de Santa María se encuentra ubicado en el sur del departamento de Boyacá limitado al Este con el Municipio de San Luis de Gaceno, al Norte con el Municipio de Macanal, al Oeste con Chivor y al Sur con el Municipio de Ubalá; ya que se encuentra en una zona expuesta a alta variabilidad climática, lo cual es un factor detonante de los diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa, puntualmente en Caño Cangrejo y La Argentina donde se localiza una zona altamente inestable la cual presenta una afectación directa sobre la población, debido a la magnitud y complejidad del movimiento donde se afectaron vías principales en el casco urbano del Municipio de Santa María durante las olas invernales del 2012. Poniendo en riesgo de igual manera las viviendas y población del sector ya que es posible el represamiento de la Quebrada La Argentina y Caño Cangrejo, la cual sigue su curso hacia el casco urbano del Municipio, por el cual hay la necesidad de conocer los detonantes y la realización del monitoreo de este tipo de fenómenos y generar el plan de alerta temprana propuesta por (Corpochivor) para los diferentes deslizamientos .

### **1.2 OBJETIVOS**

#### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realiza la evaluación geológica, geomorfológica y geotécnica de los diferentes deslizamientos, para determinación de susceptibilidad amenazas por fenómenos de remoción en masa con base en la metodología del Servicio Geológico Colombiano y así implementar un plan de monitoreo y generación de alertas temprana aplicando la metodología propuesta por corpochivor en el municipio de Santa María.

#### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Recopilar información bibliográfica, evaluación y análisis de la información existente suministrada por CORPOCHIVOR.

Realizar la evaluación geológica e hidrogeología.

Modelar mapas de isoyetas, isotermas, humedad relativa, evaporación y evapotranspiración potencial, con el fin de obtener el balance hídrico

Realizar la evaluación geomorfológica por la metodología del Servicio Geológico Colombiano (agosto 2003).

Realizar la evaluación geotécnica y modelamiento del deslizamiento con base en los estudios previos realizados por CORPOCHIVOR (2012).

Determinación de la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa con base en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (2013).

Implementar un plan de monitoreo del deslizamiento.

Aplicar la metodología propuesta por CORPOCHIVOR para la generación de alerta temprana con base en factores de seguridad y parámetros del suelo.

### 1.3 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio pertenece al municipio de Santa María está ubicado al sur oriente de la provincia de Neira en el departamento de Boyacá, este limita al Este con el municipio de San Luis de Gaceno, al Norte con el municipio de Macanal, al Oeste con el municipio Chivor y al Sur con el municipio de Ubalá, se encuentra en la Región Centro Oriente de la República de Colombia, sobre la Cordillera Oriental del Macizo. Su cabecera está localizada a los 04° 51' 48" de latitud Norte y 73° 16' 04" de longitud Oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 850 metros, dista de Tunja la Capital del Departamento 160 Km (ver figura1) .<sup>1</sup>

Los vértices de la poligonal (Tabla 1) presentan las siguientes coordenadas planas con origen Magna Bogotá del área de estudio son:

Tabla 1: Coordenadas de localización del área de estudio.

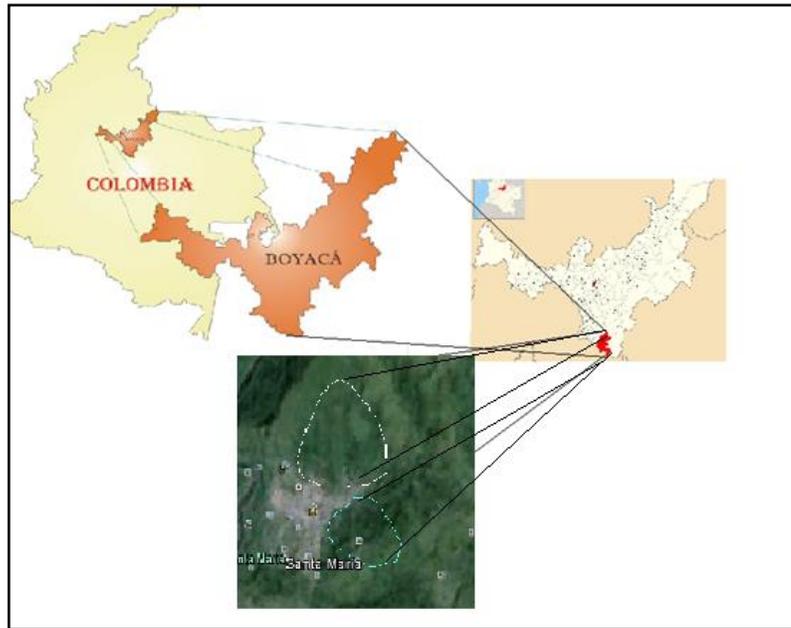
	ESTE	NORTE
1	1032000	1088000
2	1028000	1088000
3	1032000	1093000
4	1028000	1093000

Fuente: El estudio.

---

<sup>1</sup> Citado en: <http://www.santamaria-boyaca.gov.co/index.shtml>

Figura 1: Localización del Municipio de Santa María.

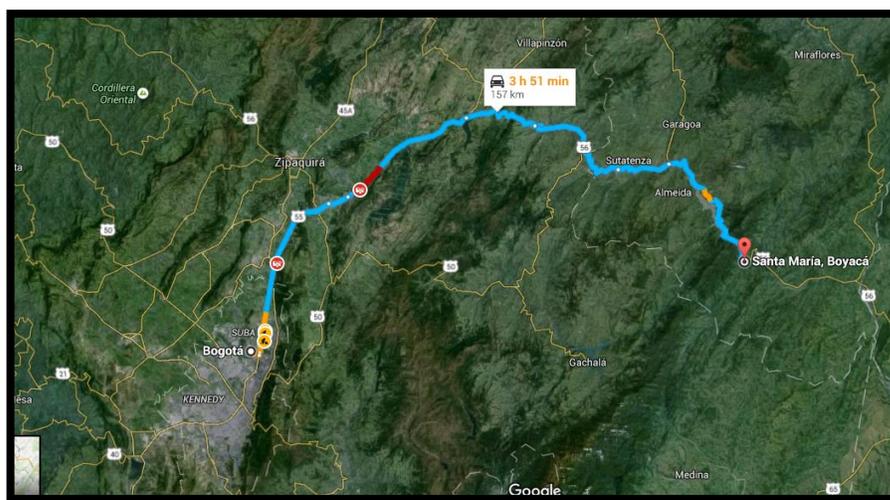


Fuente: Estudio.

### 1.3.1 Vías de acceso

Las vías más importantes de acceso al Municipio de Santa María se encuentra la vía Alterna al Llano (red secundaria) que comunica Bogotá con Yopal, la cual pasa por las represas hidroeléctricas del Sisga y Chivor y la vía departamental que comunica con Tunja. (Figura 2).

Figura 2: Ruta Bogotá – Santa María.



Fuente: Google Maps.

## **1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.4.1 Alcances**

El alcance del presente estudio busca determinar la susceptibilidad y amenaza actual por movimientos en masa, diseñar un plan de monitoreo e implementar un plan de alerta temprana con el fin de reducir la afectación del movimiento.

### **1.4.2 Limitaciones**

- Veracidad de la información suministrada por Corporación Autónoma regional (Corpochivor).
- Acceso a la zona de interés.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

El decreto 1807 de 2014 establece como determinantes de superior jerarquía, que los municipios y distritos deben tener en cuenta en la elaboración y adopción de los planes de ordenamiento territorial, las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales, así como las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo<sup>1</sup> para asentamientos humanos y las . Estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos, previstas en el artículo 10 de la Ley 388 de 1997<sup>2</sup>.

Es así como en el artículo 3 de este decreto se especifica que “se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, que contienen:

- a) La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza. .
- b) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar los estudios detallados.
- c) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo en las que se requiere adelantar los estudios detallados.
- d) La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.<sup>2</sup>

De acuerdo con lo anterior, los movimientos en masa, los más representativo y de mayor riesgo en la zona de estudio son Caño Cangrejo, La Argentina estos son los deslizamientos delimitado previamente por la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR), por cual se requiere un análisis de la información existente y el procesamiento de la misma por la Corporación, ya que este proceso

---

<sup>2</sup> Citado de : <https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/604808/2330.pdf/0fef04b8-3159-499a-99bd-e0c85e467755>

tiene gran afectación principalmente en la población aledaña. Se requiere clasificar y generar un sistema de alertas tempranas enfocado principalmente a los efectos de los detonantes, las precipitaciones, las actividades antrópicas y sísmicas mediante la metodología implantada por CORPOCHIVOR, por lo que igualmente se realizará una revisión de aspectos físicos y geotécnicos del área de estudio<sup>2</sup>.

## **1.6. METODOLOGIA**

1.6.1 ETAPA 1: Recolección y análisis de información topográfica, geológica, geomorfológica, geotécnica, e hidrológica del área de estudio en el Municipio de Santa Maria.

En esta etapa se recolecto información correspondiente a bases topográficas, planchas geológicas del municipio, mapas temáticos e información de estudios previos realizados en el municipio por parte de la Corporación Autónoma De Chivor (CORPOCHIVOR) 2012.

1.6.2. ETAPA 2: Reconocimiento en campo y caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica del deslizamiento.

En esta etapa se realizó el levantamiento geológico, geomorfológico ;realizado por medio de la metodología del Servicio Geológico Colombiano para el levantamiento escala 1:100.000, ya que no hay una metodología para escalas de estudios detallados; inventario de los diferentes movimientos que afectan la zona de estudio.

1.6.3 ETAPA 3: Realización del análisis hidrológico de la zona del deslizamiento

Por medio del análisis de la precipitación teniendo en cuenta las diferentes estaciones pluviométricas en periodos de precipitación media mensual multianual, teniendo en cuenta la escorrentía, recarga y la evapotranspiración ya que son el principal detonante de los fenómenos de remoción en masa .

1.6.4 ETAPA 4: Realizar el análisis hidrogeológico de la zona de estudio.

Se desea corroborar diferentes unidades geológicas y su uso potencial para caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas para la posterior realización de los mapas hidrogeológicos.

1.6.5. ETAPA 5: Realización de la zonificación por susceptibilidad y amenazas por fenómenos de remoción en masa.

En esta etapa se realiza aplicando la metodología del Servicio Geológico Colombiano para la zonificación de susceptibilidad y amenazas escala 1:100.000, ya que no se cuenta con una metodología para escalas de estudios detallados.

1.6.6 ETAPA 6: Realización de la evaluación geotécnica, modelamiento del deslizamiento y determinación de los factores de seguridad.

Se disponen en la zona, de estudios geotécnicos directos e indirectos como , perforaciones SPT, ensayos de laboratorio, tomografías en las zonas de gran afectación, posibles planos de falla, teniendo en cuenta los controles de desplazamientos topográficos por medio de mojones y control topográfico haciendo posible el modelamiento de los taludes con base a la caracterización del suelo, las diferentes fluctuaciones del nivel freático, información pluviométrica y control de desplazamiento generando así los diferentes factores de seguridad en los modelos que se pueden efectuar en los escenarios de amenaza por movimientos en masa.

1.6.7 ETAPA 7: Implementar un plan de monitoreo del deslizamiento.

La coordinación de el plan de monitoreo se lleva a cabo por la corporación autónoma regional corpochivor teniendo en cuenta la diversidad de información recopilada e existente de los diferentes entornos que involucrados en los deslizamientos que ellos requieren para la ejecución de un plan de monitoreo idóneo y satisfactorio para dicho estudio.

1.6.8 ETAPA 8: Aplicación de la metodología propuesta por CORPOCHIVOR para la generación de alerta temprana.

La implementación de la metodología propuesta por la corporación Autónoma Regional (Corpochivor) lo cual involucra los diferentes detonantes, modelamientos relacionados con el F.S, diferentes lecturas de los niveles piezómetros, desplazamiento de mojones efectuadas por personal calificado, generando una relación directa en base a dicha información.

## **1.7 ESTADO DEL ARTE**

En los últimos 4 años ha adquirido una especial importancia el estudio detallado de los diferentes deslizamientos que afectan el municipio de Santa María por el cual se ha recopilado información histórica y actual para la ejecución de este proyecto.

Este proyecto fue ejecutado por el convenio interadministrativo Específico 1610 de 2015 UPTC- Gobernación de Boyacá – CAR: Investigación aplicada a la modelación del territorio a partir del análisis geomorfológico del departamento de Boyacá. Código SGI 1637, se recopilo información por parte de la Corporación Autónoma Regional Del Chivor (CORPOCHIVOR), donde se recopilo datos meteorológicos históricos mensuales, diarios por parte del IDEAM y se toma como referencias las diferentes metodologías necesarias para el desarrollo de las

etapas que comprenden la realización de la Geomorfología y el análisis de la susceptibilidad, amenaza por movimientos en masa, metodologías para estos estudios a escalas 1:100.000, las cuales se ajustan a una escala menor para el análisis detallado del área de estudio ya que no se encuentra en la actualidad para estudios más detallados.

### **1.7.1 Estudios realizados en el Municipio de Santa Maria**

Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda carichana, municipio de Santa Maria jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor). Convenio nº 038 del 2012, uptc –corpochivor.

Esquema de ordenamiento territorial del municipio de santa Maria, departamento de Boyacá

### **1.7.2 Información**

Se recopiló toda la información necesaria y suministrada por (Corpochivor) e información secundaria necesaria para el desarrollo del proyecto.

Datos meteorológicos históricos y actuales del IDEAM

- Valores totales mensuales de precipitación
- Valores históricos medios mensuales de temperatura
- Valores históricos medios mensuales de humedad
- Valores totales mensuales de brillo solar

Mapa topográfico detallado del área de estudio – Corporación Autónoma Regional De Chivor (CORPOCHIVOR). Curvas de nivel generalizado de la zona, por lo cuales se generaron cada 25 metros.

Decreto 1807 de septiembre 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, haciendo especial énfasis al capítulo II, artículo 5. donde se reglamentan las condiciones técnicas para la elaboración de estudios detallados de amenazas por movimientos en masa.

La delimitación y zonificación de áreas de amenaza asociada a fenómenos de:

- Movimientos en masa
- Inundación

- Avenidas torrenciales

### **1.7.3 Metodología Geomorfológica**

Se desarrolló mediante la PROPUESTA METODOLÓGICA SISTEMÁTICA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS ANALÍTICOS APLICADOS A LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 – SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO(2013).

### **1.8 Metodología para la zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa**

Se desarrolló mediante el DOCUMENTO METODOLOGICO DE LA ZONIFICACION DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 del SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (2013), ya que no se encuentra con metodología para una escala de mayor de talle.

### **1.9 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En el municipio de Santa María en el sector de La Quebrada y Caño Cangrejo se han desarrollado diversos deslizamientos localizados en zonas puntuales, ya que se han registrado diversas situaciones de amenaza, donde se evidencia la pérdida de la vía, ya que al no tener un monitoreo constante se puede generar represamiento de la quebrada y posterior avalancha donde se puede generar un alto riesgo en la cabecera municipal (Fotografía 1).

Fotografía 1: Movimiento en masa a la margen derecha de la Quebrada Argentina.



Fuente: Estudio

## **1.10 TRABAJO DE CAMPO**

El reconocimiento de campo se ejecutó los días 10 al 20 octubre 2015, en él se desarrolló el levantamiento geológico y geomorfológico el cual consistió en la toma de datos estructurales, corroborar las diferentes unidades geológicas, geomorfológica; definir sus diferentes ambientes, en geotecnia con el inventario de los diferentes tipos de deslizamientos a escala 1:10.000.

## **2. GEOLOGIA**

Para la realización de la geología del municipio de Santa María se tomó como referencia la Plancha 229 Gachala (Ingeominas 2013) a escala 1:100.000; además se utilizó la Metodología de Descripción de Rocas Modificada de R. Comptom 1985, en la que se tienen en cuenta parámetros como espesor de la unidad, composición, friabilidad, dureza, fósiles, porosidad, forma de la estratificación y estructuras entre otros. Para definir el grado de meteorización de las rocas se tomó como base la terminología de la Sociedad Geológica de Londres, 1990 (Anexo B).

### **2.1 ESTRATIGRAFIA**

La zona de estudio se encuentra en la cordillera oriental, donde afloran una secuencia sedimentaria desde el paleozoico hasta el cenozoico sometidas a esfuerzos compresionales generando fallas de diferente tipo(ANEXO A).

### **2.2 UNIDAD DE PALEOZOICO**

El Grupo Farallones es la unidad lito estratigráfica que representa al Paleozoico en la zona de estudio, sobre el cual se registran los primeros avances del mar Cretácico sobre esta región, razón por la cual se acumularon discordantemente las unidades basales del Cretácico inferior conocidas como formaciones Batá<sup>3</sup>

#### **2.2.1 Grupo Farallones (Dcf) Devónico - Carbonífero**

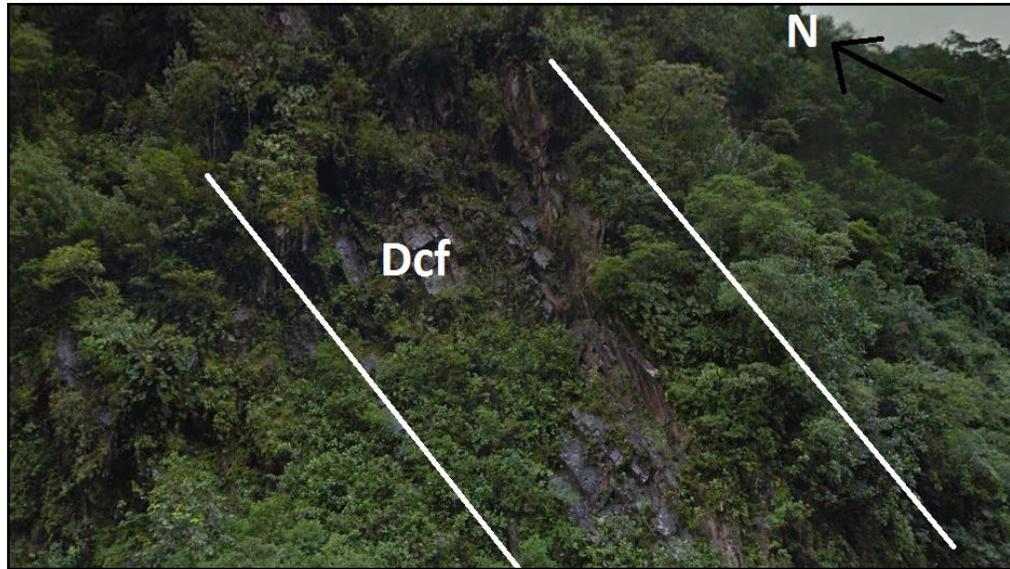
El Grupo Farallones es una unidad propuesta por Rodríguez y Ulloa para designar una potente sucesión sedimentaria, predominantemente siliciclástica, con arenitas, limolitas y lodolitas muy compactas, de coloración gris. La roca por lo general muestra foliación tectónica que enmascara a la estratificación, que se evidencia al noreste de la cabecera municipal y en la margen derecha del el cañón del rio Bata. (Fotografía 2).<sup>3</sup>

En el sector de Santa María se encontró el límite superior para conforme con la Formación Bata; un conglomerado basal de la Formación Bata donde reposa de manera concordante y neta sobre arenitas de textura fina del Grupo Farallones

---

<sup>3</sup> SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013.

Fotografía 2 : Grupo Farallones (Dcf) Areniscas de color gris, Foto tomada al Noroeste de la cabecera municipal de Santa María, en la vía Santa María conduce a Garagoa (N: 1.031.984, E: 1.089.465, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

## 2.3 UNIDADES DEL CRETÁCICO

La sedimentación en el periodo Cretácico es producto del ingreso del mar a la región durante el Berriasiano. Hubo control tanto por la paleotopografía existente (entrantes y salientes de la línea costera) generada por las rocas del Grupo Farallones, como por paleofallas normales que actuaron concomitantemente con la sedimentación; estos factores determinaron el tipo de material que se depositó, de tal forma que coetáneamente en un sector se depositaban arenitas y/o conglomerados, y en otro lugar rocas de textura fina, tanto siliciclásticas como calcáreas (arcillolitas, lodolitas, limolitas o calizas), en diferentes ambientes y condiciones de acumulación. Este marco tectonoestratigráfico hace posible que sobre el basamento paleozoico las unidades cretácicas basales muestren variaciones de espesor y cambios laterales de facies.<sup>4</sup>

### 2.3.1 Formación Bata (Jb)

La Formación Bata es una unidad propuesta por Rodríguez y Ulloa constituida por un conjunto consta de conglomerado de color verde a violeta, matriz-soportado, de guijos y guijarros, dispuesto en capas muy gruesas tabulares a lenticulares; el conglomerado es de cantos de limolitas y arenita, subangulares y subredondeados, con moderada selección y fuertemente cementados; la matriz es de arena media a gruesa de color rojo violáceo. Intercalados con estos, se

<sup>4</sup> SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013.

encuentran arenitas de cuarzo de grano muy fino, subangular, en capas medianas tabulares a lenticulares, color gris claro a verde claro, con buena selección y compactadas, en la zona que aflora 1.5km de la cabecera municipal de la vía que conduce al municipio de Garagoa, al oeste (confluencia del cañón del río Bata) (Fotografía 3)

Fotografía 3: Formación Bata Conglomerados de la parte inferior, en la margen derecha del río Bata (N: 1.030.375, E: 1.090.249, Z: 810m.s.n.m)



Fuente: Estudio

### 2.3.2 Formación Calizas del Guavio (Kicg)

La Formación Calizas del Guavio es una unidad propuesta por Rodríguez y Ulloa para designar una secuencia lutitas y calizas que afloran al norte de la cabecera municipal del municipio de santa Maria, esta unidad está constituida por calizas grises claras, con intercalaciones de lutitas y limolitas negras, fosilíferas. Además se presenta un conglomerado en la base, con cantos de arenitas, cuarcitas, limolitas y filitas, y en la mitad superior presenta niveles de cuarzoarenitas de grano fino a medio. El espesor es de 1000 m aproximadamente. El ambiente de depositación es marino somero con aguas poco oxigenadas <sup>5</sup> (Fotografía 4)

<sup>5</sup>SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013

Fotografía 4: Formación Calizas del Guavio al norte de la cabecera Municipal de Sanata Maria (N: 1.029.579, E: 1.090.209, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

### 2.3.3 Formación Lutitas de Macanal (Kilm)

El nombre de la unidad proviene del municipio de Macanal y fue designado por Ulloa & Rodríguez (1979), “a la sucesión representada por lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, arenitas y yeso. También se presentan venas de calcitas, nódulos arenosos y lentes de yeso. La sección tipo se estableció en el cañón del río Bata, entre las quebradas La argentina es de 2935 m., esta unidad se depositó en un ambiente marino de aguas someras (Fotografía 5)<sup>5</sup>.

Fotografía 5: Formación Lutitas de Macanal se encuentra en la margen derecha de la quebrada La Argentina (N: 1.028.833, E: 1.090.749, Z:810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

### 2.3.4 Areniscas de las Juntas (Kiaj)

La Formación Areniscas de las Juntas es una unidad propuesta por Rodríguez y Ulloa, para designar dos niveles arenosos, con un nivel lutítico intermedio. De manera informal, esta unidad se divide en tres miembros; los cuales, del más antiguo al más reciente son: Arenisca del Volador, Lutitas Intermedias y Arenisca de Almeida. Está conformada por capas gruesas a muy gruesas de cuarzoarenitas de grano fino, con intercalaciones de lodolitas negras. Un ambiente de depositación marino, posiblemente deltáico (Fotografía6).

Fotografía 6: Afloramientos de arenitas macizas en capas medianas a gruesas de la Formación Las Juntas en la franja localizada vía de Santamaría conduce a San Luis de Gaceno (N: 1.029.166, E: 1.091.946, Z: 625)



Fuente: Estudio

### 2.3.5 CUATERNARIO ALUVIAL

Con respecto al depósito cuaternario aluvial a lo largo de la zona de estudio se encuentra por completo en estado de erosión, y los únicos depósitos de consideración cartográfica separados en el mapa como Depósitos Coluviales (Qc) son debidos a movimientos en masa. En la zona del cañón del río Bata, donde los depósitos son más abundantes, su origen está asociado principalmente a procesos aluviales, y por lo tanto debidos a la disminución progresiva aguas abajo del gradiente de las corrientes y sus consecuentes pérdidas de velocidad de

capacidad para el transporte de sedimentos que se acumulan principalmente en llanuras aluviales o de inundación. Sin embargo, dependiendo de las condiciones topográficas locales (pendientes, confinamiento de los valles) así como de la escorrentía, grado de meteorización y espesor de la cobertura correspondiente, asociados a este control aluvial es posible encontrar variaciones donde la importancia de fenómenos como el flujo en masa o simplemente la acumulación por efectos gravitacionales va a ser mayor, existiendo variaciones transicionales dependiendo de cuáles de estos fenómenos sean dominantes (Fotografía7).

### 2.3.6 Llanura aluvial o de inundación (Qal)

El desarrollo más amplio de estas llanuras de inundación se observa a lo largo del río Bata. No obstante, se trata de valles o llanuras aluviales intramontanas angostas, que en el caso de las más extensas, -las asociadas al curso bajo del depósitos aluviales antiguos asociados, conservados como terrazas. La amplitud de estas zonas aluviales varía, sin embargo, a lo largo del curso de los ríos dependiendo de si este es consecuente, en cuyo caso se adelgazan, o pueden desaparecer, hacia aguas abajo, formando cañones en roca, o pueden alcanzar su máxima anchura a lo largo de cursos de cauces subsecuentes. Dada la poca amplitud de las llanuras de inundación, el río no divaga sobre estas en la mayor parte de su recorrido, sino que muchas de sus curvas externas erosionan lateralmente las paredes del cañón del río, con consecuente incremento de su anchura (Fotografía 7).

Fotografía 7 : Cañón del Rio Bata vía que conduce del Municipio de Santa María a al Municipio Garagoa (N: 1.031.984, E: 1.089.465, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

## 2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El Macizo de Quetame atraviesa la zona de la Plancha 229-Gachalá en dirección Noreste, en él afloran rocas del Grupo Farallones que conforman el basamento Paleozoico sobre el cual se acumularon las rocas del Cretáceo. El segmento sur del macizo, está situado entre las fallas de Santa María y los ramales más orientales de la Falla de Tesalia. En este sector las unidades generalmente se encuentran volcadas hacia el occidente, siguiendo las trazas de las fallas principales. La divergencia de estas fallas es hacia el oriente. Se cartografiaron dentro de esta zona la Falla de Lengupá. La Falla de Lengupá pone en contacto unidades del Cretácico. Las fallas de Santa María, Lengupá. Estas fallas hacen parte de un sistema compresivo y se observan efectos de compresión oblicua (tranpresivos).<sup>5</sup>

### 2.4.1 Falla de Santa María

La Falla de Santa María es una estructura de tipo regional que pasa por la población de Santa María de la cual toma su nombre. Atraviesa el sector central del área de estudio en sentido SW-NE y se encuentra localizada sobre el flanco oriental del Anticlinal de Montecristo Es una falla de tipo inverso, con ángulo alto de buzamiento, vergencia al sureste y posiblemente presenta componente transcurrente dextral. Pone en contacto rocas de la Formación Bata con rocas de la Formación Macanal generando una amplia zona de deformación donde se encuentran estratos verticalizados, inversión de capas, fracturamiento y replegamiento de la roca (fotografía 8)<sup>5</sup>.

Fotografía 8: Falla de Santa María se Pueden evidenciar al Norte de la cabecera Municipal en el cual se evidencia estratos verticales y fracturamiento y replegamiento de la rocas (N: 1.029.579, E: 1.090.209, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

## 2.4.2 Falla de Lengupá

El trazo de esta estructura va aproximadamente paralelo al de la Falla de Santa María; a través de toda su extensión, desde Algodones al suroeste de Mambita hasta el noreste de Santa María. Es una falla similar a la de Santa María, es decir, de tipo inverso, con alto ángulo de buzamiento, vergencia al sureste y posiblemente también con componente transcurrente dextral. La Falla de Lengupá verticaliza las capas de arenitas de la Formación Las Juntas y en las rocas de la Formación Macanal genera repliegues y ganchos de falla (Fotografía 9)<sup>6</sup>.

Fotografía 9: La Falla de Lengupá se puede evidenciar en la margen derecha de la quebrada La Argentina también evidenciar replegamiento de la formación lutitas de Macanal y gancho de falla. N: 1.028.833, E: 1.090.749, Z:810m.s.n.m.



Fuente: Estudio

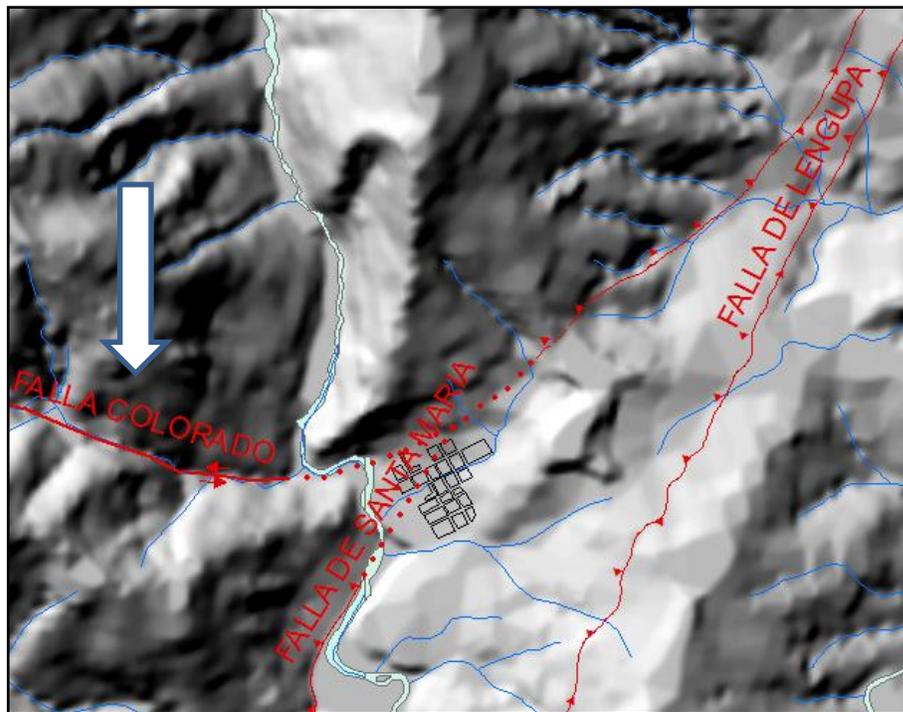
---

<sup>6</sup> SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Geología de la plancha 229 – Gachala, Bogota.2013

### 2.4.3 Falla Colorado

El trazo de falla está localizada al oeste de la de la cabecera municipal, la falla tiene dirección Noroeste, desplazando sinistralmanre las Formaciones Farallones y Bata, se puede tener en cuenta el cambio drástico de la dinámica que tiene el Rio Bata , limitada por la Falla de Santa María de tipo inverso(Figura 3) .

Figura 3: Mapa de sombras de la zona de estudio done se evidencia la Falla de Colorado done se ve el cambio significativo de la dinámica del Rio Bata que se encuentra al oeste de la cabecera municipal de Santa María N: 1.029.311, E: 1.089.788, Z:810 m.s.n.m.



Fuente : Estudio

### 3. ANALISIS HIDROLOGICO

El conocimiento del balance hídrico es determinante para el estudio del ciclo hidrológico ya que con este es posible comparar los diferentes recursos hídricos de un sistema, eficiencia y exceso de agua en un periodo de tiempo.

Se calculó sobre los datos de las siguientes estaciones (Tabla 2) para determinación del balance hídrico de la zona de estudio en el Municipio de Santa María, por tal razón se hace necesaria la estimación de la escorrentía superficial, evapotranspiración y valores de precipitación medios mensuales multianual, lo que nos permita estimar el balance hídrico con el fin de obtener la oferta total de agua superficial. La información obtenida puede ser utilizada para evaluar los recursos hídricos del área de trabajo (calidad, cantidad y distribución en tiempo y espacio), además de la capacidad para el suministro y satisfacción de la demanda; así mismo se pueden proyectar y diseñar proyectos relacionados con el agua en este caso para la planificación de buenas estrategias de gestión del recurso hídrico; de la misma forma es de gran importancia que exista una actualización de las redes de datos de las estaciones en la zona de trabajo que permitan tomar los datos reales del comportamiento de las diferentes variables que se utilizan para la estimación del balance hídrico<sup>7</sup>.

Tabla 2: Estaciones hidrometereologicos

ID	CODIGO	CAT	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ELEV	LONGITUD	LATITUD
1	35070190	PG	Chivor	Chivor	Boyacá	1850	73°22'2.5"W	4°53'10.8"N
2	35070520	PG	Pomarrosos Los	Macanal	Boyacá	1780	73°21'1.3"W	4°55'53.1"N
3	35080070	PM	San Luis de Gaceno	San Luis de Gaceno	Boyacá	400	73°10'12.3"W	4°49'15.9"N
4	35070170	PM	Nazareth	Santa Maria	Boyacá	400	73°12'0.0"W	4°44'0.0"N
5	35060220	PM	Gloria La	Ubala	Cundinamarca	1845	73°25'11.2"W	4°48'56.5"N
6	35060300	PM	Mundo Nuevo	Ubala	Cundinamarca	1740	73°23'31.0"W	4°51'9.1"N
7	35060250	PM	Sta Rosa de Ubala	Ubala	Cundinamarca	1649	73°24'25.9"W	4°47'48.4"N
8	35195020	CO	Tauramena	Tauramena	Casanare	460	72°45'1.3"W	5°1'14.9"N
9	35095110	CP	Huerta La Grande	Villanueva	Casanare	255	72°55'2.4"W	4°39'18.3"N

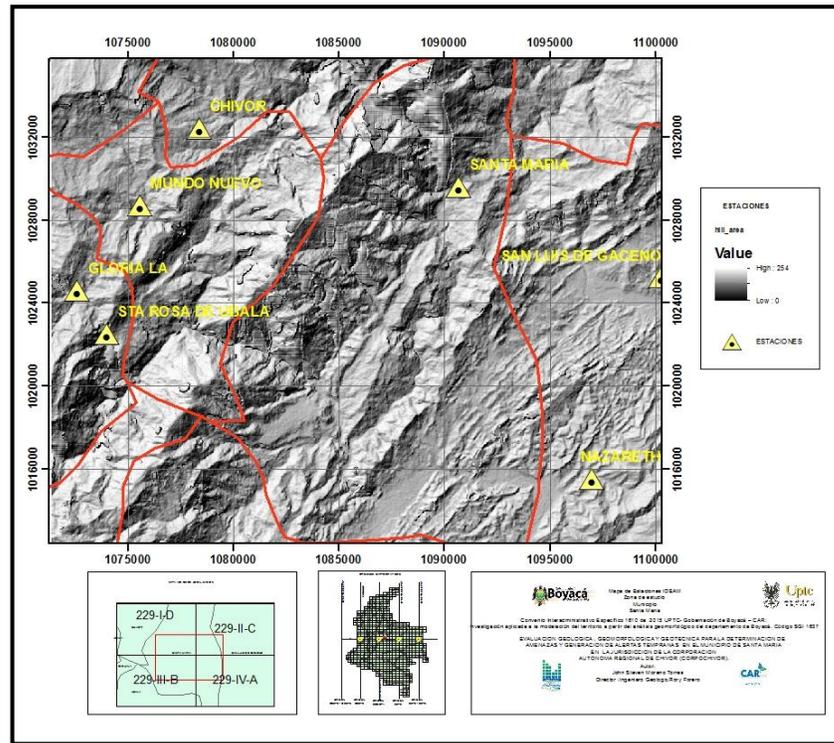
Fuente: Estudio.

Las estaciones meteorológicas utilizadas son de tipo, climatológico ordinario y pluviométricas, las dos primeras permiten obtener datos de temperatura, evaporación, precipitación y humedad relativa.

<sup>7</sup> Rodriguez E. Ballesteros E. Bettin M. Ángel C. Componente Hidrologico. Universidad Nacional de Colombia, Corpochivor, Corpoboyaca.

En la (figura 4) se permite observa como están distribuidas cada una de las estaciones utilizadas para la realización de le balance hídrico.

Figura 4: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.



Fuente: Estudio

### 3.1 Característica Hidrometeorológica

La caracterización Hidrometeorologica permite describir y analizar los cambios que presentan en el clima en un intervalo de tiempo determinado mediante los diferentes parámetros climatológicos.

#### 3.1.1 Precipitación

Para obtener el mapa de Isoyetas se utilizó la precipitación media multianual, procesando mediante el software ArcGIS, con la herramienta de interpolación IDW. Según las Isoyetas encontradas se logra observar que la precipitación en el área de estudio oscila entre valores de 4806 mm y 41337 mm; donde el mayor grado de precipitación se encuentra en la cabecera municipal de Santa María.

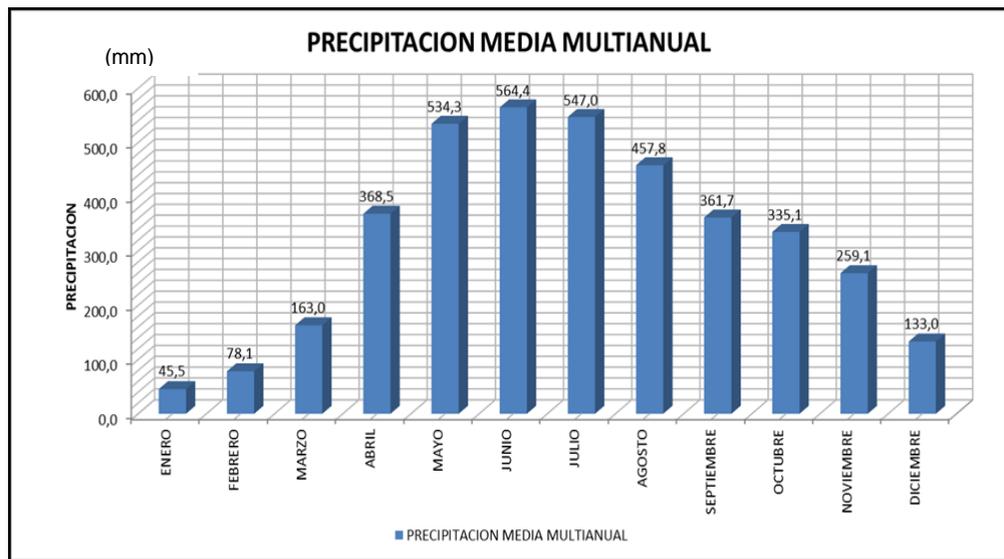
El régimen de lluvia que se presenta en el área de trabajo es simétrica negativa, donde se presenta las mayores precipitaciones en los meses de mayo, junio, julio,

y las menores precipitaciones en los meses de enero, febrero y diciembre. ( Gráfico 1).

### 3.1.1.2 Precipitación Media

La precipitación media permite conocer el valor de este parámetro de forma general en la zona de estudio en el intervalo de tiempo que se estableció, para ello se utilizaron el método de Isoyetas (ver Tabla 3). Con esto se obtuvo una precipitación media de 4345 mm

Grafico1: Valores de precipitación media multianual.



Fuente: Estudio.

Tabla 3: Precipitación media por método de las isoyetas

PRECIPITACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
ISOYETAS	AREA	% AREA	PP ENTRE ISOYETAS	MEDIA	PP MEDIA * AREA
	4150	0,3	1,5	4150	1245,00
4150	4200	2,3	11,8	4175	9602,50
4200	4250	2,5	12,8	4225	10562,50
4250	4300	2,6	13,4	4275	11115,00
4300	4350	2,4	12,3	4325	10380,00
4350	4400	2,3	11,8	4375	10062,50
4400	4450	2	10,3	4425	8850,00

PRECIPITACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
ISOYETAS		AREA	% AREA	PP MEDIA ENTRE ISOYETAS	PP MEDIA * AREA
4450	4500	1,6	8,2	4475	7160,00
4500	4550	1	5,1	4525	4525,00
4550	4600	0,8	4,1	4575	3660,00
4600	4650	0,6	3,1	4625	2775,00
4650	4700	0,5	2,6	4675	2337,50
4700	4750	0,2	1,0	4725	945,00
4750	4800	0,2	1,0	4775	955,00
4800		0,16	0,8	2400	384,00
<b>TOTAL</b>		<b>19,46</b>	<b>100,0</b>		<b>84559,00</b>

Fuente: Estudio.

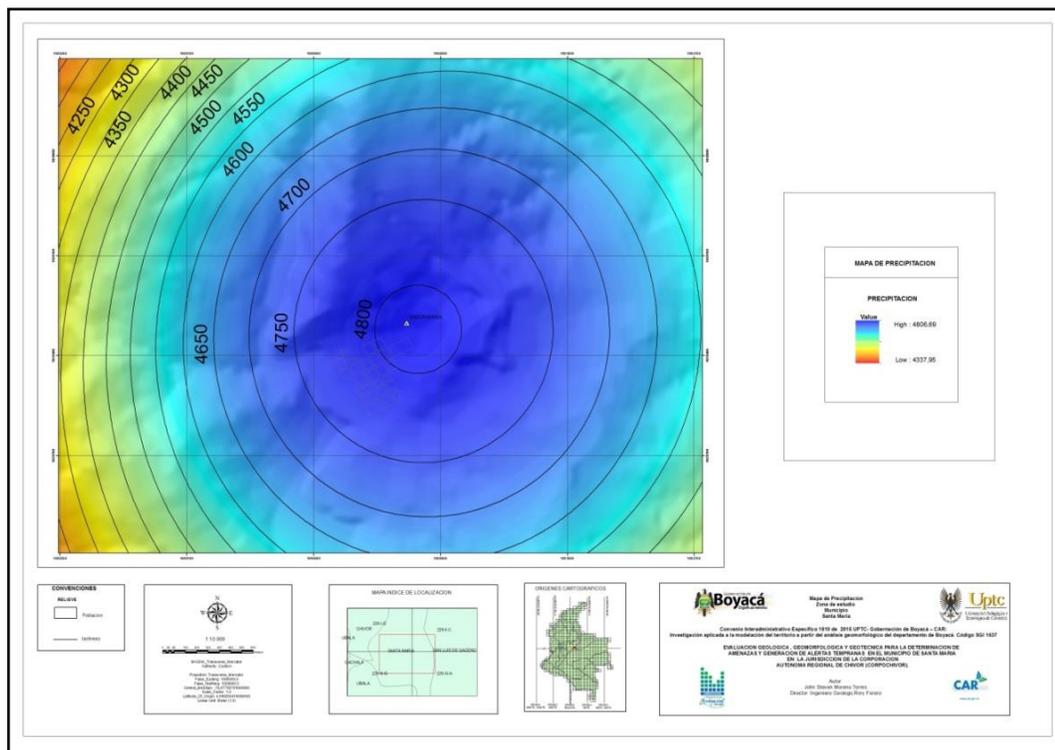
Fórmula para el cálculo de la precipitación media:

$$P_m = \frac{(P_{media} * Area)_{total}}{Area_{total}}$$

$$P_m = \frac{84559 \text{ mm} * \text{Km}^2}{19.46 \text{ Km}^2}$$

$$P_m = 4345 \text{ mm}$$

Figura 5: Mapa de Isoyetas del área de estudio



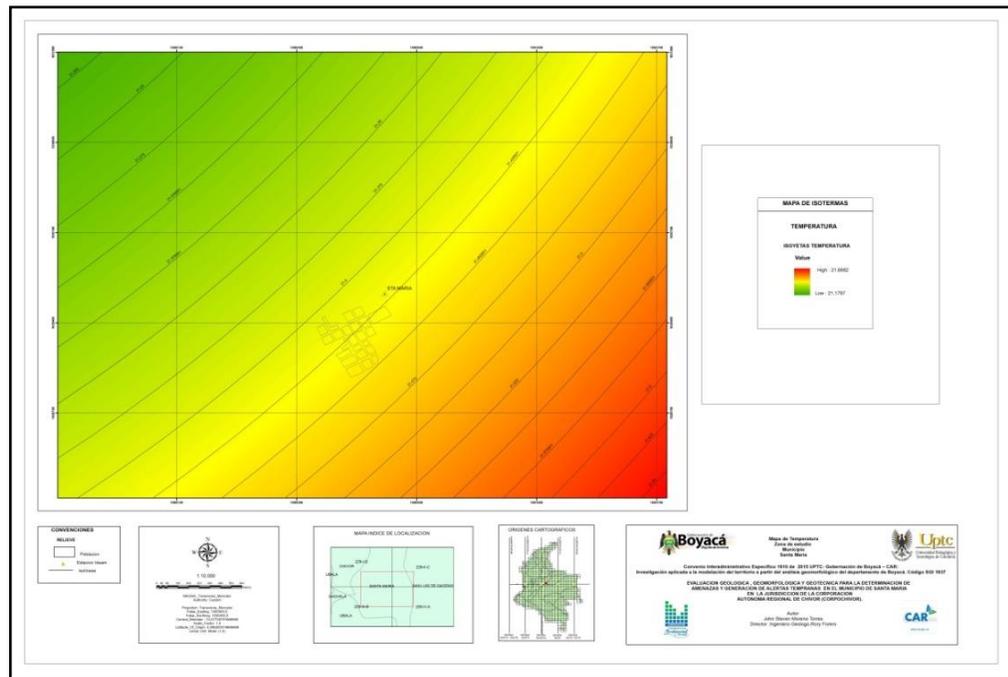
Fuente: Estudio.

### 3.2 Temperatura

La temperatura es de gran importancia debido a que esta influye en los procesos de evapotranspiración y humedad de un área. Ya que a medida que la temperatura del aire aumenta la precipitación disminuye (figura 6).

Para el área de trabajo se presenta un intervalo de temperatura de 21.68°C a 21.7°C, correspondiente a un clima templado húmedo según el atlas climatológico del IDEAM. Según el mapa de isotermas obtenido con el procesamiento en ArcGIS, la temperatura disminuye de la parte Noroeste de la zona, presentando un grado medio de temperatura en la cabecera municipal de municipio de Santa María que corresponde a 21.4°C a 21.5°C. Igualmente se ve reflejado que la temperatura disminuye con respecto a la altitud, ya que tiene un comportamiento inverso a esta, porque depende de la capacidad que tiene el aire de retener calor, así a menor altitud las masas de aire son más densas por lo que se facilita la retención de calor, contrario a lo que sucede en zonas de mayor altitud.

Figura 6: Mapa de Isotermas del área de estudio.



Fuente: Estudio.

### 3.3 Humedad Relativa

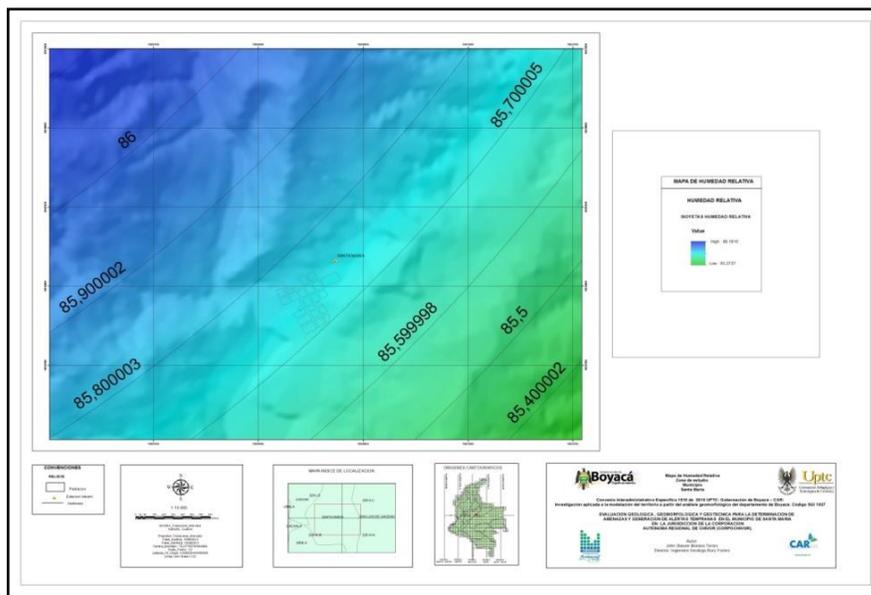
Este parámetro comprende la relación entre la presión de vapor real y la saturación, expresada en porcentaje, y tiene alta influencia en la variable de evaporación que se presente.

En la zona de estudio se definió a partir del mapa de humedad relativa valores entre 86% y 85%. Siendo de 85.8 % a 85.59% la humedad relativa de la cabecera municipal y una disminución al noroeste de él (Figura7).

### 3.4 Evaporación

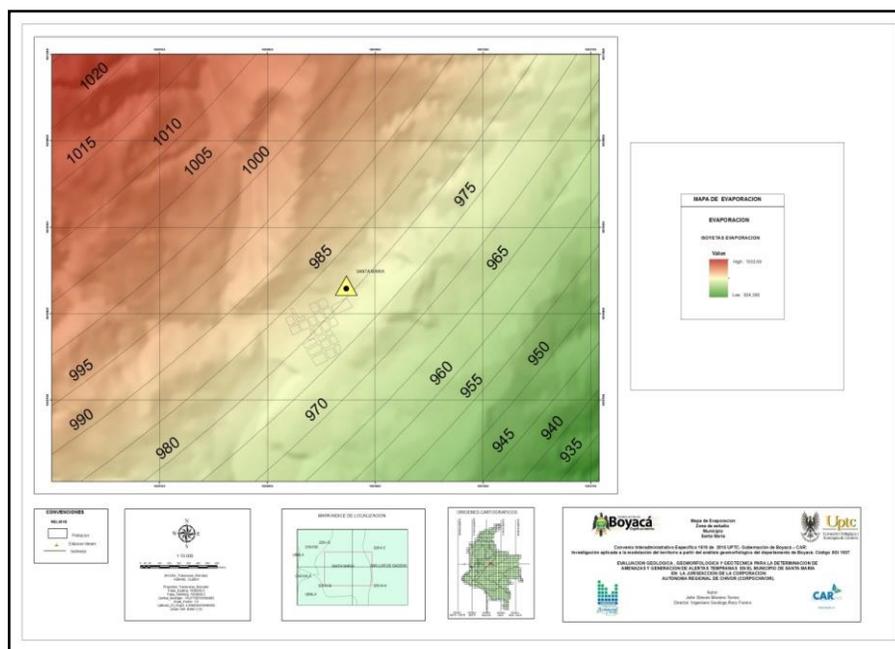
Es el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso, transfiriéndose a la atmosfera, se encuentra condicionada principalmente por el brillo solar y los vientos. Al realizar la interpolación de este parámetro se logró establecer que en el área de estudio se encuentran dos zonas con diferencia de evaporación que están limitadas por el río Bata, Al realizar la interpolación de este parámetro se logró establecer que en el área de estudio se encuentran entre 1020mm y 935mm. (Figura 8)

Figura 7: Mapa de Humedad Relativa del área de estudio.



Fuente: Estudio.

Figura 8: Mapa de Evaporación del área de estudio.



Fuente: Estudio

### 3.5 Evapotranspiración Potencial (ETP)

Es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua y cubierto con una cobertura vegetal completa. Este parámetro se calcula a partir de la temperatura media mensual multianual, mediante el método de Thornthwaite, cuya fórmula es<sup>8</sup>:

$$ETP = 16 * (10 * T I)^a$$

Donde, T: temperatura media mensual  
I índice calórico  
A: exponente empírico

$$I = \sum i_i = (T5)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

Para el factor de corrección se usó la tabla de parámetros del método de Thornthwaite. El valor de la constante se debe debido a la ubicación del polígono en Latitud. Los Resultados obtenidos a partir de este método para cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas se presentan en la( Tabla 4).

Teniendo en cuenta la evapotranspiración media multianual con los diferentes promedios históricos de las 8 estaciones necesarios, se tiene en cuenta el método de interpolación de inverso a la distancia, generado en el SIG ArcGIS (versión 10.2) como IDW, también aplicado en el cálculo de valor medio

La evapotranspiración media estimada para el área de estudio es de 1163.2 mm.

Tabla 4: Cálculo de ETP Media del área de estudio.

EVAPTRASPIRACION MEDIA DEL AREA DE ESTUDIO					
ISOYETAS	AREA	% AREA	EVPTR MEDIA ENTRE ISOYETAS	EVPTR MEDIA * AREA	
	1150	0,3	1,5	1150	345,00
1150	1155	0,4	2,0	1152,5	461,00
1155	1160	1,8	9,0	1157,5	2083,50
1160	1165	3	15,1	1162,5	3487,50
1165	1170	3,7	18,6	1167,5	4319,75
1170	1175	5,1	25,6	1172,5	5979,75
1175		5,6	28,1	587,5	3290,00
	<b>TOTAL</b>	<b>19,90</b>	<b>100,0</b>		<b>19966,50</b>

Fuente: El estudio

<sup>8</sup> M.Hang, M.Segovia. Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm. Departamento De Hidraulica UNNE.Chaco

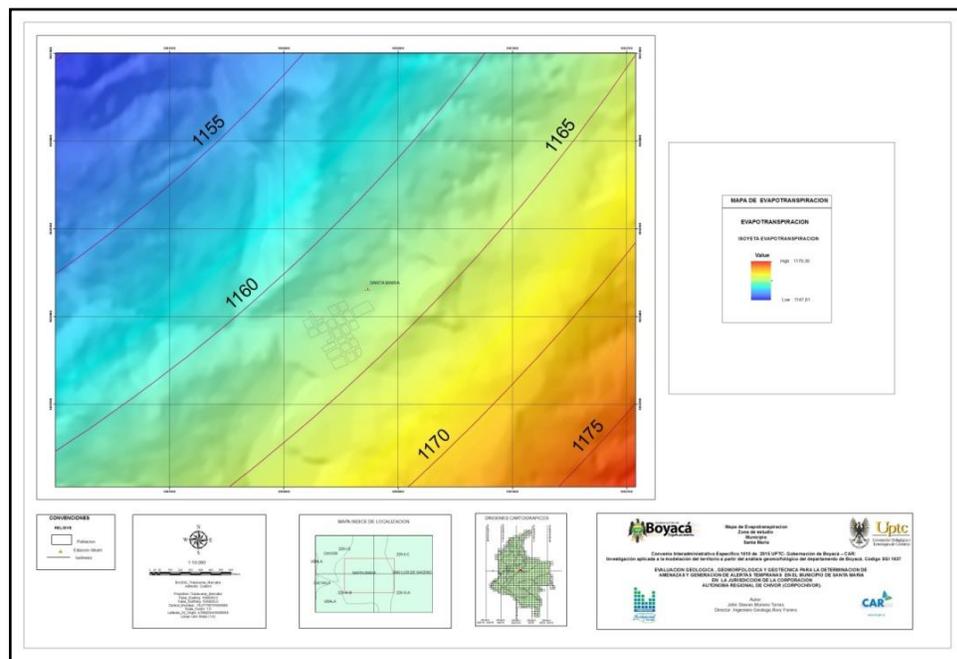
Calculo para la evapotranspiración media:

$$ETP_{media} = \frac{ETP\ MEDIA * AREA}{AREA\ TOTAL}$$

$$ETP_{media} = \frac{19966.50\ (mm * Km^2 * año)}{19.90\ Km^2}$$

$$ETP_{media} = 1163,247\ mm * año$$

Figura 9: Mapa de Evapotranspiración Potencial (ETP) Promedio Multianual.



Fuente: El estudio

### 3.6 Escorrentía (Q)

La escorrentía es el conjunto de agua producto de la precipitación que se desplaza por la superficie terrestre, por acción de la gravedad; depende de diferentes variables como la topografía, condiciones climatológicas, cobertura vegetal y aspectos hidrológicos. Para el cálculo de este parámetro se utilizó el método de Número de Curva (Soil Conservation Service), que define la siguiente formula<sup>8</sup>:

$$Q = (P - 0,2 S)^2 / (P + 0,8 S)$$

Donde, P es la precipitación considerando que en una misma cuenca diferentes niveles de precipitación generan diversas escorrentías.

$S = (25400 / CN) - 254$  Capacidad potencial de lluvia a retener por la cuenca.  
CN: Número de Curva, determinado mediante (Tablas5).

El número de curva se determinó mediante las Tablas 6 y 7 en las cuales intervienen diferentes condiciones de terreno, como son la cobertura vegetal, el uso de suelo, condición hidrológica a partir de la textura del suelo.

Tabla 5 : Valore de CN para suelos

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R + CR	Pobre	71	80	87	90
	R + CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82
	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	Buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados, o con	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	R + CR	Pobre	64	75	83	86
	R + CR	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
	C + CR	Buena	60	72	80	83

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
	C + T	Pobre	61	72	79	82
	C + T	Buena	59	70	78	81
	C + T + CR	Pobre	60	71	78	81
	C + T + CR	Buena	58	69	77	80

Fuente: Pardo R, Marrero N, 2009

Tabla 6: Clasificación suelos Según Clase Hidrológica.

GRUPOS				
CARACTERISTICA	A	B	C	D
VELOCIDAD DE INFILTRACION	ALTA	MODERADA	BAJA	MUY BAJA
TRANSMISIBILIDAD	ALTA	MODERADA	BAJA	MUY BAJA
PROFUNDIDAD	MUY PROFUNDOS	PROFUNDOS	BAJA	MUY BAJA
DRENAJE INTERMNO	MUY BUENO	BUENO	MODERADO	MALO
TEXTURA	ARENAS Y GRAVAS	MEDIO ARENOSO	MEDIO ARCILLOSO	ARCILLAS PESADAS
POTENCIAL DE ESCURRIMINETO	BAJO	MODERADOBAJO	MODERADO ALTO	ALTO
NIVEL FREATICO	-	-	-	PREDETERMINADO

Fuente: Pardo R, Marrero N, 2009

Según los análisis de las tablas se determinó que la cobertura de la zona se encuentra entre las clases Hidrológicas B y C, las cuales se describen a continuación:

Grupo A. Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprenden los terrenos profundos sueltos con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla (Arenosos, arenosos-limosos.)

Grupo B. Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del Grupo A, otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

Grupo C. Incluye los suelos, que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, por presentar un estado impermeable que dificulta la infiltración o porque en conjunto, su textura es franco-arcillosa o arcillosa.

Grupo D. Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran permeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de Tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

Analizando cada factor se encontraron los valores de Número de curva descritos en la (Tabla7), dependiendo del tipo de cobertura vegetal.

Tabla 7: Determinación de Numero de Curva

TIPO DE COBERTURA	CONDICION HIDROLOGICA						
	AREA	NC	A	B	C	D	%AREA
Bosque denso alto de tierra firme	4,69	3,549	15	44	54	61	0,066
Pastos limpios	15,85	16,428	39	61	74	80	0,222
Mosaico de pastos con espacios naturales	18,87	19,557	39	61	74	80	0,264
Bosque fragmentado	13,83	13,562	36	60	70	76	0,194
Tejido urbano continuo	10,59	12,158	59	74	82	86	0,148
Vegetación secundaria o en transición	4,214434	4,486	43	65	76	82	0,059
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2,68215	2,930	55	69	78	81	0,038
Pastos enmalezados	0,671461	0,705	25	59	75	83	0,009
Total	71,40	73,375					1,000

Fuente: Estudio

El valor de los NC se realizó con el siguiente cálculo:

$$NC = \text{Clase Hidrológica} \times \% \text{Área}$$

Calculando los parámetros se tiene el valor de la cantidad de agua que recorre el área de estudio (tabla 8):

Tabla 8: Valores de Escorrentía

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Precipitacion	45,5	78,1	163,0	368,5	534,3	564,4	547,0	457,8	361,7	335,1	259,1	133,0	3847,3
CN	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	73,37	
S	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	92,17	
Q	6,12	23,45	88,26	277,08	437,67	467,11	450,03	363,20	270,63	245,23	174,02	63,47	2866,28

Fuente: Estudio

El valor de escorrentía anual para el área de estudio estimado es de 2866,4 mm

Grafico 2: Escorrentía Superficial.



Fuente: Estudio

### 3.7 Balance Hídrico

El balance hídrico (Ver Tabla 9 –Grafico 3) permite analizar los volúmenes que entran al área de estudio como la precipitación y los volúmenes de agua que salen de la cuenca por medio de infiltración, escorrentía y evapotranspiración.

Tabla 9: Balance Hídrico

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
P (mm)	45,5	78,1	163,0	368,5	534,3	564,4	547,0	457,8	361,7	335,1	259,1	133,0	3847,3
ETP (mm)	106,9	101,5	107,4	93,4	89,2	81,5	80,6	86,0	88,7	97,6	97,1	103,8	1133,7
ESC	6,12	23,45	88,26	277,08	437,67	467,11	450,03	363,20	270,63	245,23	174,02	63,47	2866,28
Δ	-67,58	-46,80	-32,71	-1,97	7,39	15,80	16,34	8,66	2,42	-7,82	-12,07	-34,33	
ALM	0	0	0	0	7,39	23,19	39,53	48,19	50,61	42,80	30,73	0,00	
DEFECIT	-67,58	-46,80	-32,71	-1,97								-34,33	-183,40
RECARGA					7,39	23,19	39,53	48,19	50,61	42,80	30,73		242,45

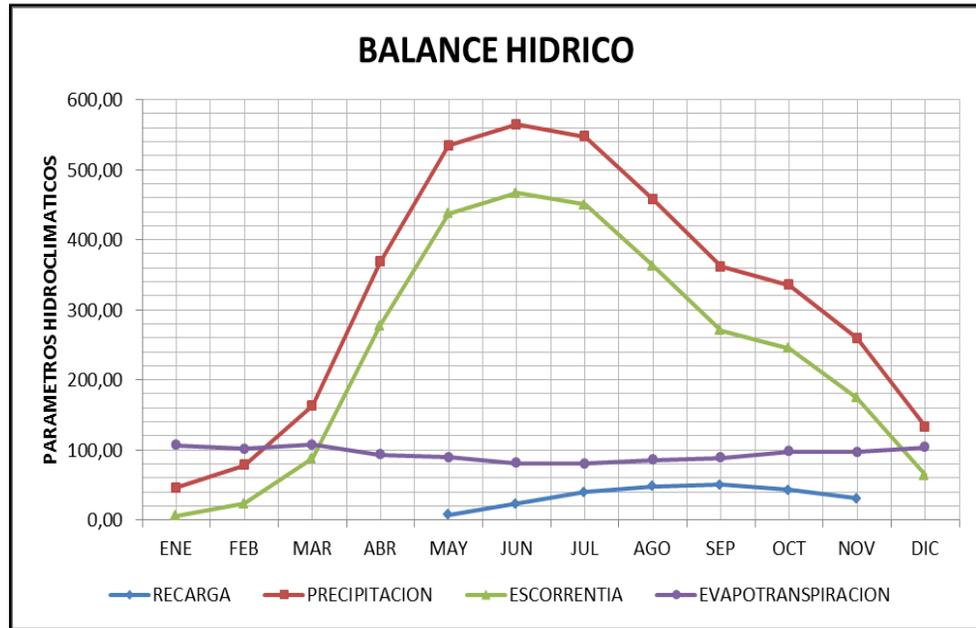
Fuente: Autores

Para el desarrollo del balance hídrico se analizaron diferentes aspectos climatológicos, donde los parámetros fueron obtenidos mediante el procesamiento de la información suministrada por el IDEAM. Algunos parámetros fueron determinados mediante el software ArcGIS 10.2.

Se determina que en los meses de diciembre a abril se presenta déficit en el aspecto de recarga (Ver tabla 9), debido a que los valores de precipitación en estos meses son desfavorables, siendo mayor el valor de evapotranspiración. El periodo de mayo a noviembre tiene aumento en la recarga, siendo el mes más favorable Septiembre, debido al aumento en las precipitaciones manteniendo un valor de evapotranspiración constante. La escorrentía está directamente relacionada con la cantidad de precipitación de cada mes teniendo un comportamiento similar, con valores menores.

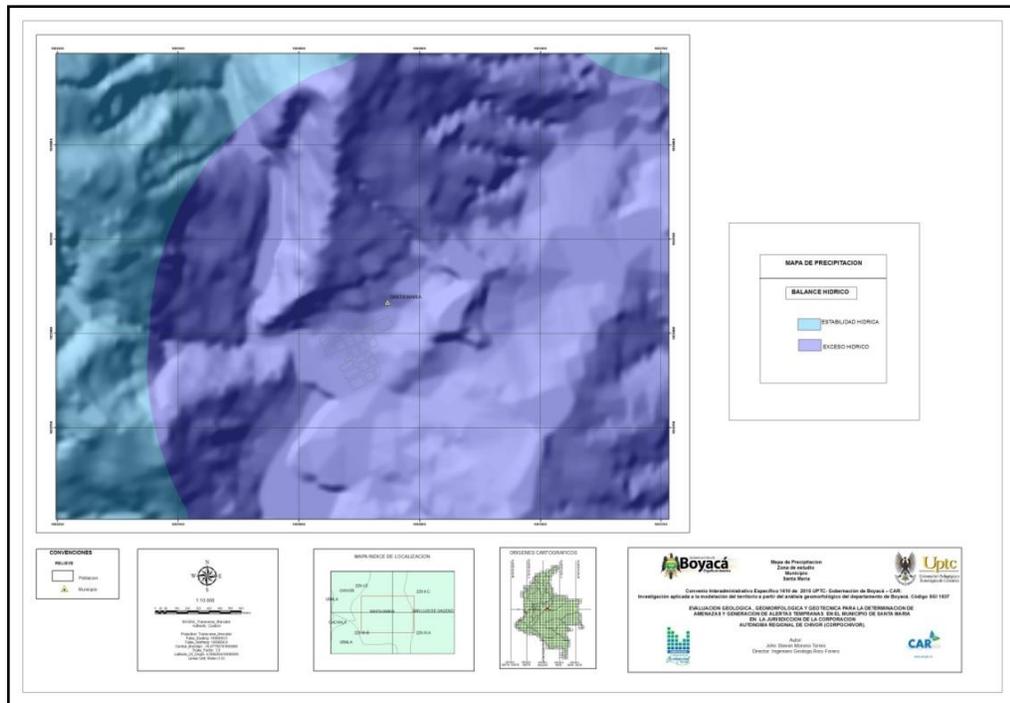
Se logró determinar que en el área de estudio se presenta un exceso hídrico en la cabecera municipal de Santa María, y un de déficit en la parte NE de la cabecera municipal (Figura 10), esto determinado a partir de las variables de precipitación, evapotranspiración y escorrentía.

Grafico 3: Balance Hídrico



Fuente: Estudio

Figura 10 : Mapa balance hídrico



Fuente: Estudio

## 4. HIDROGEOLOGIA

La hidrogeología se encarga de evaluar la presencia, disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas, un acuífero potencial depende principalmente de sus características intrínsecas: La capacidad de almacenar y de permitir el flujo del agua; para ello se estudia detalladamente las formaciones y/o suelos con una alta permeabilidad.

Un estudio hidrogeológico se basa principalmente propiedades físicas y geológicas de las rocas como lo son: la permeabilidad, porosidad, conductividad hidráulica, y características secundarias de las rocas como el fracturamiento y desclasamiento, a partir de estas características se definen tres tipos de unidades hidrogeológicas: Acuífero, Acuitardo y/o Acuicierre y Acuifugo (Figura11).<sup>9</sup>

### 4.1 ACUÍFERO

Son rocas que almacenan agua y a su vez permiten su movimiento bajo la acción de fuerzas de gravedad, es decir, presenta una porosidad y permeabilidad media a alta. De tal manera que puede explotarse en cantidades relativamente apreciables. Estos a su vez pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada dependiendo de la posición estructural de la roca. Pueden ser<sup>9</sup>:

#### 4.1.1 Acuíferos Confinados

En estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica, son rocas permeables limitadas por rocas de muy baja permeabilidad. No existe una superficie libre de del agua por lo que se habla de superficies piezométricas (Superficies imaginarias que coinciden con el nivel de agua del acuífero). Cuando se producen cabezas piezométricas mayores que las de la superficie del terreno se producen acuíferos saltantes o artesianos<sup>9</sup>.

#### 4.1.2 Acuíferos Libres

Son aquellos que presentan una superficie libre de agua, que está en contacto directo con la atmosfera, esta superficie se denomina Nivel freático. En estos acuíferos el espesor varía de forma directa con el comportamiento temporal de la precipitación<sup>9</sup>.

#### 4.1.3 Acuíferos Semi-confinados

Son acuíferos limitados ya sea por la base o techo, o por ambos, por una capa semipermeable. Esta situación permite que haya flujo entre acuíferos que se

---

<sup>9</sup> M.Velez, C. Ortiz, M.Vargas. LAS AGUAS SUBTERRANEAS un enfoque práctico. Instituto Colombiano De Geología y Minería INGEOMINAS. Universidad Nacional De Colombia. Bogotá, Colombia 2011

encuentran separados por el Acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección a la diferencia de niveles piezométricos existentes entre

#### **4.2 ACUITARDO Y/O ACUICIERRE**

Son rocas que almacenan agua, pero sólo permiten el flujo de esta en forma muy lenta. Estas rocas pueden ser claves cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional. Se consideran acuitardos a rocas como arcillas y limos arenosos, gravas limo-arenosas que permiten que el material más fino se infiltre provocando una reducción en las líneas de flujo<sup>9</sup>.

#### **4.3 ACUIFUGO**

Son rocas o unidades geológicas impermeables que no almacenan ni transmiten agua, es decir, aquellas rocas en las cuales no existen intersticios intercomunicados y en consecuencia no absorben ni permiten el paso de agua.

#### **4.4 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS**

Para la clasificación hidrogeológica de cada una de las formaciones se tomó en cuenta la capacidad de almacenar y transmitir fluidos de las rocas.

##### **4.4.1 ACUÍFEROS**

Según las condiciones de porosidad y permeabilidad que presentan las Formaciones Geológicas en la zona, se caracterizaron las siguientes Unidades como acuíferos<sup>9</sup>

##### **4.4.1.1 Depósitos de Cuaternarios (Q):**

Son predominantes de tipo aluvi-coluvial, constituidos por cantos y bloques de rocas competentes, embebidos en una matriz arcillosa. A pesar de las características de la matriz, su condición de depósito no litificados le imprime una calidad de acuífero potencial.

##### **4.4.1.2 Grupo Farallones (Dcf) :**

Está constituido por varios niveles de carácter arenoso y conglomerático, razón por la cual se consideran las rocas de este grupo como acuíferos

##### **4.4.1.3 Formación Bata (Jb) Berriasiano:**

La Formación Bata es una unidad por un conjunto de conglomerado de color verde a violeta, matriz-soportado, de guijos y gujarros, dispuesto en capas muy gruesas tabulares a lenticulares; el conglomerado es de cantos de limolita y arenita, subangulares y subredondeados, con moderada selección y fuertemente cementados . A pesar de las características de la matriz, su condición le imprime una calidad de acuífero potencial.

##### **4.4.1.4 Areniscas de las Juntas (Kiaj):**

La Formación Areniscas de las Juntas de manera informal, esta unidad se divide en tres miembros; los cuales, del más antiguo al más reciente son: Arenisca del

Volador, Lutitas Intermedias y Arenisca de Almeida. Está conformada por capas gruesas a muy gruesas de cuarzoarenitas de grano fino, con intercalaciones de lodolitas negras en general presentan características de permeabilidad y su alteración con algunas capas de arcillolitas, permite que en esta formación se defina como acuífero.

#### 4.4.1.5 Formación Calizas del Guavio (Kicg).

Esta unidad está constituida por calizas grises claras, con intercalaciones de lutitas y limolitas negras, fosilíferas. Además se presenta un conglomerado en la base, con cantos de arenitas, cuarcitas, limolitas y filitas, y en la mitad superior presenta niveles de cuarzoarenitas de grano fino a medio. Compuesta por un conjunto de conglomerados, lutitas y caliza en esta formación se defina como acuífero.

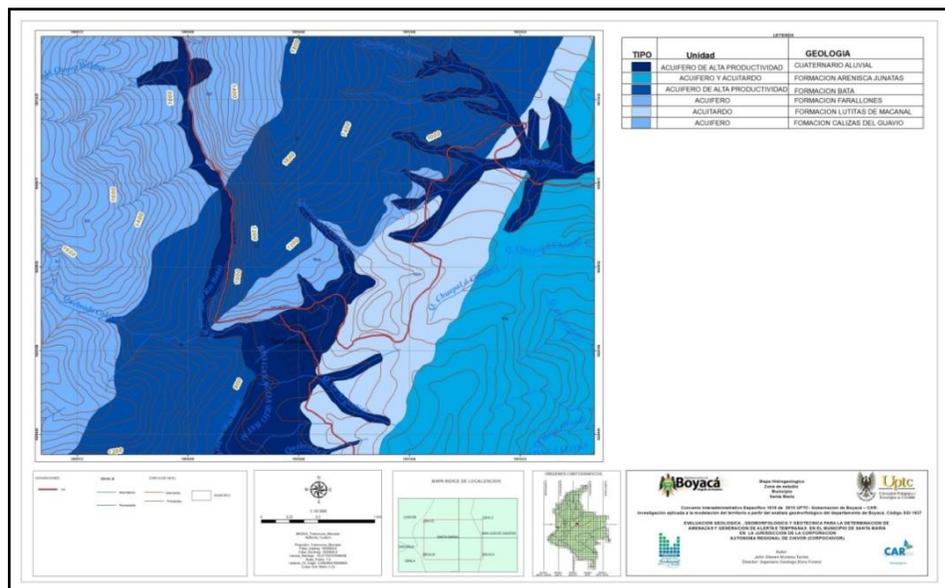
#### 4.4.2 ACUITARDOS Y/O ACUICIERRE:

Son rocas semipermeables que a pesar de contener grandes cantidades de Agua, la transmiten muy lentamente. En la zona se calificaron como acuitardos a las siguientes formaciones.<sup>9</sup>

##### 4.4.2.1 Formación Lutitas de Macanal (Kilm):

Esta formación es impermeable debido a su composición lutita con pocas intercalaciones de arenisca y caliza. Teniendo en cuenta estas características, es considerada como Acuitardo.

Figura 11: Mapa Hidrogeológico del área de estudio



Fuente: El estudio

## 5 GEOMORFOLOGÍA

Se entiende como geomorfología el análisis o estudio de las formas del relieve, los procesos que condujeron a su formación y su interrelación con su entorno paisajístico teniendo en cuenta el material presente en el área. Dentro de los procesos modeladores del terreno se habla de factores exógenos y endógenos, entendiendo como procesos exógenos todos aquellos ocasionados por efectos externos y climáticos, dentro de estos procesos encontramos la meteorización, erosión, gelifracción. Los factores endógenos son todos aquellos ocasionados por la dinámica interna de la tierra y que modelan el terreno para posteriormente ser afectados por procesos exógenos.

Las geoformas y procesos involucrados para el área de influencia del proyecto, se pueden distinguir claramente 4 ambientes morfogenéticos los cuales tienen un diferente proceso de formación y modelado del terreno.

### 5.1 METODOLOGÍA APLICADA

El propósito de la cartografía geomorfológica es proveer de información concisa, sistémica sobre las formas del terreno; su origen, los tipos de materiales involucrados y los procesos naturales tanto antiguos como activos que hacen parte del proceso de transformación y modelamiento de cada una de las geoformas.

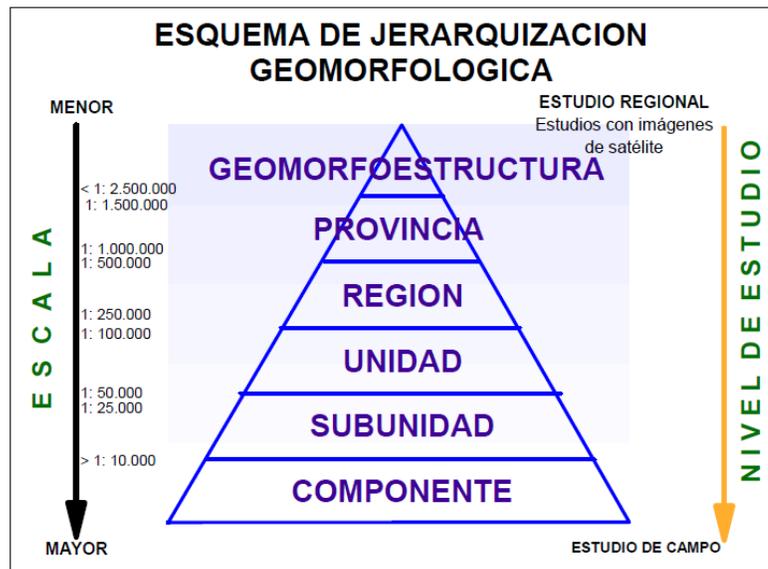
Para tal efecto se siguen los lineamientos generales establecidos en la metodología (Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SCG 2012) Cada elemento cartográfico está representado, por símbolos; convenciones y colores usados en estándares de uso internacional ESTÁNDARES DE CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA APLICADA A MOVIMIENTOS EN MASA (Luis Antonio Barrera Parrales Ing. Catastral y Geodes).<sup>10</sup>

En la elaboración de este trabajo, se siguen los lineamientos de jerarquización propuestos por Carvajal (2008), quien plantea enfocar el análisis geomorfológico de un sitio o lugar, siguiendo un proceso analítico del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local. En donde, se relaciona la escala aplicada. Aplicando esta propuesta metodológica del Servicio Geológico Colombiano 2012, se realizaron las siguientes etapas para llegar a la realización del mapa geomorfológico para la zonificación de susceptibilidad y amenaza de la zona de estudio

---

<sup>10</sup> Servicio Geológico Colombiano. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

Figura 12: Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta para INGEOMINAS.



Fuente: Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

El estudio en el municipio de Santa María se desarrolló en una escala 1:10.000, donde se aplicó la jerarquización geomorfológica, ya que la escala que se manejó corresponde a componentes geomorfológicos los cuales se definen como el nivel mayor detalle, teniendo en cuenta que no hay una metodología o glosario geomorfológico a escalas menores a 1:25.000; esta se desarrolló en el esquema jerárquico en unidad, ya que es la única metodología existente en la actualidad, donde se aplicaron rasgos del relieve (escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle, determinados por los diferentes atributos que se pueden generar por la morfometría, morfodinámica detallada relacionados con las diferentes características litológica involucradas en la zona de estudio(Anexo C)<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Servicio Geológico Colombiano. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

## 5.2 AMBIENTE MORFOGENETICOS

Las unidades geomorfológicas identificadas en un área específica se determinan en base en la expresión e interpretación de los procesos geomorfológicos que interactuaron en el terreno, los cuales generaron la Formación, evolución y modificación de las actuales formas del terreno, además dichas unidades se encuentran contenidas dentro de diferentes ambientes morfogenéticos; se conoce como ambiente morfogenético a la agrupación de condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas, bajo las cuales se generan las geoformas. Estos ambientes morfogenéticos se agrupan así:

**Ambiente morfoestructural:** hace referencia a geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, principalmente asociado a fallas y pliegues, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes<sup>12</sup>

**Ambiente Denudacional:** definido exclusivamente por los procesos exógenos degradacionales y está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de lluvia-escorrentía, meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos.

**Ambiente Fluvial:** geoformas originadas por el efecto erosivo y acumulativo de las corrientes de los ríos y la sedimentación de materiales en cuencas restringidas respectivamente.

**Antropogénico y/o Biológico:** geoformas generadas por la alteración significativa de la superficie terrestre la cual es producto de la acción del hombre.

De igual forma la propuesta metodológica incluye la valoración del relieve a partir de los atributos morfológicos y morfométricos estandarizados relacionados con:

### 5.2.1Inclinación

Es el ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal. La inclinación de la ladera está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la Formación de movimientos en masa (Tabla 13).

---

<sup>12</sup> Servicio Geológico Colombiano. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. Febrero de 2012.

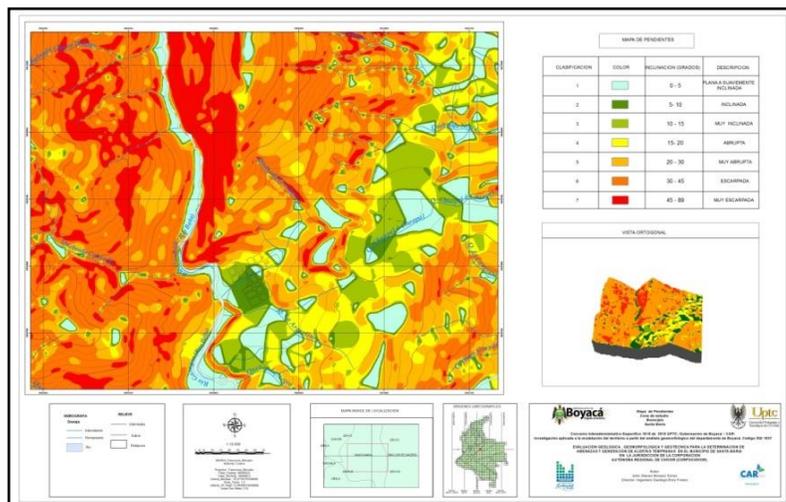
Tabla 10: Rangos de inclinación de la ladera

INCLINACIÓN (Grados)	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL Y COMPORTAMIENTO
< 5	Plana a suavemente inclinada.	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a movimientos en masa (MM).
6 – 10	Inclinada.	Blanda y baja MM.
11 – 15	Muy Inclinada.	Moderadamente Blanda y Moderada susceptibilidad a MM.
16 – 20	Abrupta.	Moderadamente Resistente y Moderada susceptibilidad a MM.
21 – 30	Muy abrupta.	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.
31 - 45	Escarpada.	Muy Resistente y Alta susceptibilidad a MM.
> 45	Muy Escarpada	Extremadamente Resistente, baja susceptibilidad a MM.

**Fuente:** Propuesta Metodológica Sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos (SGC 2012).

Para el área de estudio se realizó el mapa de pendiente como se muestra en la (figura 13), a partir de la base topográfica de detalle de la zona de estudio del municipio de Santa María y con la plancha topográfica 229-I-D , 229-II-C , 229-III-B , 229-IV-A a escala 1: 25.000 IGAC. Este se usa como un insumo para la realización del mapa geomorfológico.

Figura 13: Mapa de pendientes

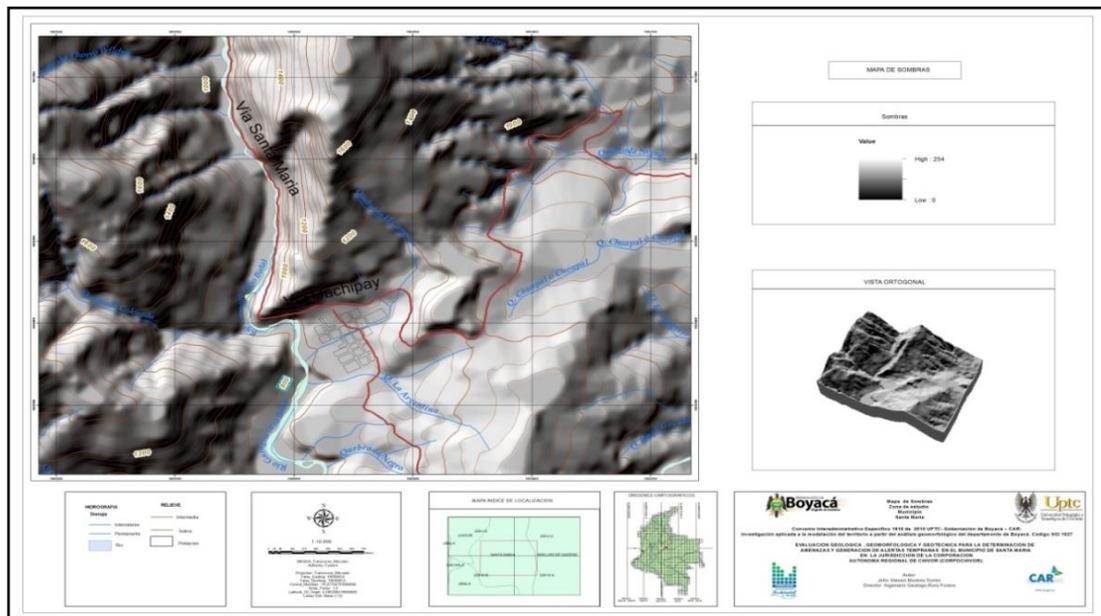


Fuente: Estudio

### 5.2.2 Sombreado artificial del terreno.

El sombreado artificial del terreno sirve para realzar los rasgos más relevantes del cambio de la forma del terreno. Para realizar este mapa se utiliza la topografía de detalle del relleno y la plancha topográfica 229-I-D, 229-II-C, 229-III-B, 229-IV-A a escala 1: 25.000 IGAC, con lo cual se genera un modelo digital de elevación DEM. Este mapa junto al mapa de pendientes son insumos para poder realizar el mapa geomorfológico (Figura 14).

Figura 14: Mapa de sombras realizado a partir de (DEM)



Fuente: Estudio

## 5.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

En el área de estudio se lograron identificar 4 ambientes morfogenéticos con sus respectivas unidades geomorfológicas, estos ambientes son Denudacional, Estructural, Antrópico y Fluvial, según su orden de importancia. Cada uno de estos ambientes está condicionado por un proceso de formación y de esto depende el grado de susceptibilidad a presentar procesos de inestabilidad.

A continuación se da una descripción de cada una de las unidades geomorfológicas dependiendo al ambiente morfogenético.

### 5.3.1 GEOFORMAS DE ORIGEN ESTRUCTURAL

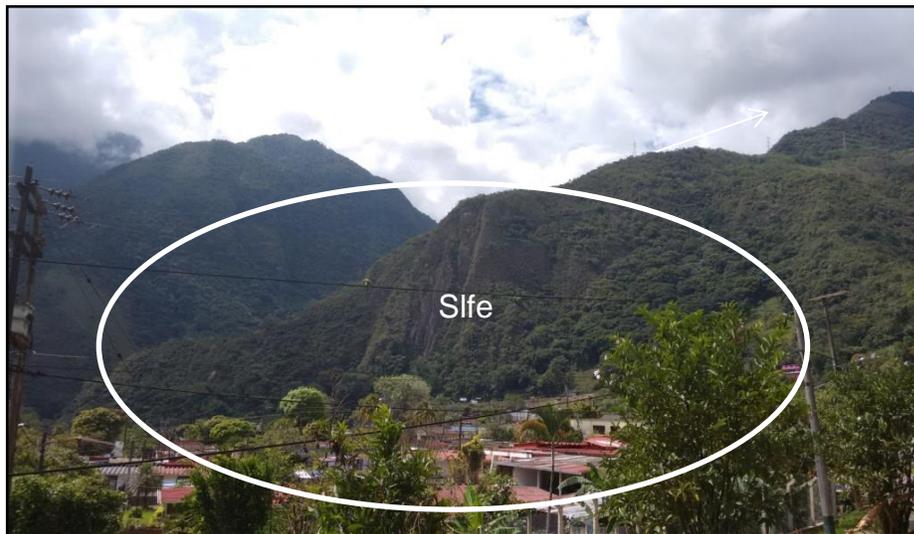
La Geomorfología estructural analiza el relieve teniendo en cuenta el tipo de rocas que forman el terreno (litología) y la estructura o disposición de dichas rocas, las

cuales pueden influir en el paisaje final. En ocasiones el relieve se ha ido desarrollando en la misma medida por varios grupos de factores, como la alternancia de estratos duros y blandos y su buzamiento que producen efectos diferentes en el relieve, los pliegues que proporcionan un relieve original condicionando el modelado a partir del tectonismo y la acción de las fallas de Santa María, Lengupa, Colorado presentes en el área. La modelación de este tipo de unidades geomorfológicas se presenta principalmente sobre rocas de la formación Bata y Caliza de Gavio.

#### **5.3.1.1 Escarpe de línea de falla (Slfe)**

Esta unidad geomorfológica se localiza en la parte norte de la cabecera municipal a asociado a rocas sedimentarias de la formación Calizas del Guavio (kicg) compuesta principalmente por calizas grises claras con intercalación de lutita. Escarpe cuya ladera es corta a muy corta, de pendiente abrupta, cóncavo o convexo, originado por erosión acentuada a lo largo de una línea de la falla Colorado, por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas. (Fotografía 10)

Fotografía 10: Escarpe de línea de falla con una inclinación de los estratos más de  $70^\circ$  de la formación Calizas del Guavio (N: 1.029.579, E: 1.090.209, Z: 810m.s.n.m).

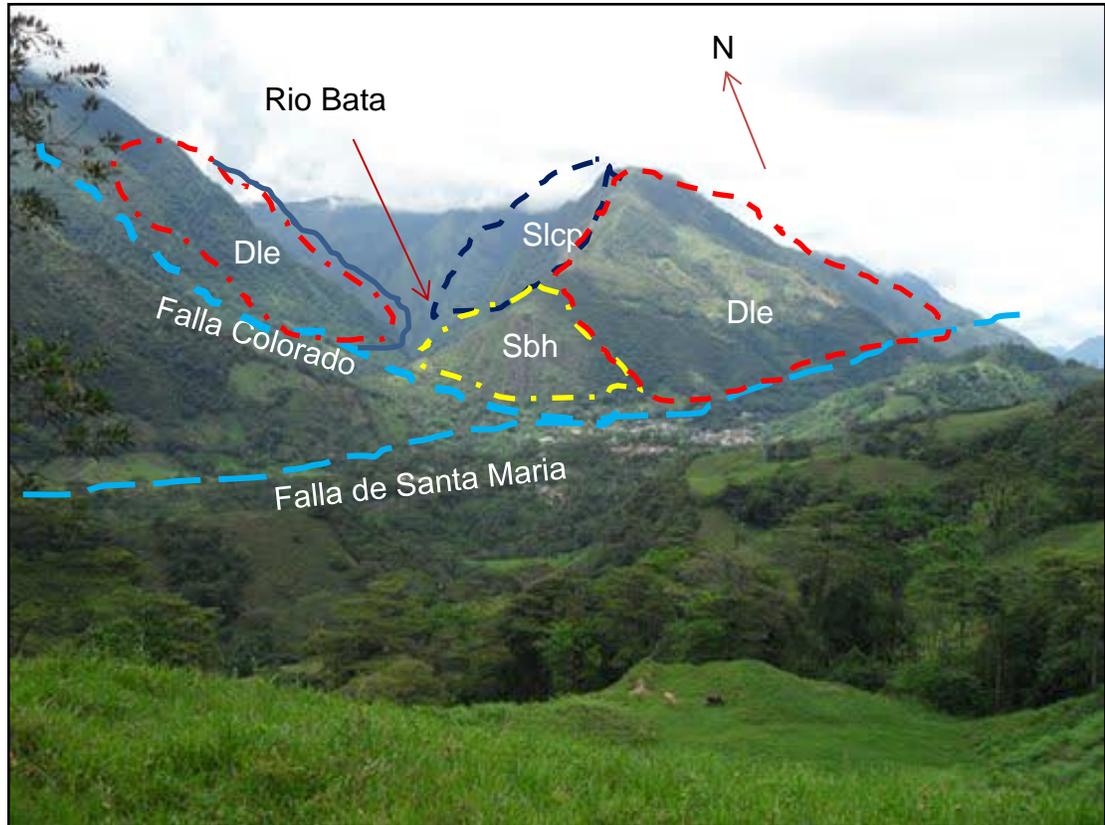


Fuente: Estudio

#### **5.3.3 Ladera de contrapendiente (Slcp):**

Esta unidad geomorfológica se localiza al noroeste la cabecera municipal asociada a las rocas sedimentarias de la formación Bata (Jb) compuesta principalmente por conglomerados, arenisca, lutita. La unidad se caracteriza por que los estratos están en sentido contrario a la inclinación del terreno (figura 11).

Fotografía 11: Se observa al fondo la cabecera municipal de Santa María y unidades geomorfológicas como ladera de contrapendiente, barrera homoclinal, laderas erosivas, cauce aluvial y el cañón del río Bata N1027810; E10908553



Fuente: Estudio

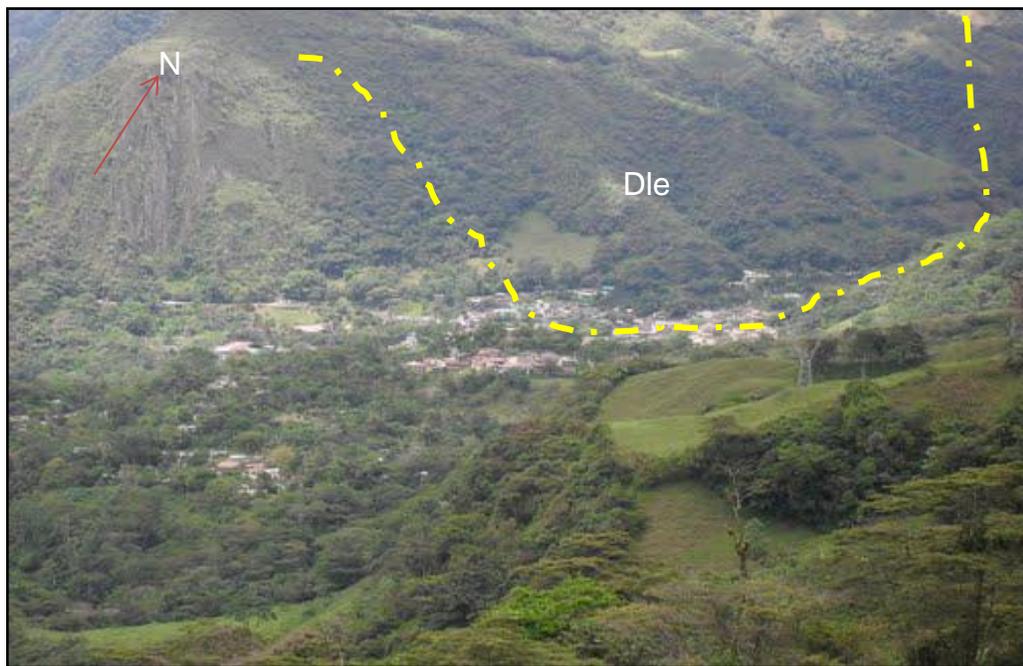
#### 5.4.1 GEOFORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL

El origen de las unidades geomorfológicas de tipo denudacional está relacionado con la interacción de los procesos morfogenéticos como la erosión, el transporte y la sedimentación, que se ven favorecidos por la meteorización, alteración y disgregación previa de las rocas por agentes como gotas de lluvia, la fuerza de arrastre del agua de escorrentía en vertientes o en los canales de la red de drenaje, la energía de transporte varía de unos sistemas a otros, y de las condiciones morfoclimáticas, la acumulación de los materiales transportados también contribuye a la modelación de este tipo de unidades, las cuales se han desarrollado en áreas asociadas a depósitos coluviales

### 5.4.2 Ladera erosiva

Esta unidad geomorfológica se localizó en la mayor parte de la zona de estudio se encuentra asociada a la formación Bata, Lutitas de Macanal en laderas alargadas de formas plana y está asociada a un patrón de drenaje dendrítico, ya que es asociada a procesos erosivos intensos como surcos cárcavas en algunos casos se evidencia de desprendimiento de masas, flujo de avenidas torrenciales (Fotografía 12) .

Fotografía 12: Se observa al fondo la cabecera municipal de Santa María y unidades geomorfológicas, laderas erosivas. (N: 1030184, E: 1.090766, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

### 5.4.3 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft)

Esta unida geomorfológica se localiza al noroeste de la cabecera municipal y se evidencia a la margen derecha de la vía que conduce del municipio de Santa María a Garagoa se encuentra asociado a depósitos coluviales compuesto principalmente por bloques angulares a subangulares, gravas y arenas embebidos en una matriz arcillosa, su estructura es de forma de lóbulo o abanico de morfología alomada de longitud muy larga y está relacionada con avalanchas torrenciales. (Figura 13).

Fotografía 13: Se puede evidenciar los conos de deslizamiento indiferenciado **a.** en la margen derecha de la vía que conduce del municipal de Santa María a Garagoa en algunas ocasiones ha taponado la vía, **b.** se encuentra a la margen derecha del río Bata con posible taponamiento y represamiento del río. (N: 1031700, E: 1.089.599, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Autor

#### 5.4.4 Colina remanente (Dcre)

Esta unidad geomorfológica se localiza al NE de la cabecera municipal se encuentra asociada en la formación Lutitas de Macanal esta unidad se caracteriza por un topografía suavemente inclinada aislada con una altura de 200 a 400 m se presenta una cima redonda y laderas cortas ya que está asociada a procesos erosivos intensos hacia los la dos se encuentra la quebrada La Argentina y Caño Cangrejo (Fotografía14).

Fotografía 14: Colina remanente (N: 1.029.604, E: 1.091115, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Estudio

#### 5.4.5 Escarpe de erosión menor (Deeme)

Esta unidad se encuentra a la margen derecha del río Bata asociado la formación Bata que está compuesta por bloques, gravas y arenas, esta unidad se caracteriza por principalmente por tener una ladera corta, con pendiente escarpada que ha sido originada por la socavación de río Bata y el drenaje intermitente que se evidencia en la (fotografía 15).

Fotografía 15: Escarpe de erosión menor, margen derecha del Río Bata(N: 1.030361, E: 1.089.368, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Autor

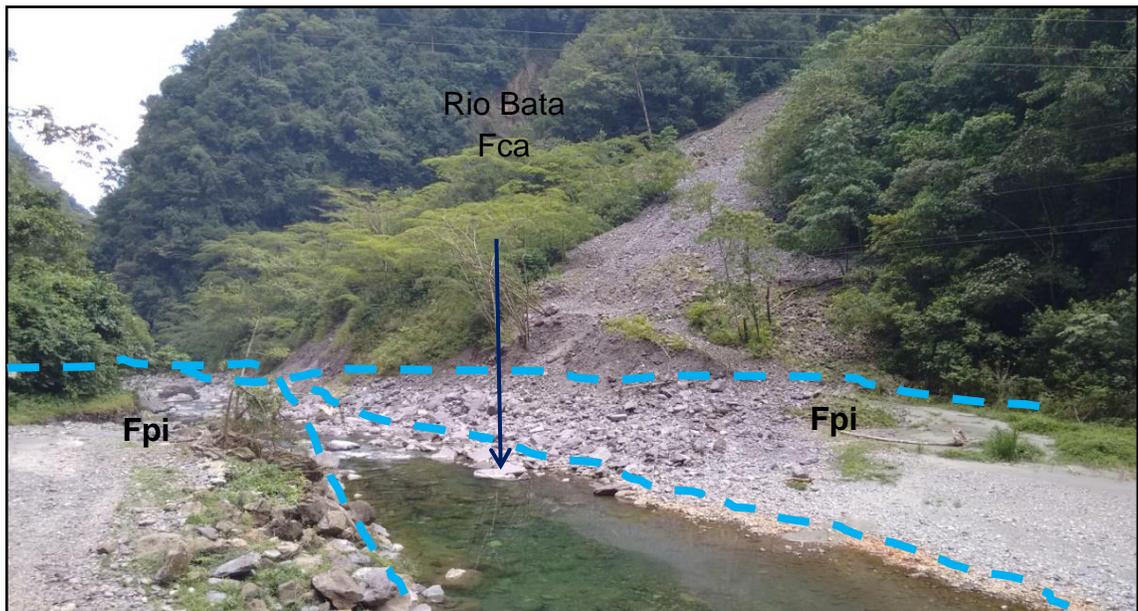
## 5.5 GEOFORMAS DE ORIGEN FLUVIAL

El agua es el agente más importante en la erosión, transporte y depósito de sedimentos. Los relieves modelados por la acción de las corrientes de agua se denominan relieves fluviales, para distinguirlos de los originados por los otros agentes modeladores (hielo, olas, viento). En el momento actual, los relieves y procesos fluviales son los elementos dominantes en las superficies continentales. La erosión originada por la corriente es la progresiva remoción del material mineral del fondo y las orillas del cauce, ya sea excavado éste en material de alteración, sedimento, o en la roca madre. El transporte consiste en el movimiento de las partículas erosionadas mediante su arrastre por el fondo, suspensión en la masa de agua o disolución.

### 5.5.1 Cauce aluvial (Fca):

Esta unidad geomorfológica se localiza a lo largo del Rio Bata, asociado a materiales de los Depósitos Aluviales (Qal) constituidos por gravas, arenas y lodo, la unidad se presenta a veces dentro de macizos rocosos o dentro de sedimentos aluviales y que dependiendo de factores como la pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Cuando la corriente fluye en macizos rocosos se da un proceso básico de erosión, entallando dicho macizo y moviéndose lateralmente dentro de rocas menos resistentes. En presencia de rocas más resistentes, el curso es muy irregular con la presencia de saltos producto del cambio de resistencia en la roca (Fotografía 16).

Fotografía 16 : Rio Bata y Llanura de inundación(N: 1.031926, E: 1.089.271, Z: 810m.s.n.m).



Fuente: Autor

### **5.5.2 Plano o llanura de inundación (Fpi):**

Esta unidad geomorfológica se localiza en aquellas áreas inundables que bordean al río Bata tanto en la margen izquierda como derecha, se encuentra asociada a depósitos cuaternarios coluviones compuestos principalmente por bolos, gravas y arenas de materiales transportados de las partes altas. Esta unidad geomorfológica se caracteriza por ser una franja de terreno plana baja de morfología ondulada, que representa áreas eventualmente inundables, con pendientes planas a suavemente inclinadas con rangos que oscilan entre los 0 y 5°; desarrollan una superficie plana a ondulada y asociada a eventos de tipo torrencial. La génesis es producto de la sedimentación durante eventos torrenciales e inundación fluvial (Fotografía16).

## 6. ZONIFICACION DE LA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para la generación de mapas temáticos descriptivos de las condiciones de susceptibilidad a la generación de movimientos en masa se ha establecido la ejecución de una serie de actividades encaminadas a la recopilación ajuste y procesamiento de información de tal manera que se logre evaluar de forma precisa, cada una de las coberturas conceptuales de hidrometeorología, geología, suelos, erosión, pendientes, conflictos de uso y geomorfología<sup>13</sup>.

Las actividades que se desarrollaron para el procesamiento de esta información, comprendió actividades referentes a fotointerpretación, captura de datos en campo, construcción de modelos digitales de elevación y modelación a partir de cálculos probabilísticos para periodos de retorno. Los datos y registros básicos de análisis se procesaron mediante análisis geoestadístico donde los resultados de la correlación se plasmaron en los mapas representativos de factores detonantes dentro de la generación de fenómenos de remoción en masa (deslizamiento, derrumbes, flujo de lodos, desprendimiento de rocas).

Para el desarrollo de la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa se utilizó el Documento metodológico que propone el servicio geológico colombiano (SGC) de la zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 Agosto 2013, al cual fue necesario realizar un ajuste a donde se especifican los insumos básicos y procesos necesarios para la escala de trabajo 1:10.000 ya que esta escala permite la toma de decisiones sobre prevención y manejo en la zona de estudio (Tabla 11).

### 6.1 METODO HEURISTICO

Los métodos heurísticos se basan en el estudio conceptual de los procesos de ocurrencia de los deslizamientos, requiere categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa de la región estudiada. Son métodos conocidos como indirectos, los resultados de los cuales se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa con una combinación de factores similar (Figura 15).<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol. 2. Bogotá. Agosto de 2013.

Tabla 11: Relación entre Métodos, Niveles y Tipos de Zonificación de acuerdo con la escala y el propósito del proyecto.

Escala	Rango indicativo de las escalas	Métodos de Zonificación			Niveles de Zonificación			Tipos de Zonificación		Propósito
		Básico	Intermedio	Avanzado	Preliminar	Intermedio	Avanzado	Susceptibilidad	Amenaza	
Detallada	>1:5.000	(*)	(*)	*	(*)	(*)	*	(*)	*	Zonificación Regional Información Asesoramiento Planificación Diseño

Notas: \*Aplicable, (\*) Se puede aplicar, ( ) No se recomienda o no de uso común

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

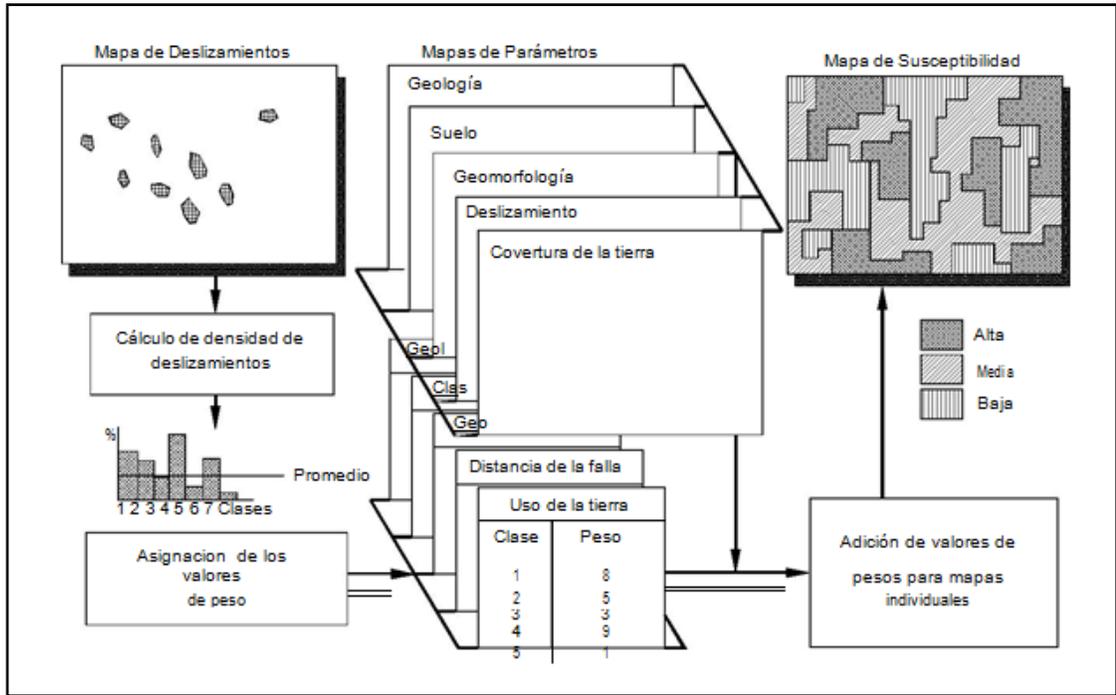
### 6.1.1 MÉTODO DE PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)

Consiste en un método semicualitativo el cual determina las variables que intervienen y la influencia de cada una de estas, para así determinar un valor de calificación, así generar mapas de combinación cuantitativa para finalmente determinar la susceptibilidad de un área determinada a la ocurrencia de los diferentes tipos de movimientos en masa<sup>14</sup>.

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. Este método aplicado a la zonificación de amenazas tiene diferentes niveles de clasificación llevados a mapas de igual escala, para así poder superponer estos valores para realizar la respectiva interpretación de las variables en conjunto (Figura 16)<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol. 2. Bogotá. Agosto de 2013.

Figura 15: Modelo Heurístico Analítico para susceptibilidad por Movimientos en Masa utilizando (SIG)



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

Figura 16: Modelo jerárquico Analítico para susceptibilidad por Movimientos en Masa



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2012).

## 6.2 MAPAS E INSUMOS TEMATICOS

### 6.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El análisis de la información morfométrica se realizó con base en la topografía detallada del área, la cual cuenta con curvas de nivel en intervalos altimétricos de 25 metros con las cuales se generó mediante el SIG ArcGIS el Modelo Digital De Elevación. La precisión de los resultados de un análisis de susceptibilidad depende de la precisión del MED. En el estudio se utilizó resoluciones de pixeles cuadrados de 8 metros.

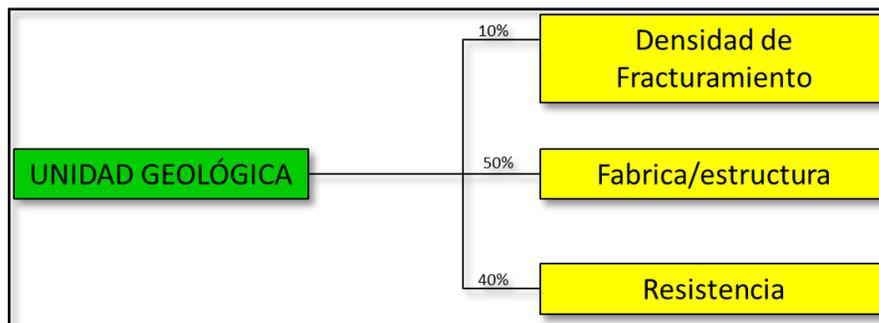
Los modelos digitales de elevación pueden construirse a partir de mapas topográficos, de orto-fotos mapas o por restitución de fotografías aéreas o imágenes. Para la escala de detalle 1:10.000.

## 6.3 INSUMOS TEMATICOS

### 6.3.1 Geología

La cartografía geológica se realizó a escala 1:10000 del área de estudio, descrito en el Capítulo 3. Se identificaron las estructuras, fallamientos, descripción litológica de las unidades presentes en el área y se localiza las áreas cubiertas por depósito coluvial las cuales son generalmente de susceptibilidad alta.

Figura 17: Esquema de clasificación de las unidades geológicas.



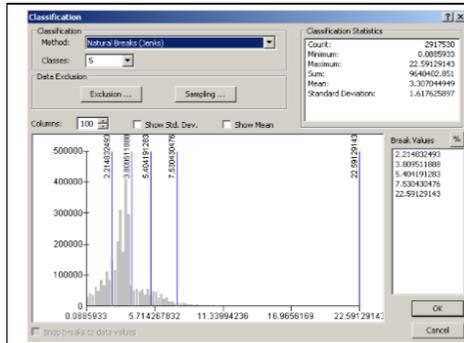
Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

#### 6.3.1.1 Densidad de Fracturamiento

Dependiendo el tipo de las fallas encontradas en el área de estudio, utilizando el algoritmo Line Density (ArcGIS 10.2), este método calcula la densidad de línea en la vecindad de cada pixel definida por un radio de búsqueda, para esto a partir de cada centro se dibuja un círculo de radio R, se toma la longitud de la línea de falla

que cae dentro de este círculo y se multiplica por el peso de la actividad, la suma total se divide entre el área del círculo.

Tabla 12: Rangos de Line Density y Calificación para Zonificación de Susceptibilidad.



Para esta clasificación se excluyó el valor 0 densidad. Se clasifico en 5 rangos siendo:

- 1 el valor de Muy Baja densidad,
- 2 el valor Baja Densidad,
- 3 el valor Media Densidad,
- 4 el valor Alta Densidad y
- 5 el valor de Muy alta densidad.

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

### 6.3.1.2 Fabrica y/o Estructura

Teniendo en cuenta este parámetro de hace referencia a la microscopía óptica conociendo el empaquetamiento de la roca, La fábrica tiene gran influencia en el comportamiento de los suelos y rocas, en especial en lo referente a la anisotropía que se genera debido a la orientación de las partículas, la cual así mismo gobierna anisotropía en las propiedades geomecánicas, la clasificación de las rocas según su fábrica/estructura, puede servir para establecer diferencias de las rocas de las propiedades mecánicas.

Tabla 13: Textura/Fabrica de las rocas

Textura/Fabrica	Características
<b>Clásticas Cementadas</b>	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: Areniscas, Conglomerados.
<b>Clásticas Consolidadas</b>	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenetica. Ejemplos: Arcillolitas, Lodolitas, Shales.

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

Teniendo en cuenta la (tabla 13), y teniendo en cuenta las características de las diferentes unidades encontradas en el cual se la da una calificación (Tabla 14) dada por el servicio geológico colombiano.

Tabla 14: Calificación propuesta para Fabrica/Estructura

Atributo	Propuesta de Calificación
Clásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC 2013).

La clasificación de las diferentes unidades encontradas (Tabla 15) en la zona de estudio, donde hay diferente de tipos de arenisca, arcillas, conglomeratica las cuales se clasificaron(Tabla14) como clásticas consolidadas, y formaciones arenosas las cuales son rocas cementadas, los depósitos de tipo coluvial y aluvial, al ser un matriz no consolidado, se encuentran en una matriz limo-arcillosa, por lo cual se clasificaron dentro de materiales cementados.

Tabla 15: Clasificación Fabrica/Estructura de las unidades geológicas de la zona de estudio.

Formación	Convención	Atributo	Propuesta de Calificación
Grupo Farallones	Dcf	Clástica Consolidada	4
Formación Bata	Jb	Clástica Cementada	3
Calizas de Guavio	Kicg	Clástica Consolidada	4
Lutitas de Macanal	Kilm	Clástica Consolidada	3
Arenisca de las juntas	Kiaj	Clástica Consolidada	4
Cuaternario Coluvial	Qc	Clástica Cementada	3
Cuaternario Aluvial	Qal	Clástica Cementada	3

Fuente: El estudio.

### 6.3.1.3 Resistencia

A cada unidad geológica se le asignan unos parámetros de resistencia de acuerdo con los resultados de laboratorio (tabla 16). Esto se realiza recopilando los datos tomados en campo y se clasifica para la realización de la calificación, se adoptan las tablas propuestas por Hoke 1996, para la mayoría de unidades geológicas presentes, entro de una zona de área de un cuadrángulo especificado.

Los valores de resistencia al cortante se obtienen principalmente, de los estudios geotécnicos realizados anteriormente. Si un área posee capas de diferentes materiales, se compila la información, por separado, para cada capa. Cada capa es clasificada como una unidad diferente. Los grupos de resistencia se clasifican sobre la base del promedio del ángulo de fricción interna y su carácter litológico para la descripción de unidades de tipo cuaternario, tanto aluvial como coluvial, se tuvo en cuenta la clasificación de cuaternarios descrita por el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, donde se especifica el rango de calificación dependiendo del tipo de depósito y las geoformas asociadas a estas .

Tabla 16: Calificación de resistencia geológica de depósitos.

Ambiente	Deposito	Geoformas Asociada	Calificación
Denudacional	Depósitos Coluviales	Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión y Conos de Deyección, Glacis de Acumulación	5
	Depósitos de Detritos	Cono o Lóbulo de deslizamiento Translacional de detritos, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de detritos	4
	Depósitos de Tierras	Cono o lóbulo de deslizamiento Translacional de tierras, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de tierras	5
	Depósitos de Terraza Sobre Elevada	Terraza sobrelevada o colgada	4
	Depósitos Costras Ferruginosas o Calcáreas	Planos aterrazados o duricostras, Terrazas o mesas calcretas o silicretas	1
	Depósitos de Lodos	Cono o lóbulo de flujo de lodo	5
Fluvial y Lagunar	Depósitos de Cauce y Llanura Aluvial	Cauce activo y abandonado, Albardones, barras, cuencas de decantación, lagos en media luna, lagunas naturales, meandros abandonados, planicie o llanura de inundación, planicies o deltas lacustrinos, planos anegadizos, planos y artesas lagunares	1

Ambiente	Deposito	Geoformas Asociada	Calificación
	Depósitos de Terraza Aluvial	Terrazas de erosión, terrazas de acumulación subreciente, terrazas de acumulación antigua, terrazas de depositación y escarpes de terraza	2
	Depósitos Paudales	artesas lagunares y planos anegadizos	1
	Depósitos Lagunares	lagos en media luna y meandros abandonados	1
	Depósitos de Abanicos Aluviales	Abanicos fluviotorrenciales, conos de deyección, deltas de desborde natural, deltas lacustrinos y escarpes de abanicos fluviales	3
<b>Marino</b>	Depósitos Marino Aluviales	Llanuras costeras	2

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Tabla 17: Calificación de resistencia de las unidades del área de estudio.

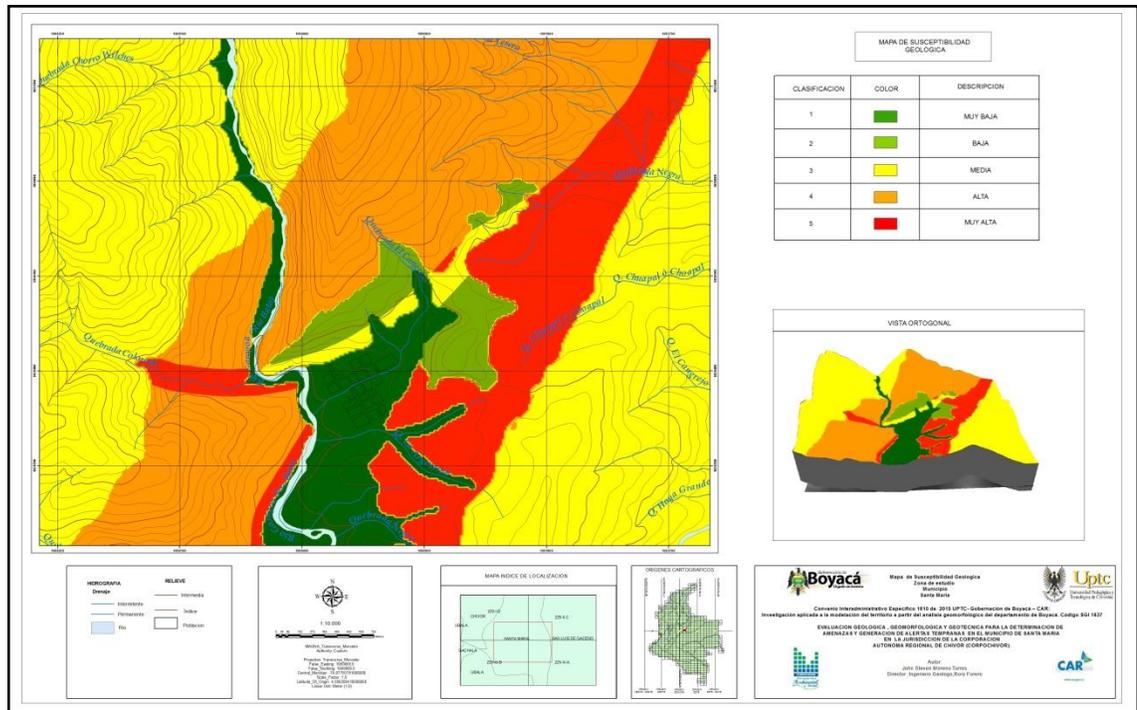
Formación	Convención	Resistencia	Grado	Calificación Resistencia
Grupo Farallones	Dcf	Muy Dura	R5	1
Formación Bata	Jb	Moderadamente Dura	R3	3
Calizas de Guavio	Kicg	Muy Dura	R5	1
Lutitas de Macanal	Kilm	Moderadamente Dura	R3	3
Arenisca de las juntas	Kiaj	Moderadamente Dura	R3	3
Cuaternario Coluvial	Qc	Muy Blanda	R1	1
Cuaternaria Aluvial	Qal	Muy Blanda	-	1

Fuente: El estudio.

#### 6.3.1.4 Susceptibilidad geológica

Teniendo en cuenta los diferentes factores que se aplican para el desarrollo a de la metodología, mediante un proceso matemático utilizando la herramienta Map Algebra -Raster Calculation -SIG ArcGIS 10.2, en el cual consiste en sumar los mapas de  $((\text{Densidad de Fractura miento} \times 0.10) + (\text{Fabrica /Estructura} \times 0.50) + (\text{Resistencia} \times 0.40) = (\text{Geología}))$  el resultado de la operación matemático es la susceptibilidad por geología donde sur rangos están entre 1 a 5(Figura18).

Figura 18: Mapa susceptibilidad geológico de movimientos en masa.



Fuente: El estudio

### 6.3.2 Geomorfología

Asumiendo la metodología geomorfológico para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa se realizó el levantamiento de la cartografía geomorfológica 1:10.000 para la zona de estudio (Ver Capítulo 6), la cual utilizo para la generación de los siguientes atributos:

La geomorfología se compone de 3 atributos los cuales son:

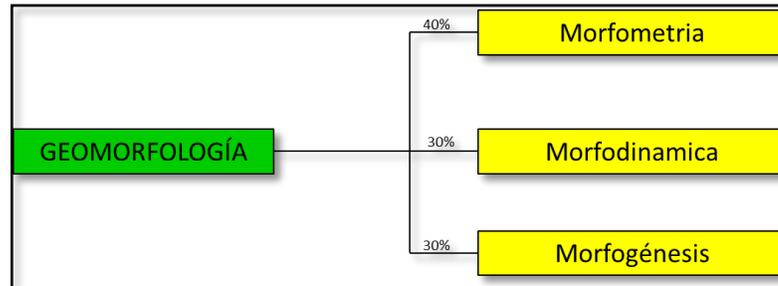
**Morfometría:** trata de los aspectos cuantitativos de las geoformas, Medida, dimensiones y valores de Pendientes, Rugosidad y Acuencia.

**Morfogénesis:** Estudia el origen y la evolución de las formas del terreno (Mapa Geomorfológico) (Anexo C).

**Morfodinámica:** se refiere a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre que modifica las geoformas preexistentes, hace referencia a los cambios físicos y

químicos que generan modificaciones a los materiales y a las formas superficiales de la tierra (gradación =degradación y agradación de los materiales(ANEXO D) .

Figuras 1: Porcentajes de parámetros geomorfológicos para el cálculo de susceptibilidad por movimientos en masa.

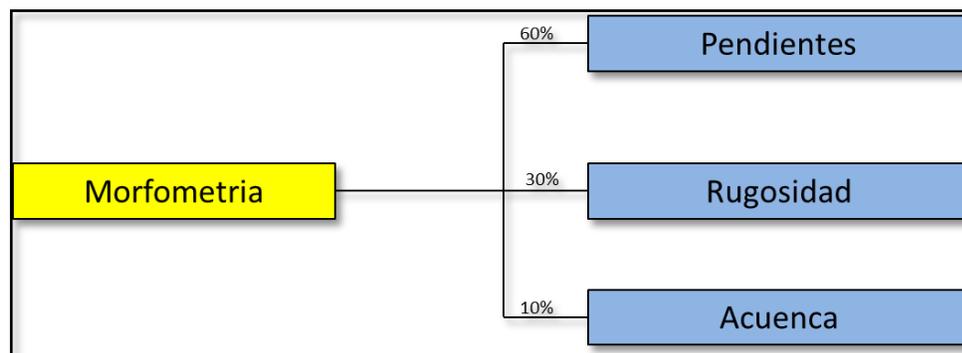


Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 6.3.2.1 Morfometría

Trata de los aspectos cuantitativos de las geoformas, Medida, dimensiones y valores de Pendientes, Rugosidad y Acuenca. Teniendo en cuenta estos parámetros morfométricos se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) generado para la zona de estudio.

Figuras 2: Porcentajes de los parámetros que componen la morfometría.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

#### 7.3.2.1.1 Pendientes

El objetivo es generar una planta topográfica del área a estudiar, delimitando las áreas de pendiente diferente, en los sectores o fajas de valores previamente establecidos para ello se tuvo en cuenta los intervalos de cada pendiente y sus

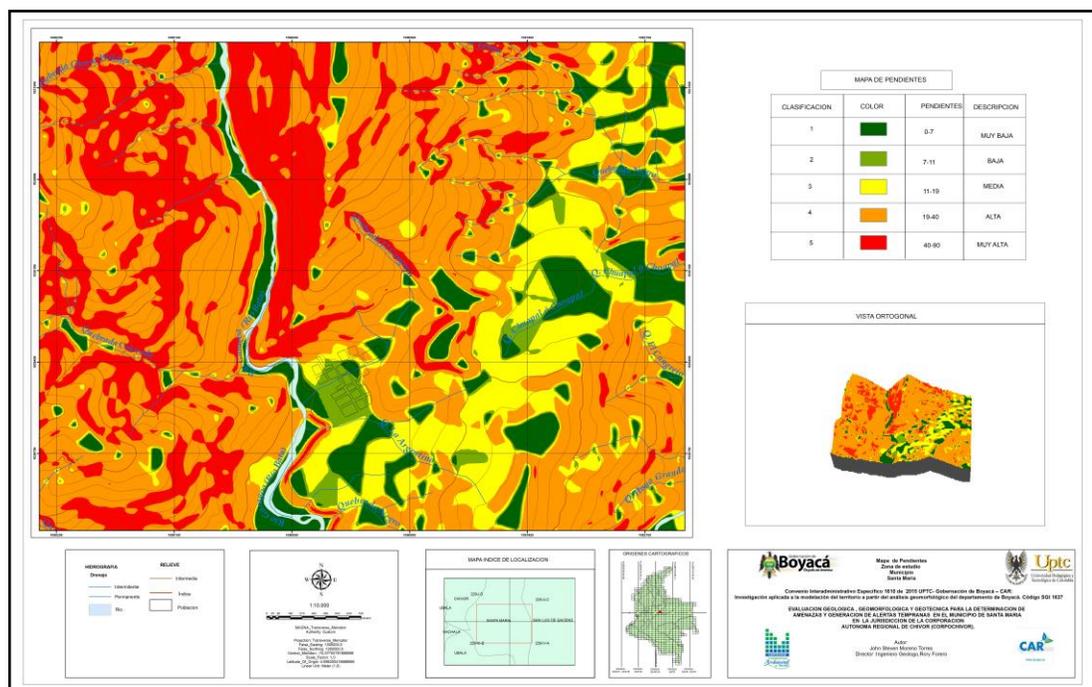
diferentes rangos, basados en la calificación de la susceptibilidad asignada a cada ángulo existente ente la superficie del terreno y si horizontal (Figura 19).

Tabla 22: Clasificación de susceptibilidad de las pendientes.

CALIFICACION	RANGO	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD	CALIFICACION
	0-7°	PLANA O SUAVEMENTE	MUY BAJA	1
	7-11°	INCLINADA	BAJA	2
	11-19°	MUY INCLINADA	MEDIA	3
	19-40°	ABRUPTA	ALTA	4
	40-90°	ESCARPADA	MUY ALTA	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SCG.

Figura 19: Mapa de pendientes para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.



Fuente: El estudio

### 7.3.2.1.2 Rugosidad

El mapa de rugosidad se define como la variación de la pendiente representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda, las formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas. Se relaciona

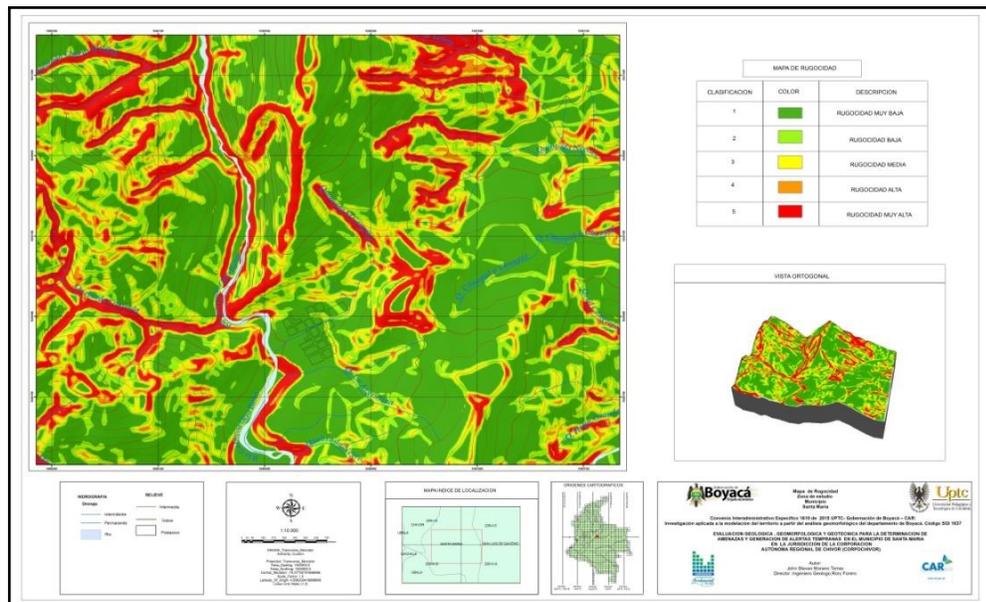
con los movimientos en masa de manera que las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar movimientos en masa debido a que los cambios sucesivos de pendientes favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y por ende, aumenta la inestabilidad del mismo El parámetro rugosidad se clasifico de acuerdo con propuesto en el documento metodológico (Ver tabla 18), con base en el Modelo Digital de Elevación utilizado en el estudio Figuras 20.<sup>15</sup>

Tabla 18: Rangos de clasificación y calificación de susceptibilidad del parámetro rugosidad.

CONVENCION	RANGO	CALIFICACION	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD
	0,2830-0,985	5	RUGOSIDAD MUY ALTA	MUY BAJA
	0,985-0,99	4	RUGOSIDAD ALTA	BAJA
	0,99-0,995	3	RUGOSIDAD MEDIA	MEDIA
	0,995-0,9975	2	RUGOSIDAD BAJA	ALTA
	0,9975-1	1	RUGOSIDAD MUY BAJA	MUY ALTA

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Figura 20: Mapa de Rugosidad de la zona de estudio



Fuente: El estudio.

<sup>15</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

### 6.3.2.1.3 Acuenca

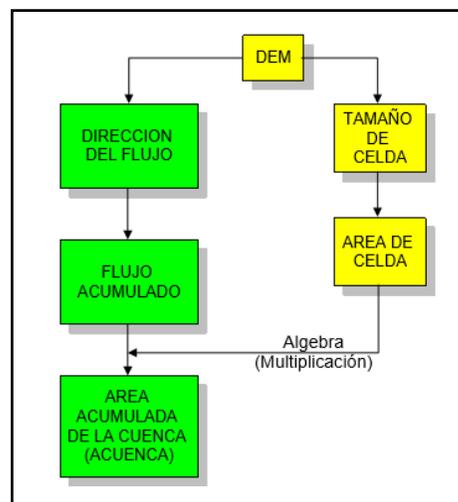
El mapa acuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en un terreno, a mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de desarrollar inestabilidad en la variable que se deriva del Modelo Digital de Elevación DEM (Figura 22).<sup>16</sup>

Para el desarrollo de este parámetro se tiene en cuenta:

Flow Direction: consiste en determina la dirección de máxima pendiente hacia debajo de cada celda para el cual se tiene en cuenta la herramienta Flow Direction de SIG Argis10.2.

Flow Acumulación: consiste en el cálculo de flujos acumulados, cantidad de agua de lluvia que puede fluir por cada celda dada asumiendo que todas las lluvias se convierte en escurrimiento superficial y que no existe infiltración, evaporación, u otras perdidas, las zonas más ocurrentes representan los lugares donde hay mayor flujo de agua, lo cual coinciden con los ríos y quebradas para ello se tiene que tener en cuenta la herramienta Flow Accumulation de SIG Argis10.2.( Figura 21)

Figura 21: Diagrama de flujo de generación del parámetro Acuenca.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

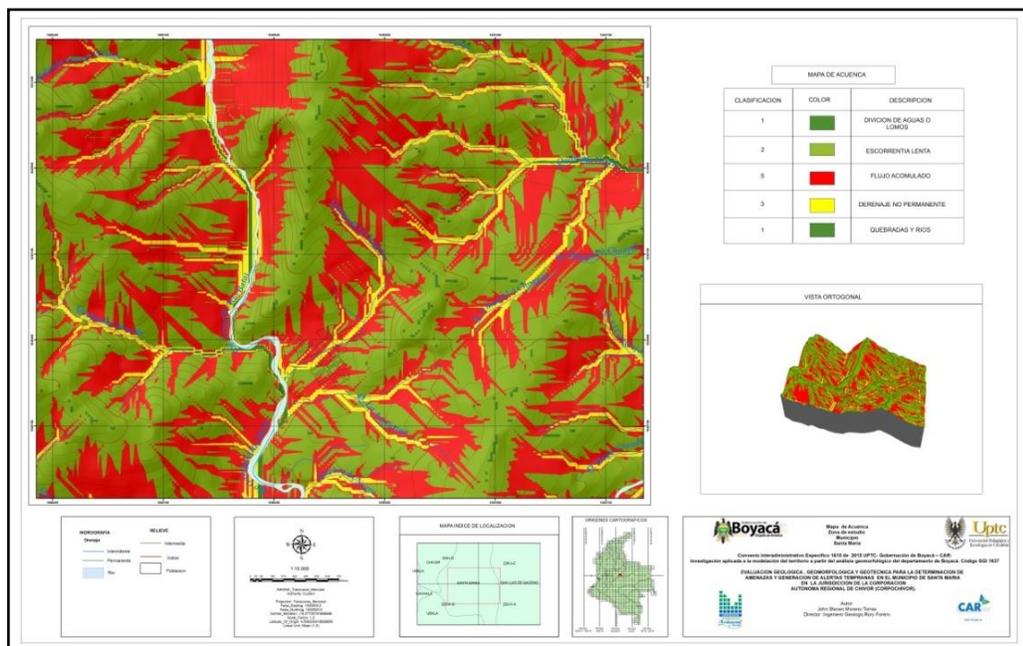
<sup>16</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 19: Rangos de clasificación del atributo Acuencia.

CONVENCION	RANGO	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD	CALIFICACION
	0	Divisoria de Aguas o Lomos	MUY BAJA	1
	0 - 3.500	Escorrentía Lenta	BAJA	2
	3.500 - 40.000	Flujo Acumulado	MEDIA	5
	40.000 - 1'000.000	Drenaje no permanente	ALTA	3
	1'000.000 - 1'223.633,280	Quebradas, Ríos	MUY ALTA	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

Figura 22: Mapa del atributo Acuencia de la zona de estudio.

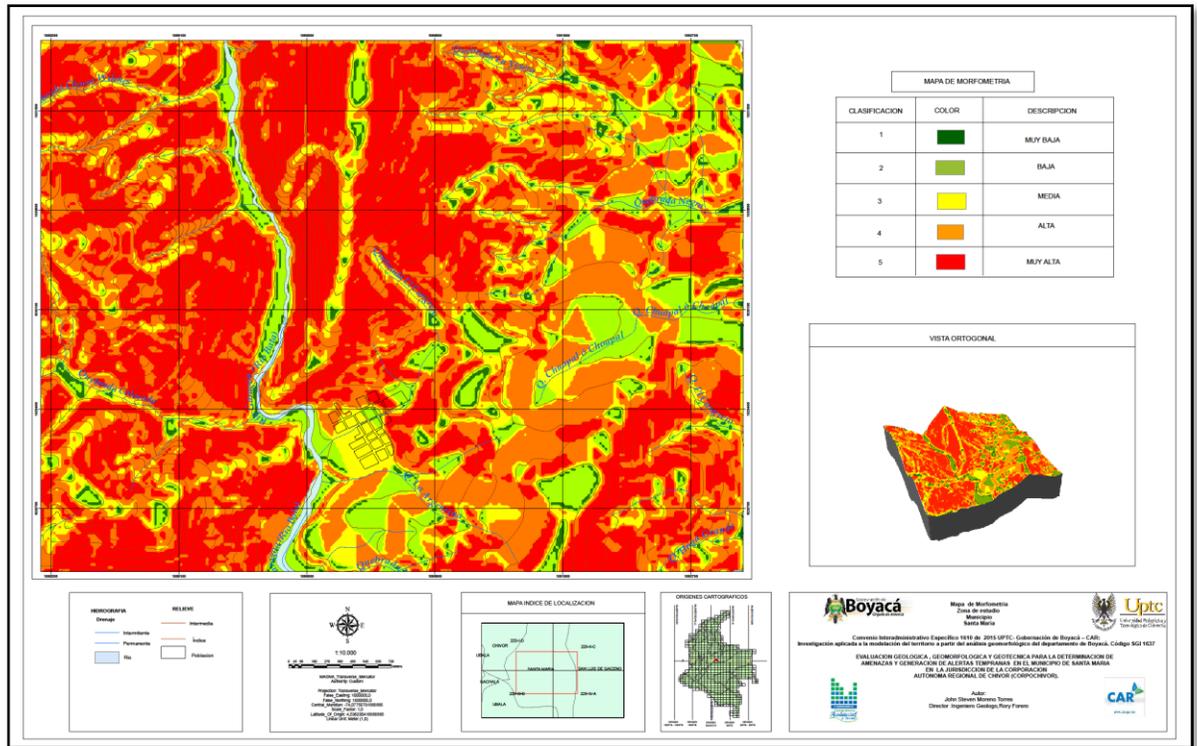


Fuente: El estudio.

#### 6.3.2.1.4 Morfométrica

Para la generación de la morfometría se realiza una operación matemática  $((Pendientes \times 0.60) + (Rugosidad \times 0.25) + (Acuencia \times 0.10)) = (Morfometría)$  en el cual se tiene que utilizar las herramientas de Map Algebra/ Raster Calculator mediante el SIG ArcGIS 10.2 se tienen en cuenta con una calificación concordante con los rangos, entre 1 a 5, 1 corresponde a susceptibilidad muy baja y 5 corresponde a un valor de susceptibilidad morfométrica muy alta (Figuras 23).

Figura 23: Mapa Morfométrico.



Fuente: El estudio

### 6.3.2.2 Morfogénesis

Las unidades geomorfológicas identificadas en un área específica se determinan en base en la expresión e interpretación de los procesos geomorfológicos que interactuaron en el terreno, los cuales generaron la formación, evolución y modificación de las actuales formas del terreno, además dichas unidades se encuentran contenidas dentro de diferentes ambientes morfogenéticos; se conoce como ambiente morfogenético a la agrupación de condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas, bajo las cuales se generan las geoformas (capítulo 6)

Dependiendo de su ambiente, y aspectos como sus características agradacionales o deposicionales y degradacionales o destructivos la clasificación de cada una de las unidades geomorfológicas se realizó mediante el documento metodológico, donde se da una calificación dependiendo de los factores anteriormente. Ver Tabla 20).

Tabla 20: Clasificación y calificación de las unidades morfogenéticas

Ambiente	Origen	Proceso genético	Modelado		Rango de Calificación	
			Agradación	Degradación	Agradación	Degradación
Fluvial	0	1	1	0	2	1
Denudacional	2	1	1	0	4	3
Estructural	3	0	1	0	4	3
Antrópico	2	1	1	0	4	3
Exógeno	1	Agradacional	1			
Endógeno	0	Degradacional	0			

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Tabla 21: Calificación de las unidades geomorfológicas del área de estudio.

Ambiente	Modelado	Geoforma	Acrónimo	Calificación
Denudacional	Agradación	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión	Dco	4
	Degradación	colina remanente	Ddri	3
	Degradación	cono de deslizamiento indiferenciado	Ddt	3
	Degradación	Escarpe de erosión menor	Deeme	3
	Degradación	cono flujo de detritos	Dld	3
	Degradación	Escarpe de erosión mayor	Deeme	3
	Degradación	ladera erosiva	Dlo	4
Estructural	Degradación	Escarpe de línea de falla	Slfe	3
	Degradación	Ladera de contrapendiente	Slcp	3
Fluvial	Agradación	Plano o llanura de inundación	Fpi	2
	Degradación	Cauce aluvial	Fca	1
	Degradación	cono de deyección	Fcdy	1

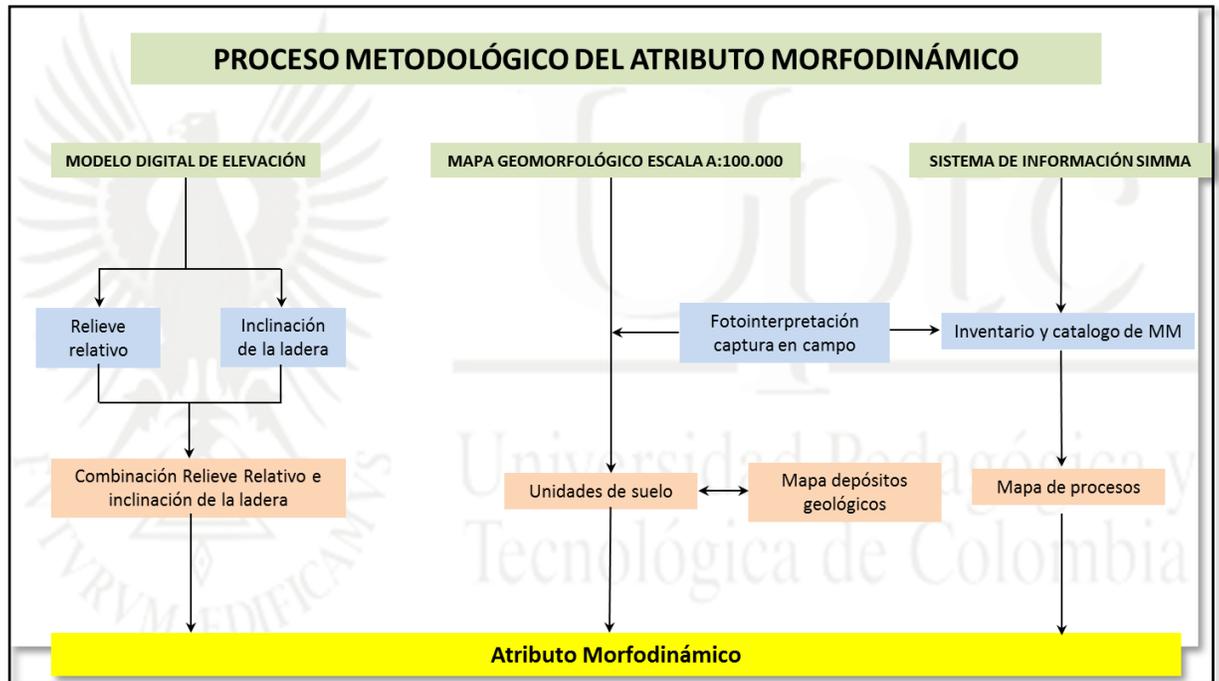
Fuente: El estudio

### 6.3.2.3 Morfodinámica

Los procesos morfodinámica corresponden a una serie de acciones sucesivas, simultáneas y sinérgicas a través de los cuales los agentes morfogenético principalmente los externos son capaces de modelar la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la erosión de la roca, el transporte de los materiales removidos y sedimentación de dichos detritos. En consecuencia los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos e internos a través de este agrupamiento que

obtenemos una distribución espacial de los movimientos y el comportamiento del relieve asociado a las características del material por lo en cuenta los siguientes parámetros:

Figura 24: Proceso metodológico en la construcción del atributo morfodinámico.



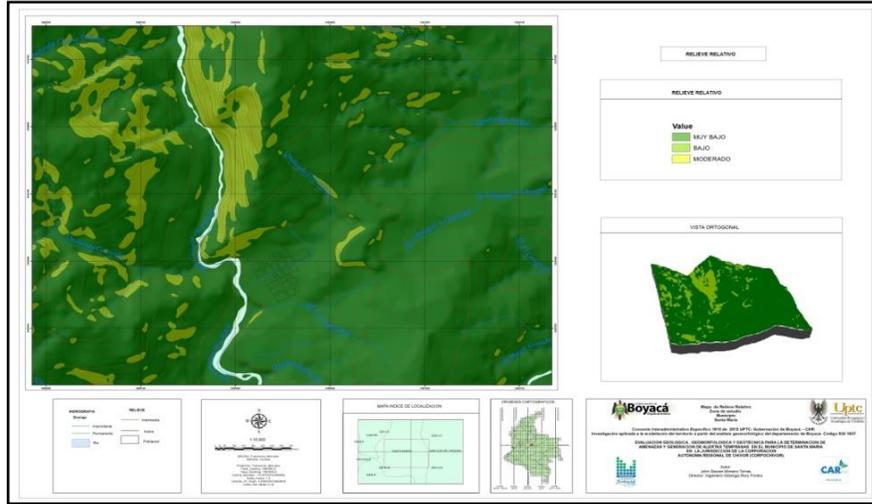
Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 6.3.2.3.1 Relieve relativo

Se hace referencia a que el relieve relativo representa la diferencia de altitud de la geoforma, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Ella se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, Montaña, meseta, terraza y otros.<sup>17</sup>

Para la realización del relieve relativo se tiene en cuenta el modelo de elevación se clasifico en 6 rangos mediante la clasificación descrita por el documento metodológico (Figuras 25).

Figura 25: Determinación del parámetro Relieve Relativo para el área de estudio.



Fuente: El estudio

#### 6.3.2.3.2 Inclinación de ladera

Se hace referencia a la inclinación de la ladera porque generalmente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa.<sup>17</sup>

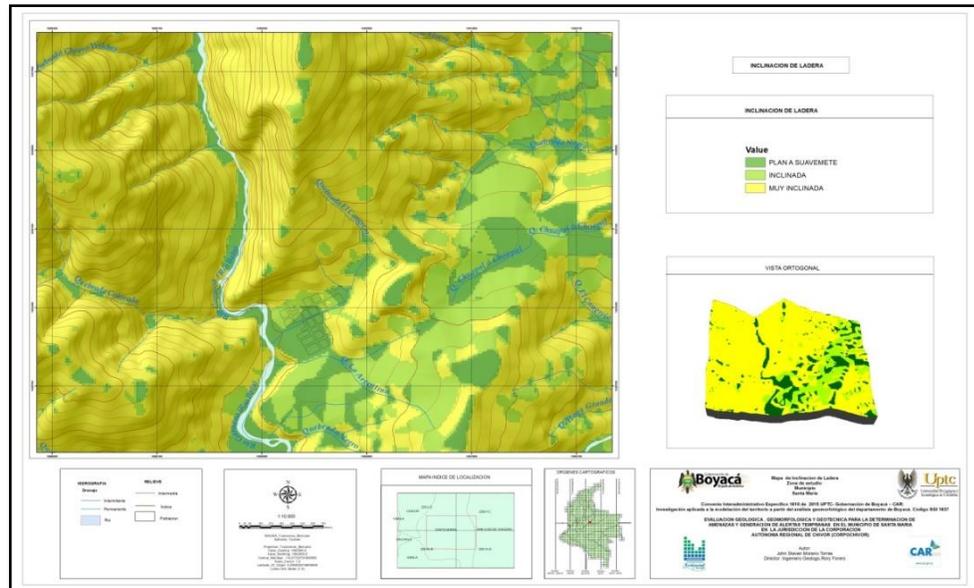
Tabla 22: Calificación de la inclinación de ladera.

INCLINACION	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y SUSCEPTIBILIDAD	CAL. INCLINACION
< 5°	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a MM.	1
5° - 10°	Inclinada	Blanda y baja susceptibilidad a MM.	1
10° - 15°	Muy inclinada	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a MM.	2
15° - 20°	Abrupta	Moderadamente resistente y moderada susceptibilidad a MM.	2
20° - 30°	Muy abrupta	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	3
30° - 45°	Escarpada	Muy resistente y alta susceptibilidad a MM.	3
> 45°	Muy escarpada	Extremadamente Resistente y alta susceptibilidad a MM.	3

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

<sup>17</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Figura 26: Mapa de inclinación de ladera del área de estudio.



Fuente: El estudio

#### 6.3.2.3.3 Combinación del relieve relativo y la inclinación de la ladera (RelaIncli):

La combinación de los elementos fisiográficos, relieve relativo e inclinación de ladera mediante el modelo RelaIncli, permite la agrupación de un mismo escenario de los elementos geomorfológicos con mayor tendencia a los movimientos en masa registrados en el catálogo e inventario de estos donde cada uno de estos tiene un porcentaje específico, distribuido de la siguiente manera:

Esta combinación se realiza mediante una operación matemática con la herramienta MapAlgebra-Raster Calculator el SIG ArcGIS (10.2), genera el mapa final RelaIncli.

$$((\text{RelaIncli}) = (0.60 * \text{RR}) + (0.40 \text{ IL}))$$

#### 6.3.2.3.4 Suelos

La calificación de las unidades se hace en función de la susceptibilidad a la generación de movimientos en masa, tal calificación se fundamenta en el ambiente de formación, tipo de material, posición topográfica y su dinámica. En el ambiente Denudacional, existen los dos extremos, la calificación de cinco que se asocia a los depósitos coluviales, que dadas sus características físicas son los

más susceptibles a reactivarse, y presentan una mayor dinámica por lo cual tiene una susceptibilidad de 5.

Tabla 23: Calificación de los depósitos.

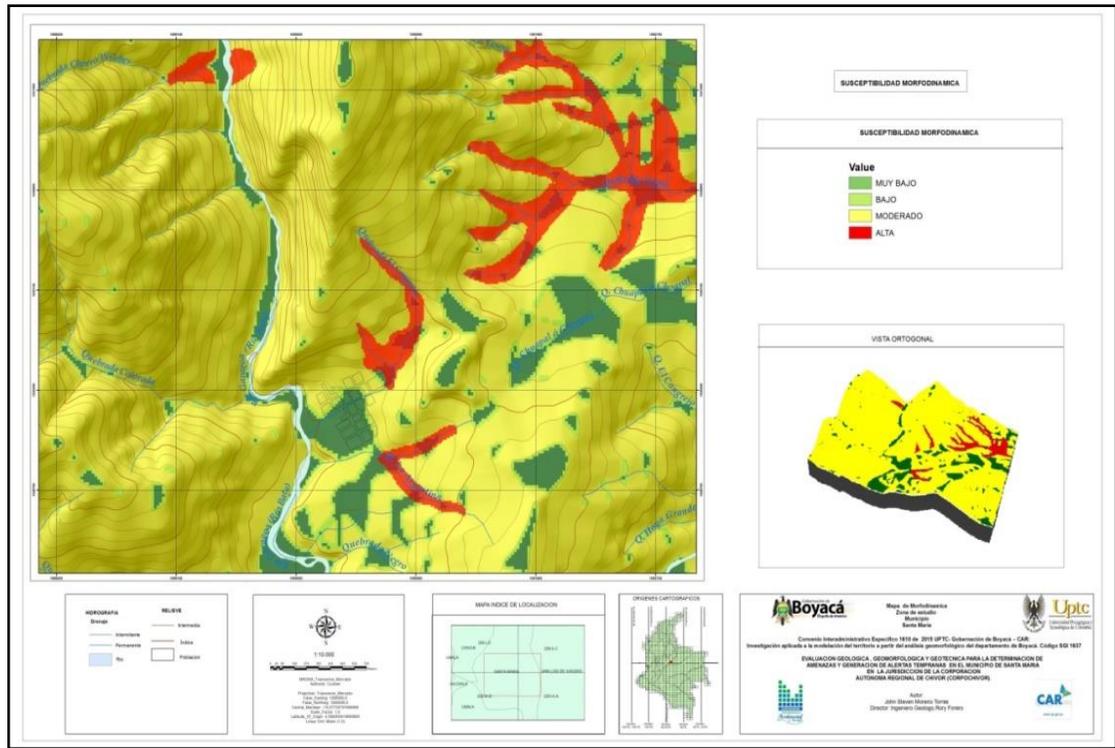
Ambiente	Deposito	Geoforma Asociada	Calificación
Denudacional	Depósitos Coluviales	Cono y Lóbulo Coluvial y de Soliflucción y Conos de Deyección, Glacis de Acumulación	5
	Depósitos de Detritos	Cono o Lóbulo de deslizamiento translacional de detritos, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de detritos	4
	Depósitos de Tierras	Cono o lóbulo de deslizamiento translacional de tierras, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de tierras	5
	Depósitos de Terraza Sobre Elevada	Terraza sobreelevada o colgada	4
	Depósitos Costras Ferruginosas o Calcáreas	Planos aterrazados o duricostras, Terrazas o mesas calcretas o silicretas	1
	Depósitos de Lodos	Cono o lóbulo de flujo de lodo	5
Fluvial y Lagunar	Depósitos de Cauce y Llanura Aluvial	Cauce activo y abandonado, Albardones, barras, cuencas de decantación, lagos en media luna, lagunas naturales, meandros abandonados, planicie o llanura de inundación, planicies o deltas lacustrinos, planos anegadizos, planos y artesas lagunares	1
	Depósitos de Terraza Aluvial	Terrazas de erosión, terrazas de acumulación subreciente, terrazas de acumulación antigua, terrazas de depositación y <u>escarpes de terraza</u>	2
	Depósitos Paudales	artesas lagunares y planos anegadizos	1
	Depósitos Lagunares	lagos en media luna y meandros abandonados	1
	Depósitos de Abanicos Aluviales	Abanicos fluviotorrenciales, conos de deyección, deltas de desborde natural, deltas lacustrinos y escarpes de abanicos fluviales	3

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

#### 6.3.2.2.5 Susceptibilidad Morfodinámica Total

Para el atributo morfodinámico la información del inventario que no corresponde a ninguna geoforma, se debe hacer una traducción espacial del evento detonado a polígono, el cual a su vez va a definir zonas con mayor dinámica por movimientos en masa. Se propone la representación cartográfica de los eventos punto, como polígonos de radio 25 m a los cuales se les asigna una calificación de susceptibilidad por movimientos en masa de 5 y que entran al atributo morfogenético como la geoforma “Deslizamientos Indiferenciados” Ddri; a pesar que por la escala no ameritan ser cartografiados, pero por su antecedente refuerzan el concepto de una zona con mayor susceptibilidad a los movimientos en masa (Figuras 27).

Figura 27: Mapa de Susceptibilidad Morfodinámica

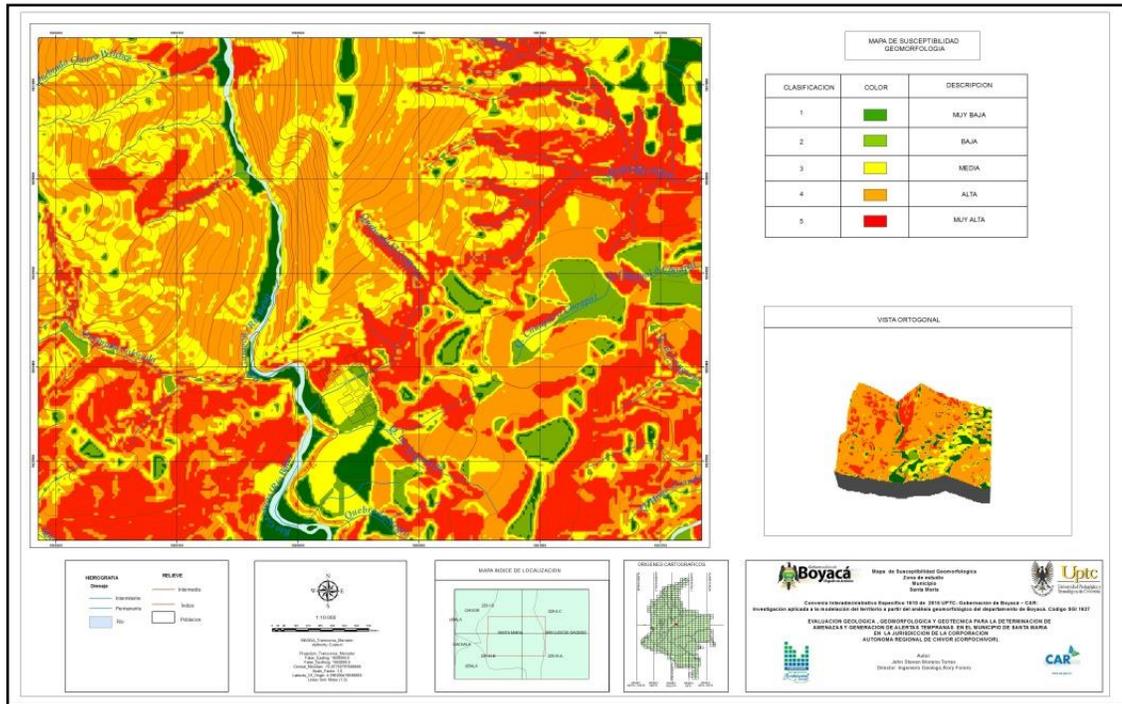


Fuente: El estudio

### 6.3.2.4 Susceptibilidad Geomorfológica

Para esta temática se requiere la generación de los diferentes atributos en las cuales se debe realizar la siguiente operación matemática mediante la herramienta MapAlgebra-Raster Calculator de SIG ArcGIS (10.2), genera el mapa final de geomorfología  $(\text{Morfometría} \times 0.40) + (\text{Morfogénesis} \times 0.30) + (\text{Morfodinámica} \times 0.30) = (\text{Geomorfología})$  (Figura 28).

Figura 28: Mapa de susceptibilidad Geomorfológica total.



Fuente: El estudio

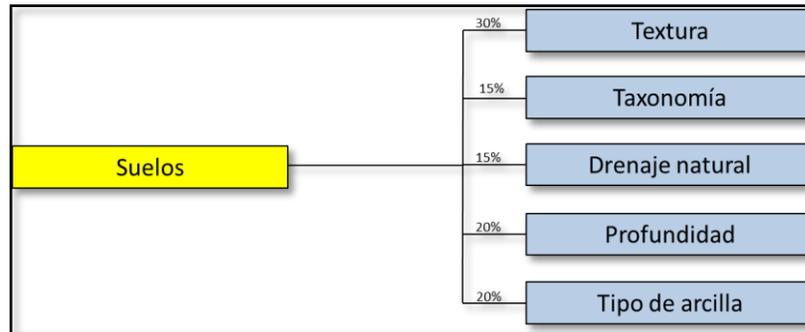
### 6.3.3 Suelos

La génesis de los suelos parte de un estado litológico y su evolución los lleva a un momento en el tiempo en el que tendrán una capacidad y respuesta ante la dinámica de las coberturas vegetales, la incidencia del clima y la intervención humana. La información en la cual se desarrolló este atributo fue tomado de estudios de suelos elaborados por el IGAC

La presente metodología define las variables: taxonomía, textura, profundidad, tipo de arcilla y drenaje natural, con las que se pretende evaluar su relación con la susceptibilidad a los movimientos en masa (Figuras29).<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Figura 29: diagrama de atributos del variable suelo con sus porcentajes.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 6.3.3.1 Textura

La textura comprende la cantidad relativa de las diferentes partículas de suelo de tamaño menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas). La textura, se encuentra relacionada con la retención de humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos, fertilidad y nutrición mineral entre otras.

En suelos arcillosos el movimiento vertical del agua es menor por cuanto los poros son más pequeños de esta manera la conductividad hidráulica también es menor, haciendo de los suelos menos permeables, la consecuencia es que aumentan el contenido de agua, se saturan y finalmente son más susceptibles a movimientos en masa (Tabla 24).

Contrario a los suelos arcillosos, los de textura gruesa (arena, grava) serán menos susceptibles por cuanto el agua se desplaza a mayor velocidad en el perfil del suelo (mayor velocidad de infiltración), caracterizando los suelos más permeables y con mayor conductividad hidráulica.

Los suelos con mayor contenido de materia orgánica se saturaran, se vuelven más fluidos, menos consistentes y entre mayor sea la pendiente donde estén ubicados mayor será la susceptibilidad a moverse.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 24: Clasificación textural de suelos.

Clase textural	Calificación
Gr,A,FAGrP,Agr,AFP	1
AF,FAGr,FArGr,FArGr,FGr,FGrP	2
ArA,ArGr,FA,FArLGr,ArLGr, FLGr, rAGr	3
F,F-Org.Far, FArA, FArL,FL,FLOrg	4
Ar, ArL	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

A: Arena; L: Limo; Ar: Arcilla; F: Franco; Gr: Grava; P: Piedra; Org: Orgánico.

### 6.3.3.2 Taxonomía

La taxonomía de suelos, corresponde a un sistema básico de clasificación para hacer e interpretar los levantamientos de suelos. Actualmente, la descripción Taxonómica de suelos, se basa en la clasificación y estructuración que hace la S.S.S. (Soil Survey Staff 1.998). La clasificación taxonómica, permite realizar generalizaciones inductivas acerca de las características de las clases de suelos y establecer interrelaciones entre ellos. IDEAM, 2009.<sup>20</sup>

La calificación se presenta en tabla 25, donde se infiere que los suelos más evolucionados y en condiciones ideales, son menos susceptibles a los movimientos en masa, mientras que los más jóvenes son más susceptibles a los movimientos en masa.

Tabla 25: Calificación de la taxonomía de suelos según orden.

Orden de suelos	Calificación
Oxisol, Ultisol	1
Afisol	2
Mollisol, Andisol, Espodosol	3
Vertisol, Aridisol	4
Inceptisol, Entisol, Histosol	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC .

<sup>20</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

### 6.3.3.3 Drenaje natural

La particularidad del drenaje natural, radica en conocer la frecuencia y duración de los períodos húmedos bajo condiciones similares, a aquellas en las cuales se han desarrollado los suelos, o sea, en condiciones naturales.

El drenaje interno es uno de los factores que contribuye a la estabilización de masas de tierra, se puede relacionar donde hay un suelo con buen drenaje es menos susceptible a que se presente movimientos en masa, ya que controla el flujo de agua subterránea y comprime las presiones de poros aumentando resistencia al corte de los diferentes tipos de suelos que se pueden llegar a encontrar. Esta variable se determina de los perfiles modales de las diferentes unidades de suelos, y se clasifican mediante la (tabla 26) propuestas por el IDEAM.

Tabla 26: Calificación del drenaje natural del suelo.

Clase	Características	Calificación
Excesivo	No retienen agua después de las lluvias	1
Moderado Excesivo	No retienen agua para las plantas después de las lluvias. El nivel freático nunca sube por encima de 2 metros.	
Bueno	Suelos óptimos para el abastecimiento de agua y aire a los cultivos. Nivel freático siempre por debajo de 80 cm.	2
Moderado Excesivo	El agua es removida lentamente hasta el nivel freático (40-80cm. En Época de lluvias). Requiere drenaje para cultivos permanentes.	3
Imperfecto	Suelos con capas impermeables que impiden percolación en época de lluvias.	4
Pobre	Agua removida lentamente y los perfiles están mojados en la época de lluvias. Se requiere drenaje.	
Muy pobre	Agua freática cerca o sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	5
Pantanosos	Agua freática sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 6.3.3.3 Profundidad

La importancia de la profundidad total del perfil de suelos, radica en que nos determina hasta donde pueden penetrar las raíces de las plantas, hasta donde puede moverse el agua, a que profundidad se encuentran las limitantes o impedimentos tanto de tipo físico como químico, tales como densidad, material litológico, toxicidades por elementos, entre otros. Igualmente, permite establecer características o aspectos importantes en los procesos de formación del suelo o relevancias en cuanto a acontecimientos naturales que se han presentado a lo largo del tiempo (Tabla 27).<sup>21</sup>

Tabla 27: Calificación de profundidad total.

Profundidad (cm)	Categoría	Calificación
0 - 25	Muy baja o muy superficial	1
25 - 50	Baja o superficial	2
50 - 100	Media o moderadamente profunda	3
100 - 150	Alta o moderadamente profunda	4
Mayor a 150	Muy alta o muy profunda	5

Fuente: IDEAM. 2009

### 6.3.3.4 Tipo de arcilla

Es evidente como las características del tipo de suelo o roca determinan el tipo de fenómeno de remoción en masa ya que este depende directamente con la precipitación abundante, depende casi exclusivamente de la pendiente de la ladera. La importancia del tipo de arcilla, en los movimientos en masa, radica en el grado de estabilidad que esta presenta cuando entra en contacto con el agua, ya sea que se contraiga, se expanda o forme grietas, como el caso de las arcillas que tienen esas características (Tabla 28).

<sup>21</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 28: Calificación de tipo de arcillas.

Grupos de tipo de arcilla	Calificación
Caolinita	1
Caolinita, Biotita	
Halloisita	2
Caolinita, Montmorillonita, Vermiculita	3
Caolinita, Muscovita, Montmorillonita	
Montmorillonita, Clorita, Caolinita	4
Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	
Alofana, Gipsita	5
Montmorillonita, Vermiculita	
Montmorillonita, Illita, Vermiculita, Muscovita	
Muscovita, Montmorillonita, Vermiculita	
Talco, Muscovita, Vermiculita, Montmorillonita	

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

#### 6.3.3.5 Susceptibilidad de suelos total

Para esta temática se requiere la generación de los diferentes atributos en las cuales se debe realizar la siguiente operación matemática mediante la herramienta MapAlgebra-Raster Calculator de SIG ArcGIS (10.2), genera el mapa final de suelos  $(\text{textura} \times 0.30) + (\text{Taxonomía} \times 0.15) + (\text{profundidad} \times 0.2) + (\text{tipo de arcilla} \times 0.2) + (\text{drenaje} \times 0.15) = (\text{suelos})$ .

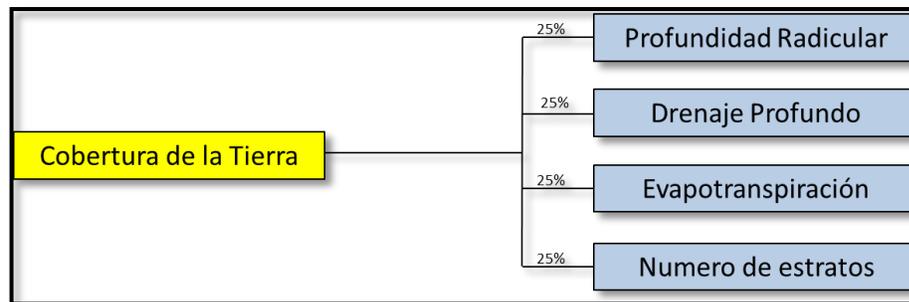
Realizada la calificación y zonificación de las unidades de suelos para su aplicación en la susceptibilidad, es necesario y en lo posible tener conocimiento del uso actual y del conflicto de uso de los suelos, así como procesos de erosión, cárcavamiento, movimientos en masa y con el fin de hacer un análisis integral con la calificación y zonificación hecha y ajustarlas según lo aquí sugerido.

#### 6.3.4 Cobertura de la tierra

Los criterios, definiciones y clasificación de unidades que utilizaron las entidades para hacer el levantamiento de las coberturas de la tierra a escala 1:100.000 pueden ser consultadas en el documento "Leyenda nacional de coberturas de la tierra metodología CORINE Land Cover.

Ya se expusieron en forma general enfoques, alternativas, criterios y variables, ahora se complementara con algunas funciones de las variables y valores referentes. En la Figura 28 se muestra la variable cobertura de la tierra con sus atributos a calificar con sus pesos dentro de la variable de susceptibilidad. (Figuras30).

Figura 30: Atributos de la variable cobertura de la tierra.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

#### 6.3.4.1 Profundidad radicular

Este parámetro asume un papel fundamental en la cual las raíces actúan como un refuerzo y sostienen el suelo incrementando el esfuerzo cortante y a la resistencia a la fuerza tractiva del agua, La forma como las raíces actúan en cada caso está determinada por el tipo de planta por las condiciones del suelo del sitio. La profundidad y extensión de las raíces son importantes cuando hay que escoger plantas para estabilizar el suelo, en este caso raíces profundas son mejores. Adicionalmente, la estabilidad depende de las propiedades mecánicas de las raíces y el tipo de suelo o aparición de roca que pueden limitar el crecimiento de la misma.

Con la funcionalidad descrita, las coberturas que mejor protegen y son menos susceptibles a movimientos en masa son los bosques, por lo que sugiere dar una calificación entre 1 y 2 según el grado de intervención que haya tenido. Para el caso de cultivos y pastos el tipo de cobertura (la calificación puede estar alrededor 2 - 3 - 4), otras coberturas como arbustales, vegetación secundaria pueden dárseles calificación intermedia (3-4) (tabla 29)<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013

Tabla 29: Categorización y calificación de la profundidad efectiva.

Profundidad Efectiva	Rango (cm)	Susceptibilidad
Muy superficial	menos de 25	5
Superficial	25-50	4
Moderadamente profundo	5-100	3
Profundo	110-150	2
Muy profundo	mayor de 150	1

Fuente. Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA-2007).

### 6.3.4.2 Drenaje profundo

Este parámetro asume un papel fundamental ya que hace referencia a la facilidad que tiene del flujo de agua de penetrar en los drenajes profundos, lo cual varía dependiendo del tipo de cobertura vegetal, y la categorización y clasificación depende del tipo de cobertura, donde la calificación de susceptibilidad dependiendo de la cobertura vegetal en la zona de estudio (Tabla 30).

Tabla 30: Categorización y clasificación del atributo drenaje profundo.

Drenaje Profundo	Rango (%)	Susceptibilidad	Categorización	Coberturas Asociadas
Muy superficial	0-10	5	Muy alta	Pastos
Superficial	10,1-20	4	Alta	Áreas Agrícolas
Moderadamente profundo	20,1-30	3	Media	Arbustales abiertos
Profundo	30,1-40	2	Baja	Arbustales densos
Muy profundo	Mayor de 40	1	Muy baja	Zonas boscosas

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

### 6.3.4.3 Numero de estratos

Para desarrollar esta parámetro se debe utilizar el número de estratos de una cobertura vegetal para darse una idea por ejemplo del tipo de bosque, de su densidad, estructura, el resultado es que tan buena protección hace en algunos aspectos. Ejemplo para bosques bien evolucionados es posible encontrar hasta 4 estratos, de esta manera se podría calificar entre 1 y 2; para un cultivo limpio que solo tiene un estrato, su susceptibilidad sería de 4 – 5 (Tabla 31).<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 31: Categorización y calificación del atributo número de estratos.

Estratos de la cobertura	Rango (N° de estratos verticales)	Susceptibilidad
No presenta	0	5
Baja densidad estructural	1	4
Media densidad estructural	2	3
Moderadamente alta	3	2
Alta densidad estructural	4	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

#### 6.3.4.4 Evapotranspiración

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Etc.) se refiere a la demanda evaporatividad de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dada .<sup>24</sup>

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina Eto.<sup>24</sup> (Tabla 33)

$$K = \frac{Etc}{Eto}$$

Etc.: Evapotranspiración Estándar.

Eto: Evapotranspiración de referencia

Tabla 32: Coeficientes de cultivos adaptados de FAO

Vegetación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Árboles Frutales	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Bosque caducifolio	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Bosque Mixto	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Caña de Azúcar	0,6	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1	1,05	1,15	1,15	0,85

<sup>24</sup> Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos pag13-35

Vegetación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Café	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Piña	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Granos Básicos	1	1	1	1	0,35	1	1,05	1,05	0,6	1	1	1
Hortalizas	1	1	1	1	0,7	1	1,05	1,05	0,95	1	1	1
Pastos Naturales	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1
Vegetación Acuática	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05

Fuente: Servicio Hidrológico del Salvador.

Tabla 33: Categorización y calificación del atributo Evapotranspiración.

Evapotranspiración	Rango de Kc	Susceptibilidad
Muy baja	0-0,5	5
Baja	0,51-0,8	4
Media	0,81-1	3
Alta	1,1-1,5	2
Muy Alta	mayor de 1,5	1

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

#### 6.3.4.4 Calculo total del atributo cobertura de la tierra

Para el cálculo final del atributo cobertura de la tierra, por medio del SIG ArcGIS (10.1) mediante la opción Map Algebra/Raster Calculator, se suman los mapas temáticos generados, la calificación al igual que los demás atributos que intervienen en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tienen un rango de calificación de 1 a 5, siendo 1 el menor valor correspondiente a susceptibilidad muy baja y 5 el valor de susceptibilidad muy alta, en la (tabla 33) se especifican los rangos de calificación dado para cada una de las variables de las diferentes coberturas encontradas en el área de estudio (Tabla 34) .

Tabla 34: Calificación de susceptibilidad de cobertura de la tierra.

TIPO DE COBERTURA	SUSCEPTIBILIDAD				N° Estratos
	Area	Pro-RADICULAR	Evapotra	Drenaje	
Bosque denso alto de tierra firme	2,6	1	4	1	1
Pastos limpios	0,3	3	3	5	4
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,4	2	3	4	3
Bosque fragmentado	1,3	1	4	2	2
Tejido urbano continuo	0,6	5	1	5	5
Rios (50 m)	0,6	5	1	5	2
Vegetación secundaria o en transición	0,5	2	4	3	3
Mosaico de pastos con espacios naturales	1,3	1	3	3	3
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2,7	3	3	2	2
Pastos enmalezados	0,2	3	3	2	1
Vegetación secundaria o en transición	0,8	4	4	3	2

Fuente: El estudio

## 6.4 ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad, generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que puedan ocurrir deslizamientos. El mapa de susceptibilidad (Figura 32) clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable también muestra donde hay o no, condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad (ANEXO E).

### 6.4.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

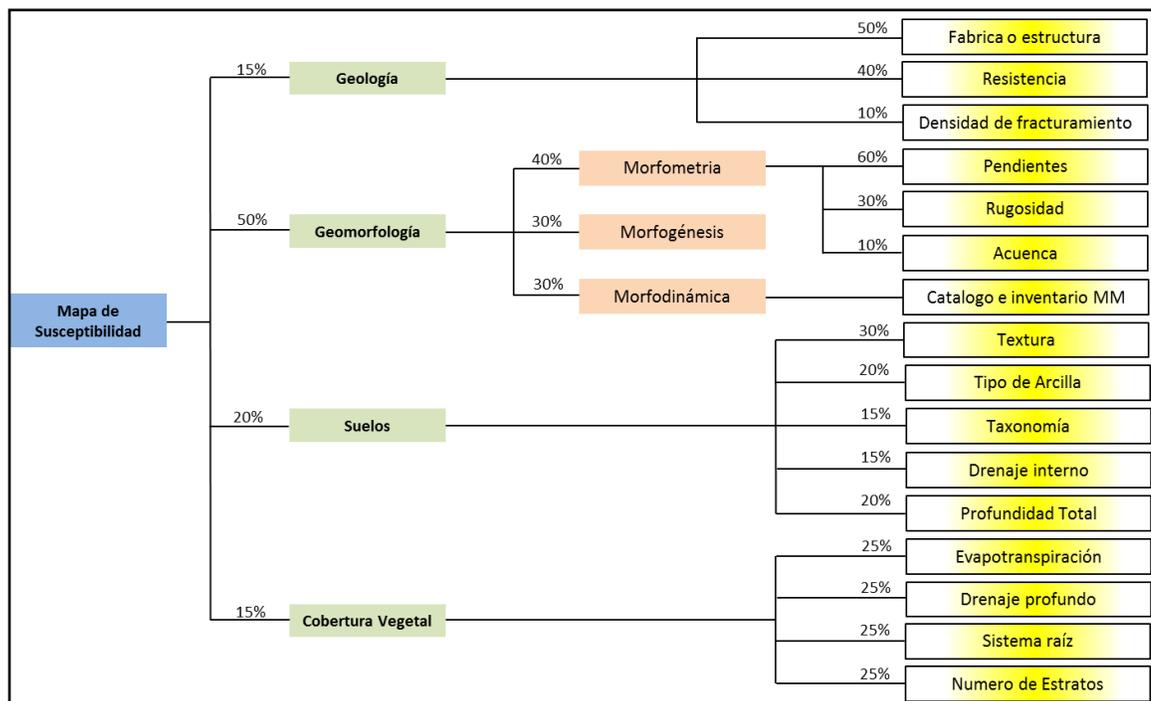
Es un método desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980, como una ayuda a la toma de decisiones, consiste en dividir una situación compleja y poco estructurada en sus partes que la componen; arreglando estas partes, o variables, en un orden jerárquico; asignando valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable; y sintetizando los juicios para determinar

cuál variable tiene la mayor prioridad y deben actuar bajo la influencia del resultado de la situación<sup>25</sup>.

El primer paso en AHP es desarrollar una representación gráfica del problema, en función de la meta general, de los criterios y de las alternativas de decisión. Este tipo de gráfica pone de manifiesto la jerarquía del problema. La (Figura 31) muestra la jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad.<sup>26</sup>

Teniendo en la (Figuras 31) donde se muestran los por porcentaje de los diferentes atributos, para determinar la susceptibilidad total del área de estudio se desarrolló una operación matemática mediante la herramienta MapAlgebra-Raster Calculator el SIG ArcGIs (10.2), donde se genera el mapa final de susceptibilidad

Figura 31: Diagrama de susceptibilidad total con porcentajes.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

<sup>25</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013

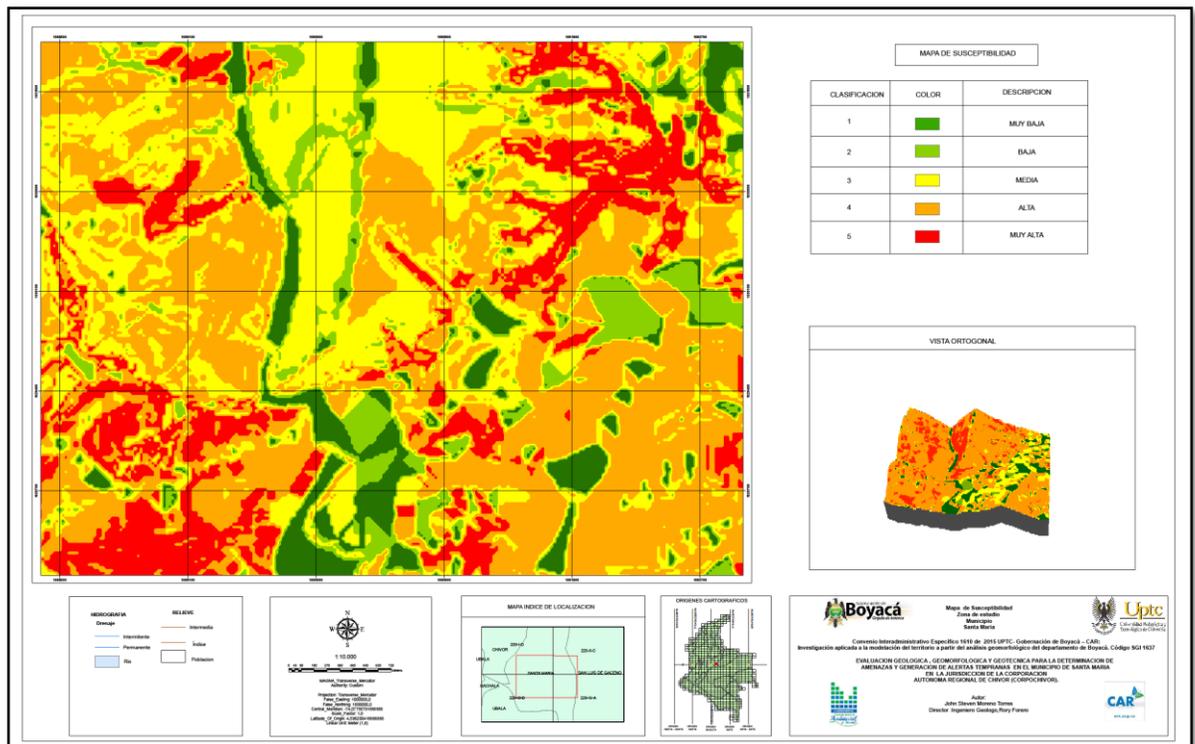
<sup>26</sup> Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 35: Resumen de las diferentes ecuaciones para la generación de los mapas de susceptibilidad mapas escala 1:100000.

Susceptibilidad de la geomorfología	$0.30 * \text{Morfogénesis} + 0.30 * \text{Morfodinámica} + 0.40 * \text{Morfometría}$ .
Susceptibilidad de la morfometría	$0.60 * \text{Pendiente} + 0.30 * \text{Rugosidad} + 0.10 * \text{Acuena}$ .
Susceptibilidad de la geología	$0.50 * \text{Textura} + 0.40 * \text{Resistencia} + 0.10 * \text{Densidad Fallas}$
Susceptibilidad de los suelos edáficos	$0.30 * \text{Textura} + 0.20 * \text{Tipo de Arcilla} + 0.15 * \text{Taxonomía} + 0.15 * \text{Drenaje Natural} + 0.20 * \text{Profundidad Total}$
Susceptibilidad de la cobertura de la tierra	$0.25 * \text{Evapotranspiración} + 0.25 * \text{Drenaje Profundo} + 0.25 * \text{Sistema Raíz} + 0.25 * \text{Número de Estratos}$
Susceptibilidad Final	$0.5 * \text{geomorfología} + 0.15 * \text{Geología} + 0.20 * \text{Suelos} + 0.15 * \text{Cobertura}$

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Figura 32: Mapa de Susceptibilidad total.



Fuente: El estudio

## 9. ZONIFICACION DE AMENAZAS

Es la probabilidad de desplazamiento de un volumen de material in-situ, transportado o residual en un área determinada, causado por la interacción de diferentes factores internos o externos al talud y al materia presente en este. Una de las etapas previas para la identificación y evaluación de la amenaza por movimientos en masa en un área determinada, es la definición de todos los factores que intervienen en la misma. Estos factores deben ser deducibles directamente a partir de la información técnica existente y admitir una definición sencilla.

Es el proceso mediante el cual se determina la probabilidad de ocurrencia y la severidad de un evento en un tiempo dado y en un área determinada, además en su zonificación se representa la recurrencia estimada y ubicación geográfica de eventos probables. En este capítulo se muestran los resultados de zonificación de la amenaza, tal y como se expuso en la metodología.

Dentro de los procesos de remoción identificados y masificados se tiene como los más recurrentes. Para entender los resultados gráficos de este trabajo de zonificación, mediante el método de algebra de mapas o análisis multivariable, es fundamental visualizar como cada una de los rangos de la clasificación representan una serie de potencialidades y restricciones.

Se debe de tener en cuenta la información ya procesada a través de análisis de información disponible (mapas, informes y estudios anteriores), con el fin de conocer la probable ubicación y severidad de los fenómenos naturales peligrosos, así como la probabilidad de que ocurran en un tiempo y área específica. Tiene como resultado la elaboración de un mapa regional de amenazas, y un mapa de amenazas por cada municipio evaluado, los cuales representan un elemento clave para la planificación del uso del territorio y constituyen un insumo imprescindible para la evaluación de los riesgos actuales y potenciales<sup>27</sup>.

### 9.1 METODOLOGIA UTILIZADA

Zonificación de susceptibilidad, se propone una metodología heurística para la zonificación de amenazas, para lo cual fueron definidos los factores inherentes al clima (temperatura media anual, precipitación media anual y lluvia máxima diaria) y el sismo como detonantes de los movimientos en masa. (Figura 33).<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> : Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Inicialmente, la evaluación de la amenaza debida a los eventos detonados por factores climáticos se obtiene mediante la suma de los pesos que contiene cada celda para el detonante y la susceptibilidad, así.

$$Ac = S + FC$$

Dónde:

Ac: Amenaza por factores climáticos

S: Susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa

Fc: Factor climático

el cálculo de la amenaza por sismo, se obtiene mediante la suma de los pesos que contiene cada celda para el detonante sismo y la susceptibilidad, así:

$$As = S + Fs$$

Dónde:

As: Amenaza por detonante sismo

S: Susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa

Fs: Factor sismo

El cálculo de la amenaza total se obtiene mediante la suma de la amenaza por lluvia y la amenaza por sismo, así:

$$At = Ac + As$$

Dónde:

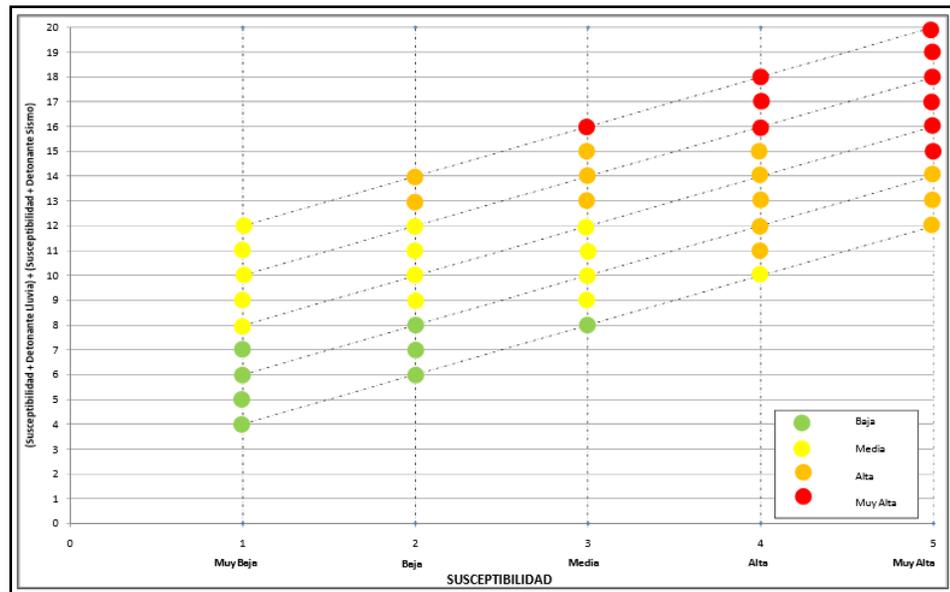
At: Amenaza Total

Ac: Amenaza por detonante clima

As: Amenaza por detonante sismo

Los valores obtenidos de amenaza por detonante clima o sismo oscilan entre 2 y 10 debido a que tanto la calificación de los detonantes como los de susceptibilidad varían entre 1 y 5.

Figura 33: Clasificación de mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

## 9.2 EVALUACION DE DETONANTES

La evaluación de los detonantes se realiza a partir de las coberturas generadas por el Servicio Geológico Colombiano, tanto para el detonante por factores climáticos como para sismo se utilizan las diferentes parámetros necesarios generados por el Servicio Geológico Colombiano, pero por el grado de detalle necesario en este estudio, los datos hidrometeorológicos a utilizar son correspondientes a los estudios realizados en la zona, descritos en el (Capítulo 4).

### 9.2.1 Condiciones climáticas

Teniendo en cuenta el documento metodológico utilizado se describen aspectos climáticos relevantes donde se debe tener en cuenta:

La precipitación media anual y la temperatura media anual influyen en el contenido de humedad del suelo, es decir, en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuiría en mayor medida a la generación de movimientos en masa.

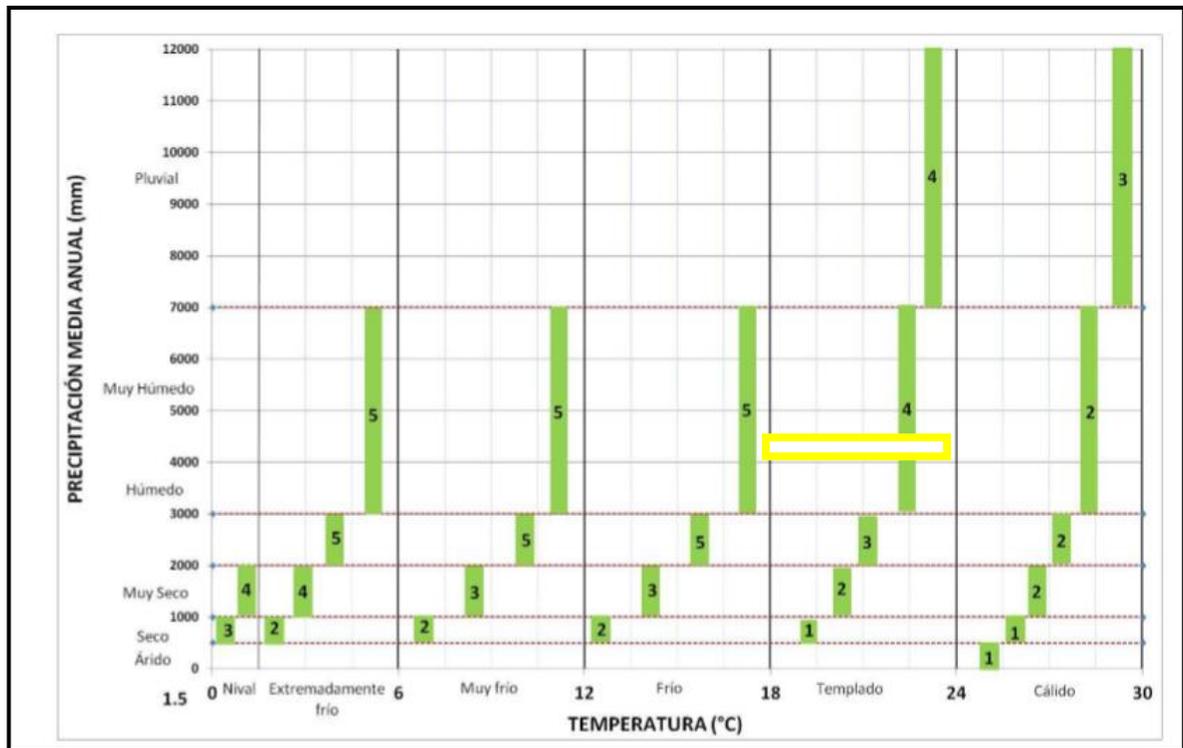
A mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y por ende, mayor probabilidad de que se generen procesos de inestabilidad en las laderas.

A mayor contenido de humedad antecedente en el suelo y mayor valor de lluvia máxima diaria, se incrementa la probabilidad de generarse movimientos en masa<sup>28</sup>.

### 9.2.1.1 Precipitación media anual y temperatura media anual

Con base a las variable ya desarrolladas como Precipitación Media Anual y Temperatura Media Anual, en el ares de estudió valores que se obtuvieron en el capítulo 4, se obtiene un mapa de isoyetas donde la precipitación media multianual corresponde a 4.345 milímetros y la temperatura media se encuentra en un rango de 21.68°C a 21.17°C, la clasificación de precipitación media anual corresponde a 4, en la figura 36 se especifican los rangos de calificación de la zonificación climática de este parámetro (Figura 34).

Figura 34: Calificación de la zonificación climática con base en su contribución a los movimientos en masa.



Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 9.2.1.2 Precipitación máxima diaria

Partiendo de la hipótesis que a mayor lluvia diaria máxima, mayor es la probabilidad que se detone un movimiento en masa, se generó una cobertura de lluvia máxima en 24 horas a partir de la distribución de Gumbel para un periodo de retorno de 25 años, para lo cual se seleccionaron las estaciones meteorológicas que se encuentren dentro de la zona de estudio. A partir de los datos de lluvia máxima en 24 horas de las estaciones pluviométricas y pluviográficas en la zona de estudio, se realizó un análisis estadístico que contempló un dato anual para el periodo 2002-2015, previo análisis de consistencia de cada uno de los registros y teniendo en cuenta que en la zona de estudio las precipitaciones máximas (Pd) mm en un periodo de retorno de 25 años el máximo valor es de 353.1338mm. (Tabla 35).

Tabla 35: Valor de periodos de retorno de 25 años.

Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
ID	CODIGO	CAT	NOMBRE	MUNICIPIO	Duración	25 años
1	35070190	PG	Chivor	Chivor	24 hr	353,1338
2	35070520	PG	Pomarrosos Los	Macanal	24 hr	11,7842
3	35080070	PM	San Luis de Gaceno	San Luis de Gaceno	24 hr	11,3374
4	35070170	PM	Nazareth	Santa Maria	24 hr	40,5000
5	35060220	PM	Gloria La	Ubala	24 hr	11,7842
6	35060300	PM	Mundo Nuevo	Ubala	24 hr	8,1697
7	35060250	PM	Sta Rosa de Ubala	Ubala	24 hr	101,5230
8	35195020	CO	Tauramena	Tauramena	24 hr	230,5360
9	35095110	CP	Huerta La Grande	Villanueva	24 hr	185,3600

Fuente: Estudio

Tabla 36: Calificación de la lluvia máxima diaria según su contribución a los movimientos en masa.

VALORES DE LLUVIA MAXIMA DIARIA (mm)	Calificacion
0-50	1
50-100	2
100-150	3
150-220	4
>220	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

Teniendo como referencia la (Tabla 36) la precipitación de 24 horas en un periodo de retorno de 25 años la calificación de la lluvia máxima diaria según el atributo de movimientos en más ese considera que su calificación es de 5.

### 9.2.2 Cobertura del detonante climático

El mapa obtenido mediante la calificación de precipitación media anual y la temperatura media, herramienta ArcGIS utilizando el método de interpolación IDW, según lo descrito en el (Capítulo 4) y el mapa de isoyetas de lluvias diarias máximas para un periodo de retorno de 25 años obtenido según la calificación de los rangos descritos en el numeral se intersectó y se califican de 1 a 5 de acuerdo a su contribución a los movimientos en masa, dando lugar al mapa final del detonante por factores climáticos esta zonificación corresponde a 3.(Tabla 37)

Tabla 37: Calificación de detonante por factores climáticos a partir de la zonificación climática nacional de lluvias máximas diarias, de acuerdo con su contribución a los movimientos en masa.

Zonificación climática	Lluvias máximas diarias	Detonante por factores climáticos
1	1	1
1	2	1
1	3	2
1	4	3
1	5	3
2	1	2
2	2	2
2	3	3
2	4	3
2	5	4
3	1	1
3	2	1
3	3	2
3	4	3
3	5	4
4	1	5
4	2	4
4	3	4
4	4	5
4	5	5
5	1	5
5	2	4
5	3	5
5	4	5
5	5	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 9.2.3 Detonante sísmico

Desde el punto de vista ingenieril, las laderas y taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman<sup>28</sup>.

Estos últimos valores anuales son ajustados por medio de la distribución LogGumbel para definir posteriormente la relación entre el período de retorno y la aceleración máxima a nivel de roca.

Los valores de aceleración encontrados para un período de retorno de 475 años se comparan con los encontrados tanto en la NSR-98 (AIS, 1996) como en su revisión (NSR-10).

Una vez obtenidos los valores para cada sitio se procede a elaborar el mapa de amenaza sísmica con período de retorno de 475 años, para finalmente compararlo con el vigente para el territorio nacional.

El grado de detonante sismo en la generación de movimientos en masa se toman los valores de PGA (cm/seg<sup>2</sup>) que correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, localmente el Municipio de Santa Maria mediante el mapa nacional de amenazas tiene un valor de PGA 475 donde correspondiente a 360, de acuerdo con el PGA , su clasificación es muy alta con el máximo valor 5 (Tabla 38).

Figura 35: Valor de Aceleración máxima horizontal a nivel de roca - PGA475 del Municipio de Santa Maria en el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Geoportal SGC .

<sup>28</sup> Servicio Geológico Colombiano. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Vol.2.Bogota. Agosto 2013.

Tabla 38: Calificación del detonante sismo según su contribución a movimientos en masa.

Valores de PGA475 (cm/seg <sup>2</sup> )	Calificación
10-100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

Fuente: Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

### 9.3 ZONIFICACION FINAL DE AMENAZAS

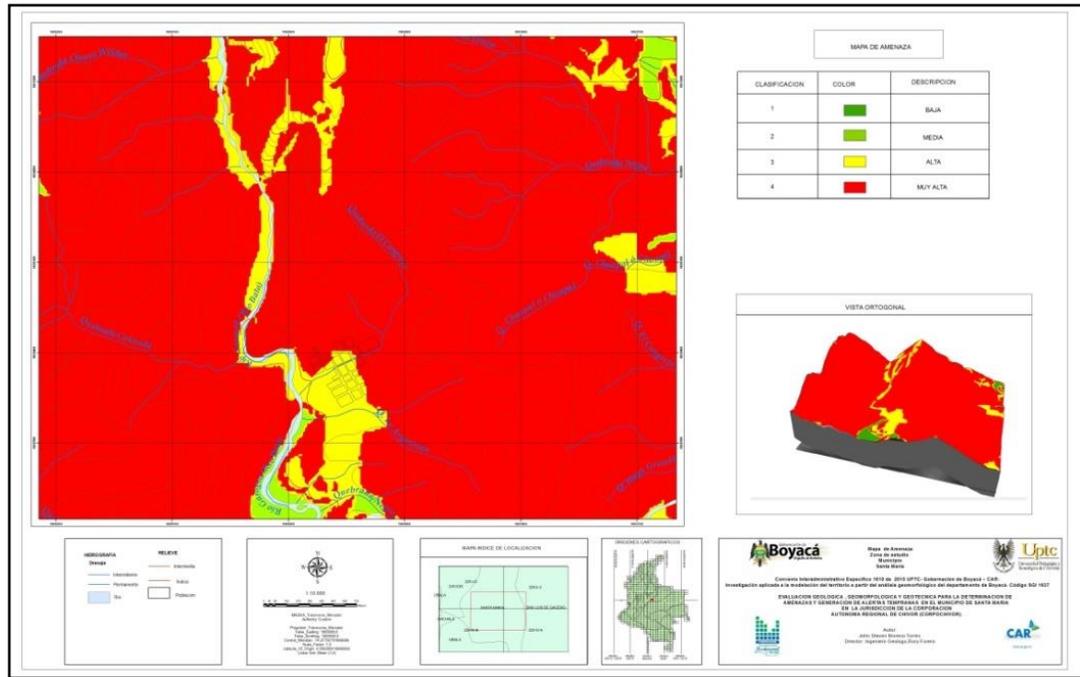
Estos escenarios muestran la contribución que cada uno de los detonantes tiene sobre las zonas susceptibles a los movimientos en masa, involucrando además indicadores, obtenidos de la observación, datos de campo e información secundaria, en cuanto a los tipos de procesos y daños que se pueden originar, así como de otras causas contribuyentes a las condiciones de inestabilidad<sup>29</sup>

Los análisis detallados de amenaza por movimientos en masa se deben desarrollar para aquellas zonas que hayan quedado clasificadas como de amenazas altas y media en el estudio básico de amenaza, de acuerdo con el procedimiento y los criterios establecidos anteriormente. Además de los insumos requeridos para los estudios básicos de amenaza (cartografía básica digital, geología para ingeniería, elementos geomorfológicos, inventario de movimiento en masa, cobertura y uso del terreno, exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio), en el análisis detallado de la amenaza hay que incluir el análisis de secciones y factores detonantes teniendo en cuenta los detonantes lluvia y detonante sísmico una ponderación del 100%.

La amenaza en el área de estudio se encuentra en los rangos de amenaza media, alta y muy alta (Figura 37) .

<sup>29</sup> : Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000

Figura 36: Mapa de amenaza



Fuente: Estudio

Amenaza alta: Son segmentos del territorio en donde existe una alta probabilidad de afectación por la ocurrencia de procesos de remoción en masa, las condiciones de ubicación de viviendas y demás bienes en la parte baja de procesos activos o sobre su área de influencia. Son viviendas e infraestructuras sobre depósitos fluviales, vaguadas de escorrentía o laderas de alta pendiente, en las cuales no existe una cultura de prevención la vulnerabilidad aceleran la ocurrencia de un desastre. Estas áreas de amenaza alta se encuentran principalmente en el casco urbano (Fotografía 17).

Amenaza muy alta: Corresponde al 90% del área de estudio que actualmente presentan procesos de remoción en masa activos la Quebrada Argentina y caño Cangrejo que principalmente afectan a la casco urbano de Santa María, así también como ejes viales y en los que existe la posibilidad de intensificación y ocurrencia de desastres de mayor magnitud si no se intervienen y socializan en el corto plazo. Estas áreas están ligadas al levantamiento de los movimientos en masa activos como La Argentina y Caño Cangrejo.

Fotografía 17: Se puede evidenciar que la quebrada Caño cangrejo desarrolla diferentes procesos de movimientos en masa y la amenaza alta que ocasiona en una de las calles principales del casco urbano de Santa María (N1029949, E1090925)



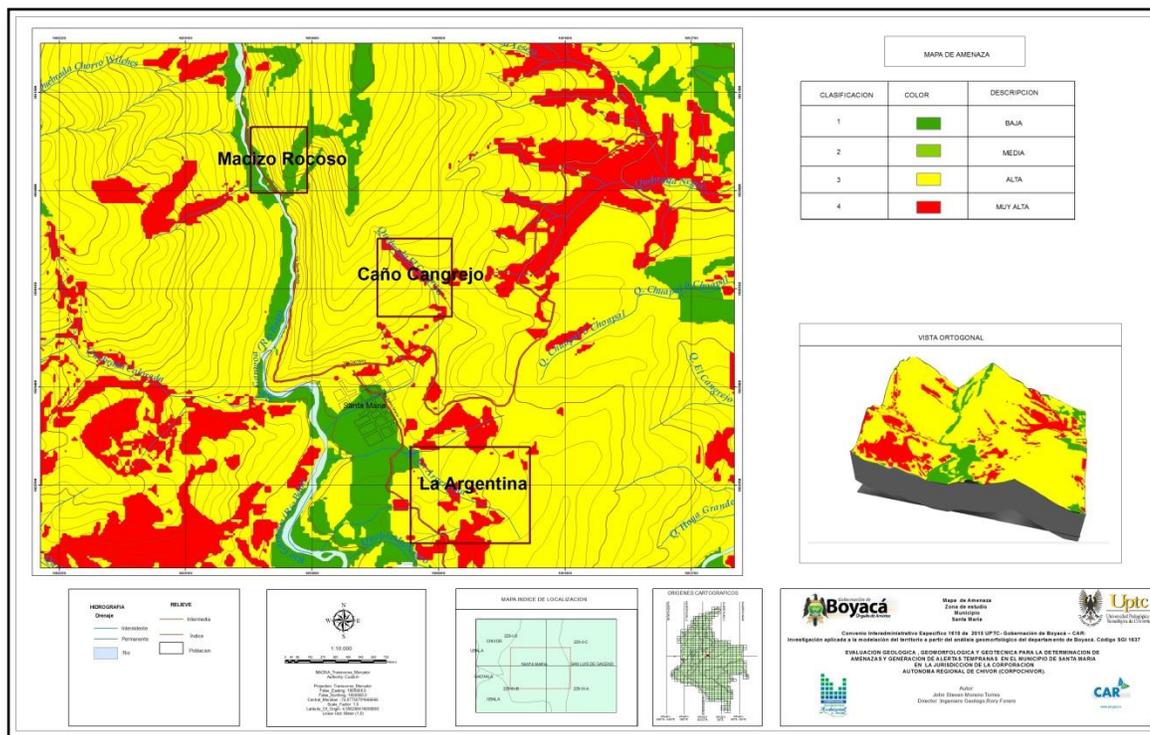
Fuente: Estudio

### 9.3 Propuesta sistemática para el valor climático

En el desarrollo de este capítulo donde se plantea la amenaza de un sitio o lugar, siguiendo un proceso analítico del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local donde se aplicada la propuesta metodológica del Servicio Geológico Colombiano 2012, ya que esta da un valor de un 100% al detónato sismo y detónato climático dado que por la escala que se manejó a 1:10.000 se aprecia que esa ponderación no nos da un grado de detalle alto que requiere el estudio (ANEXO F).

Se propone dar un porcentaje de 80 % al detónato sismo y climático por lo cual se puede evidenciar el cambio significativo en el grado de detalle cómo se muestra en la (figura 37).

Figura 37: Mapa de amenaza con de 80 % al detónate sismo y climático



Fuente: Estudio

Teniendo en cuenta el porcentaje para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa, las zonas de mayor importancia por la corporación autónoma regional (Corpochivor) que generan una amenaza por movimientos en masa, vistas en el reconocimiento en campo y los parámetros descritos en el atributo morfodinámico corresponde a la evaluación con la disminución de los efectos detonantes a un 80%, donde se identifican los movimientos en masa descritos y sectorizados por (Corpochivor) en el mapa de amenaza (Figura 37) como zonas de amenaza alta a muy alta, y el curso de del Rio Bata como zona de amenaza baja, por tanto este se presenta como el modelo adecuado para la zonificación de amenaza por movimientos en masa; esto no quiere decir que para todos los estudios de amenaza a una escala detallada se tenga que desarrollar con una ponderación del 80% ya que esta puede variar según la necesidad de grado de detalle que se requiera y se ajuste con la realidad.

El resultado de este análisis de Amenaza, pretende convertirse en un instrumento técnico-administrativo para el posterior análisis detallado de gestión de riesgo y en consecuencia la elaboración del plan local de emergencias. De igual manera, proporcionara información importante para ser utilizada en el ordenamiento territorial del municipio, tal como la zonificación del uso de suelo, sobre la base de su nivel o susceptibilidad a las amenazas.

## 10. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA

En este proyecto de investigación propone determinar las propiedades físico mecánicas de los fenómenos de remoción en masa , donde se identifican los movimientos en masa descritos y sectorizados por (Corpochivor) en el mapa de amenaza (Figura 37), que se han generado en la zona de estudio ya que este tipo de fenómeno se viene extendiendo a lo largo y ancho de todo el país debido a la alta ola invernal ya que este es el principal detonante que se está presentando en la actualidad, por lo tanto se han recopilado estudios donde han realizado ensayos directos e indirectos para así determinar las causas del problema de los diferentes movimientos en masa ,de gran importancia en la zona de estudio.

Los siguientes fenómenos de remoción en masa descritos y sectorizados por (Corpochivor) se encuentra en amenaza alta a muy alta son:

- Deslizamiento La Argentina
- Deslizamiento Caño Cangrejo
- Clasificación de Macizo Rocosó

La caracterización geotécnica y geomecánica consistió en determinar los parámetros aplicables a la determinación de factores de seguridad mediante la toma de datos en campo y la realización de diferentes ensayos de laboratorio e interpretación de los materiales involucrados; en el macizo rocoso desea saber el comportamiento geomecánico y la dirección preferencial de las familias de diaclasas.

### 10.1.1 Antecedentes

Teniendo cuenta que el deslizamiento de La Argentina cuenta con tomografía, sondeos y ensayos de laboratorio realizados en estudios anteriores por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) 2012; Caño Cangrejo cuenta con monitoreo constante en niveles piezométricos, mojones y precipitaciones (Estación Santa María IDEAM).

## 10.2 TRABAJO DE CAMPO

Como complemento al trabajo realizado por parte de la Corporación Corpochivor, se realizó una visita de campo a las diferentes áreas donde presenta una gran importancia por la Corporación Corpochivor, del día 7 al 19 de Octubre de 2015, se realizó toma de datos estructurales y diaclasas, datos tomados en las diferentes unidades geológicas encontradas en el área de estudio.

## **10.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA DESLIZAMIENTO LA ARGENTINA:**

### **10.3.1 Localización**

El área de afectación del deslizamiento La Argentina se encuentra al Surestes de la cabecera municipal de Santa María en las coordenadas E1091.699, N 1028563; en la vereda Carichana, el área de estudio es de 132302 m<sup>2</sup>.

### **10.3.2 Descripción del problema**

El sitio presenta problemas geotécnicos e externos e inherentes por naturaleza como son hundimientos topográficos del terreno pérdida de la bancada de la vía existente, pendiente alta, escorrentía, deforestación, aguas superficiales y los materiales no consolidados del terreno, que contribuyen a la inestabilidad del sector siendo estos los principales inconvenientes geotécnicos desfavorables para la inestabilidad del deslizamiento.

#### **10.3.2.1 Factores detonantes**

Factores detonantes se puede indicar principalmente la saturación de los materiales involucrados, que conforma la parte baja y media del deslizamiento, originado por el aumento en la escorrentía superficial y subsuperficial, teniendo en cuenta las temporadas invernales que han detonado a la ocurrencia de movimiento y en especial a las precipitaciones de los últimos 6 años, además que en el sitio de estudio se puede evidenciar irrigación por lo cual genera un incremento en la saturación en la zona. El incremento en el nivel de humedad de los materiales afectados, genera un incremento de su peso, que vence su capacidad de resistencia y provoca la falla de la talud.

#### **10.3.2.2 Factores contribuyentes**

Factores contribuyentes que se evidenciaron, la deforestación, irrigación, falta de control de drenajes de aguas de escorrentía superficial ya que este ejerce un proceso lento de erosión socavación y saturación del material lo que incrementa la susceptibilidad del deslizamiento.

Las formaciones superficiales recientes de material sueltos e inconsolidados que se encuentran en la zona, como son los depósitos cuaternario de tipo residual principalmente, al igual la formación lutitas de Macanal que se evidencia en la zona de estudio presenta una susceptibilidad alta ya que es un material que con el contacto con el agua presenta una fractura miento alto.

En el área de estudio se presentó un deslizamiento de gran magnitud donde se evidencia la afectación de la red vial. La situación descrita puede observarse en la siguiente (fotografía18).

Fotografía 18: Afectación vía



Fuente: Estudio

### **10.3.3 Geología**

En la vereda Carichana donde se presentan los diferentes fenómenos de remoción en masa (FRM), aflora Cuaternario de tipo Residual y la formación Lutitas de Macanal.

#### **10.3.3.1 Cuaternario residual:**

Es el resultado de una serie de procesos denudativos por meteorización, que se han dado en la zona de estudio y que actuaron sobre las formaciones preexistentes. Sobre este depósito se encuentran ubicados gran parte de las zonas inestables que puede alcanzar un espesor de 8 a 10 metros.

#### **10.3.3.2 Formación Lutitas de Macanal:**

La formación Lutitas de Macanal aflora en la parte baja del deslizamiento constituido por rocas sedimentarias principalmente por lutitas grises moderadamente meteorizadas las cuales se encuentran plegadas por la influencia de la falla de Santa María.

### **10.3.4 Geomorfología**

#### **10.3.4.1 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft)**

Esta unidad geomorfológica se localiza a la margen derecha e izquierda de la quebrada argentina se encuentra asociado a depósitos coluviales, compuesto principalmente por bloques angulares a subangulares, gravas y arenas embebidos en una matriz arcillosa, su estructura es de forma de lóbulo o abanico

de morfología alomada de longitud muy larga y está relacionada con avalanchas torrenciales.

#### **10.3.4.2 Cauce aluvial (Fca):**

Esta unidad geomorfológica se localiza a lo largo de la quebrada La Argentina, Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes eternas o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas (Fotografía 19).

Fotografía 19: Quebrada La Argentina se evidencia cause aluvial y diferentes deslizamientos en la margen derecha e izquierda.



Fuente: Estudio

### **10.3.5 Exploración indirecta**

#### **10.3.5.1 Geofísica**

Las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER) son métodos geofísicos indirectos de exploración o Ingeniería Geofísica, los cuales están constituidos por una serie de técnicas que permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas en los materiales que forman la corteza terrestre tales como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de las ondas elásticas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras. La medición y distribución de estas variaciones, permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los

que se conocen las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática.

La Tomografía Eléctrica Resistiva es una técnica geofísica indirecta que permite generar secciones o perfiles del subsuelo en base a mediciones de caída de potencial eléctrico. Éste método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual, regresa al voltímetro en forma de una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) producto de las variaciones en resistencia que resultan de cada tipo de material o estrato de suelo (Tabla 39); sabiendo de antemano que cada tipo de material tiene diferente manera a “resistir” una corriente eléctrica, los buenos conductores o materiales humedecidos presentan una resistencia baja a la inyección de corriente, mientras que materiales aislantes presentan resistencias eléctricas mayores. Lo anterior, es relativo a diversos parámetros geológicos como el contenido mineralógico y de humedad, así como la porosidad y grado de saturación de agua dentro del material de estudio. Los Estudios de Resistividad Eléctrica han sido utilizados en investigaciones sobre hidrogeología, geotecnia y también actualmente en estudios ambientales (Loke 2004).

Tabla 39: Resistividad de diferentes materiales

Material	Resistividad ( $\Omega m$ )
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

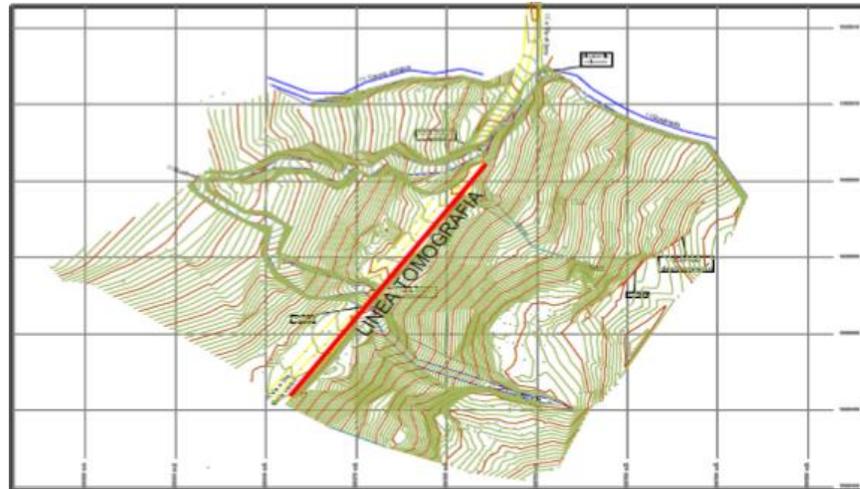
Fuente: Exploración Geotécnica-Relaciones Geoelectricas- DANIEL EDUARDO

### 10.3.5.2 Tomografía

La Corporación Autónoma Regional De Chivor (CORPOCHIVOR), en el área de estudio ha realizado estudios de exploración directa en el área de estudio se localizo en la parte alta del deslizamiento Coordenadas parte inicial X: 1091712, Y: 1028586, parte final X: 1091648, Y: 1028496, orientación N36°E, con una

longitud de 102.5 mts., profundidad obtenida de 18.4 mts., y los electrodos conectados a una distancia de 2.50 mts cada uno, Figura 38.

Figura 38: Ubicación de la tomografía en el área de estudio



Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda Carichana, municipio de Santa María jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR)

### 10.3.5.3. Análisis de resultados de la tomografía

El resultado de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos. Para obtener estos resultados se procede a insertar los parámetros para el cálculo y la medición de las resistividades en campo, utilizando el método o dispositivo de Wenner.

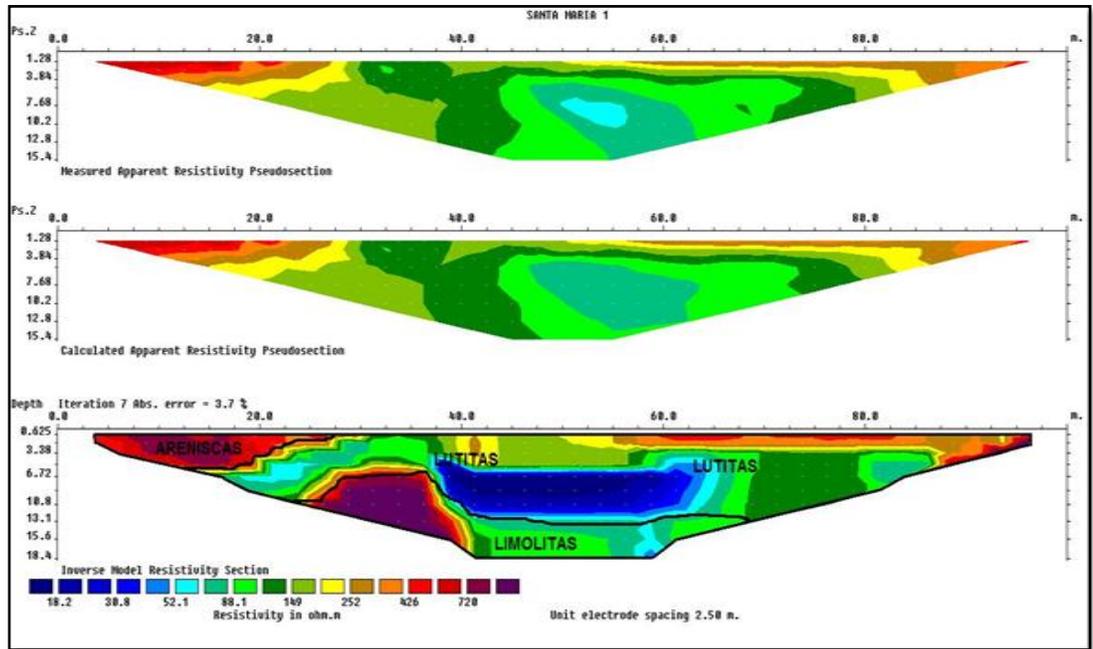
Para la realización de las tomografías en el sector vereda Carichana, del municipio de Santa María, se utilizó el equipo TERRAMETER LS 04-064-250 propiedad de la U.P.T.C., con 2 carretes de 210 más cada uno, 41 electrodos conectados cada uno respectivamente al equipo, para obtener así la siguiente línea con su respectivo análisis (Tabla 40) y (Figura 39).

Tabla 40: Resistividades de los materiales presentes en el área de estudio.

MATERIAL	PROFUNDIDAD	RESISTIVIDAD	INTERPRETACIÓN
1	0.625 – 13.1	18.2 – 88.1	Lutitas
2	6.72 – 18.4	88.1 – 252	Limolitas
3	0.625 – 6.72.	253 - 720	Areniscas

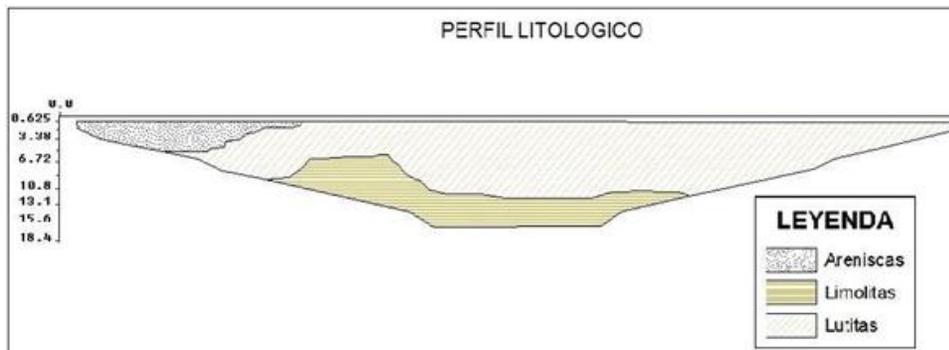
Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda Carichana, municipio de Santa María jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR).

Figura 39: Perfil 1 tomografía.



Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda carichana, municipio de santa Maria jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor).

Figura 40: Perfil Litológico



Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda carichana, municipio de santa Maria jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor).

Con ayuda del software Res2DINX64, se relacionaron datos de las respectivas resistividades de los materiales del área obtenidas por el equipo, resultando así el modelamiento del talud, donde se observan que el área está conformada por tres unidades Geoelectricas bien definidas, donde encontramos niveles de lutitas con rangos de resistividades que oscilan entre 18.2 – 88.1 \*m, Limolitas con resistividades que van desde 88.1 – 252 \*m, y finalmente intercalación de areniscas saturadas y no saturadas que poseen resistividades que oscilan entre 253 - 720 \*m, (Figura 40).

### 10.3.6 EXPLORACIÓN DIRECTA

#### 10.3.6.1 Sondeos

Para conocer el perfil litológico , las propiedades geomecanicas de las capas y posición del nivel freático se realizaron 2 perforaciones (Tabla 41) de acuerdo con la norma NSR-10 Capitulo H ,se realizaron en tiempo lluvioso hasta alcanzar un profundidad máxima de 7 metros , en cada perforación se efectuó un muestreo representativo de los diferentes estratos o capas, tomado muestra alteradas (bolsa ), muestras semi alteradas con Splint Spoon (cuchara partida ) y muestras inalteradas con tubo de pared delgada (Shelby) simultáneamente con la exploración y el muerto se efectuó los siguientes ensayos de campo (Anexo G):

Penetración estándar (SPT) para medir la resistencia al corte del al corte comparativo, mediante penetrometro de bolsillo, tipo RPI Y RPR.

Tabla 41 : Coordenadas de los sondeos realizados

Sondeo	SANTA MARÍA Coordenadas		Profundidad (metros)
	Este	Norte	
sondeo 1	1,091,699	1,028,563	6,8
sondeo 2	1,091,660	1,028,525	7

Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda Carichana, municipio de santa Maria jurisdicción de la corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor).

#### 10.3.6.2 Nivel freático

El nivel freático se encontró en los sondeos realizados a una profundidad promedio de 2 metros respecto a la topografía, este comportamiento obedece a la presencia de niveles arenosos en el perfil del suelo y al cauce de la quebrada Argentina por lo cual el material presenta tendencia a la saturación, con la consecuente resistencia del suelo.

### **10.3.7.1 TRABAJO DE LABORATORIO**

Para la obtención de las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas) de los diferentes materiales encontrados en los sondeos, en el laboratorio de suelos, rocas y agregados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) se realizaron los siguientes ensayos:

#### **10.3.7.1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO**

Todas las muestras se identificaron en campo y en el laboratorio y se realizaron los siguientes en ensayos (Anexo g):

- Humedad Natural
- Peso unitario total y seco
- Corte directo
- Compresión inconfiada
- Granulometría
- Límites de Atrerberg

### **10.3.8 Resultados de Laboratorio**

En general los ensayos realizados reflejan la particularidad de materiales finos en el subsuelo según la Carta de Clasificación de Casagrande, los suelos fueron clasificados dentro del grupo CL (material limoso de baja plasticidad) correspondientes al material de relleno, arcillas limosas, con peso unitario de 1.8–2.46 gr/cm<sup>3</sup>, con limite líquido < 48% e IP entre 11% y 26%.

Los resultados de las propiedades mecánicas reflejan una resistencia a la compresión simple de 1.35 kg/cm<sup>2</sup>, cohesión de 0.24 – 0.6 Kgf/cm<sup>2</sup>, ángulos de fricción de 17°. Estos resultados de las propiedades físicas y mecánicas se utilizaron para el análisis de estabilidad. En el (Anexo G), se presentan los formatos correspondientes a los ensayos de laboratorio, de los cuales se presenta una tabla resumen.

### **10.3.8 Análisis de estabilidad del talud deslizamiento La Argentina**

El fenómeno de Remoción en Masa que se presenta en el área de estudio corresponde a un movimiento relativamente superficial o semiprofundo, clasificándose como un deslizamiento compuesto, que involucra dos o más

mecanismos de falla. El deslizamiento de estos materiales han ocurrido de manera progresiva y súbita, presentando pausas temporales, razón a la fecha se ha tiene un cierre total a la vía que comunicaba la cabecera municipal con la vereda Carichana y en la parte baja del deslizamiento donde se evidencia un enjambre de deslizamientos generados por la socavación de la pata del talud por la quebrada La Argentina.

Analizada la geología, el comportamiento de los diferentes materiales encontrados en campo, el subsuelo y el talud en general podemos asumir un modelo que explique el comportamiento de los componentes del talud.

El problema costa de un deslizamiento compuesto, abarcando un área de 0.44km<sup>2</sup> de longitud de 0.97km y de ancho de 0.50km en el cual está involucrado materia de cuaternario de tipo residual, manifestándose en la corona con el hundimiento y pérdida de la vía, agrietamientos sucesivos, socavación en la pata del talud y generación enjambre de deslizamientos en la margen derecha e izquierda de la quebrada La Argentina.

Teniendo en cuenta que el deslizamiento no cuenta con un monitoreo en el nivel se tomó en cuenta como referencia el nivel freático encontrado en los sondeos, se tomaron tres niveles piezómetro diferentes (Tabla 42), para calcular el factor de seguridad en las condicione más críticas, por los métodos de Bishop, Jambu utilizando aplicación del software SLIDE

Tabla 42: Niveles piezómetros tenidos en cuenta para el análisis de talud

MESES	NIVEL FREATICO
JULIO	4,68
SEPTIEMBRE	7,25
NOVIEMBRE	2

Fuente: Estudio

### 10.3.9 La modelación del deslizamiento La Argentina mediante SLIDE

En la modelación mediante SLIDE se debe de tener en cuenta que las condiciones actuales de los materiales han cambiado y se encuentran parcialmente más húmedos o secos en comparación al momento en el que se generó el movimiento, sin embargo esta humedad puede ser variable por lo que se tuvo como referencia los diferentes niveles freático (tabla43), por lo tanto el factor de seguridad puede disminuir o aumentar considerablemente en condiciones más saturadas, lo cual no garantiza la estabilidad del talud a través del tiempo.

Estos modelos fueron analizados bajo condiciones extremas, esto es en condición de saturación y de sismo. El sismo fue modelado introduciendo el valor de la aceleración de diseño establecido para Santa María por la NSR-10, siendo de 0.30 y 0.25 (Figura 41).

Figura 41: Coeficientes de aceleración sísmica para el departamento de Boyacá

Municipio	Código Municipio	A <sub>a</sub>	A <sub>v</sub>	Zona de Amenaza Sísmica	A <sub>e</sub>	A <sub>d</sub>
Tunja	15001	0.20	0.20	Intermedia	0.15	0.07
Almeida	15022	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
Aquitania	15047	0.25	0.30	Alta	0.16	0.08
Arcabuco	15051	0.20	0.20	Intermedia	0.09	0.05
Belén	15087	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
Berbeo	15090	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
San José de Pare	15664	0.15	0.20	Intermedia	0.11	0.06
San Luis de Gaceno	15667	0.35	0.30	Alta	0.16	0.07
San Mateo	15673	0.25	0.25	Alta	0.16	0.08
San Miguel de Sema	15676	0.15	0.20	Intermedia	0.09	0.05
San Pablo Borbur	15681	0.15	0.15	Intermedia	0.16	0.08
San Rosa Viterbo	15693	0.20	0.25	Alta	0.16	0.08
Santa María	15690	0.30	0.25	Alta	0.16	0.08
Santa Sofía	15696	0.15	0.20	Intermedia	0.09	0.05

Fuente: Título A, NSR-10.

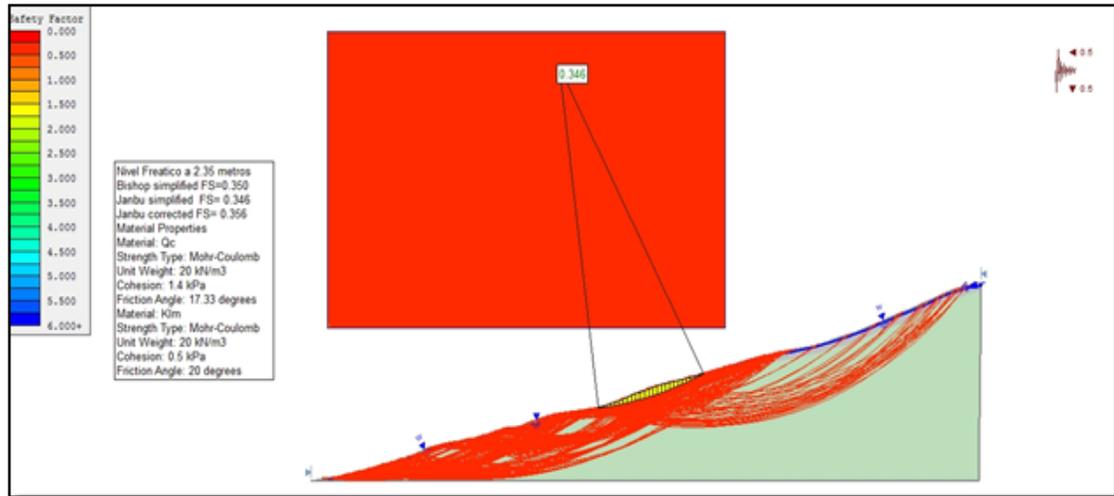
Teniendo en cuenta el perfil del deslizamiento, los tres niveles freáticos tenidos en cuenta (tabla42) y las diferentes características de los materiales (Tabla43), se calculó el factor de seguridad por Bishop y Jambu son:

Tabla 43: Materias con sus propiedades

PROPIEDADES		
TIPO DE MATERIA	COHESION (kPa)	FRICCION
1 GC-GW	1,4	17,3
2CL	0,24	17

Fuente: Elaboración de estudio de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y diseño de obras de estabilización en la vereda Carichana, municipio de Santa María jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (corpochivor).

Figura 42: Modelamiento con un nivel freático de 2 metros.



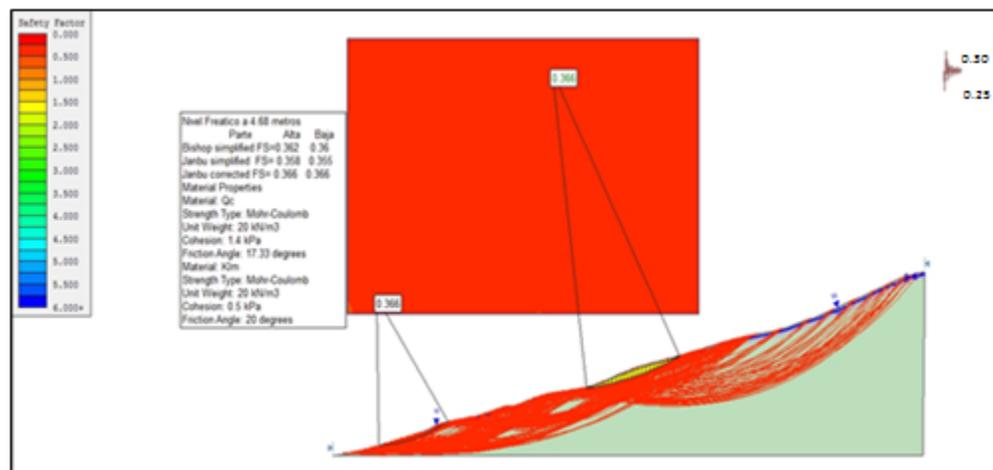
Fuente :Estudio

Tabla 44: Resultados Fs, nivel freático de 2 metros

Factores de seguridad	
Bishop simplified	0,28
Janbu simplified	0,276
Janbu corrected	0,281

Fuente: Estudio

Figura 43: Modelamiento con un nivel freático de 4.68 metros



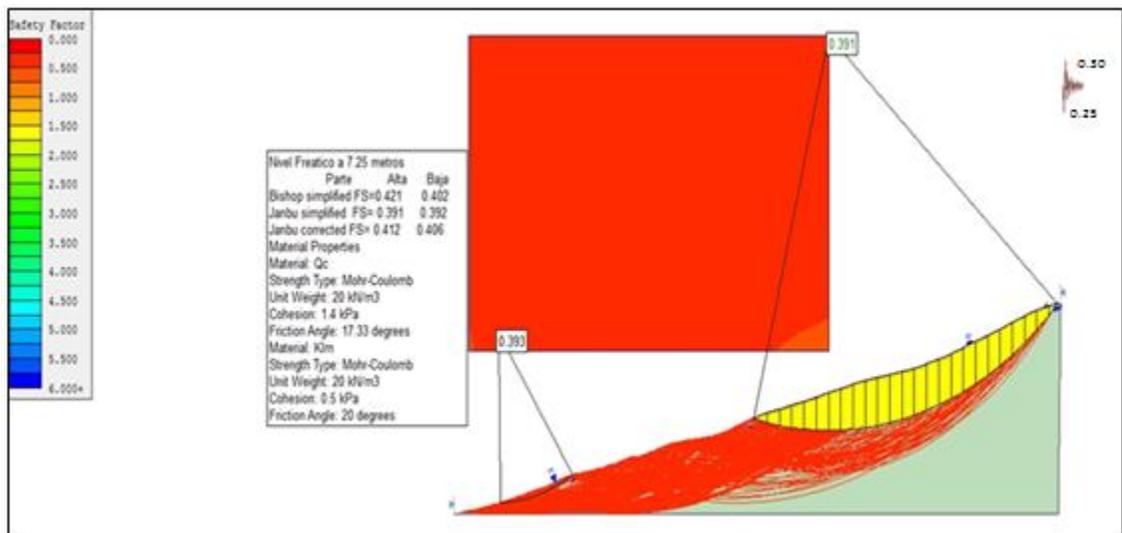
Fuente :Estudio

Tabla 45: Resultados Fs, nivel freático de 4.68 metros

Factores de seguridad		
	Alta	Baja
Bishop simplified	0,362	0,36
Jambu simplified	0,358	0,355
Jambu corrected	0,366	0,366

Fuente: Estudio

Figura 44: Modelamiento con un nivel freático de 7.25 metros



Fuente :Estudio

Tabla 46: Resultados Fs, nivel freático de 7.25 metros.

Factores de seguridad		
	Alta	Baja
Bishop simplified	0,421	0,402
Jambu simplified	0,391	0,392
Jambu corrected	0,412	0,406

Fuente :Estudio

### 10.3.9.1 Análisis de modelamiento software Slide

De acuerdo con los análisis realizados en la zona presenta problemas de inestabilidad ya que todos los valores de factor de seguridad en los diferentes métodos es menor a 1.5; teniendo en cuenta la (tabla 47) el valor de la amenaza donde se toma en cuenta el factor de seguridad el deslizamiento presenta una amenaza alta; de

acuerdo con el mapa de amenaza (Figura 37) en el sector del deslizamiento se encuentra en una amenaza alta a muy alta.

Tabla 47: Valore de amenaza

AMENAZA POR FENOMENOS DE REMOCIÓN EN MASA	FACTOR DE SEGURIDAD EN CONDICIÓN EXTREMA
BAJA	FS > 1.30
MEDIA	1.3 > FS > 1.0
ALTA	FS < 1.0

Fuente: Amenaza por fenómenos de remoción en masa amenaza factor de seguridad en condición extrema.

### 10.3.10 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOTÉCNICA DESLIZAMIENTO CAÑO CANGREJO:

#### 10.3.10 Localización

El área de afectación de deslizamiento de Caño Cangrejo es de 75.226 km<sup>2</sup> se en cuenta ubicado al Noreste en las coordenadas N1029949 -E1090925 en la vereda Centro.

#### 10.3.10.1 Descripción del problema:

El sitio presenta problemas geotécnicos e externos y inherentes por naturaleza como son hundimientos topográficos del terreno, pendiente alta, escorrentía, deforestación, aguas superficiales y los materiales no consolidados del terreno, que contribuyen a la inestabilidad del sector siendo estos los principales inconvenientes geotécnicos desfavorables para la inestabilidad del deslizamiento.

#### 10.3.10.2 Factores detonantes

Factores detonantes se puede indicar principalmente la saturación de los materiales involucrados, que conforma la parte baja y media del deslizamiento, originado por el aumentó en la escorrentía superficial y subsuperficial , teniendo en cuenta las temporadas invernales que han detonado a la ocurrencia de movimiento y en especial a la precipitaciones de los últimos 6 años, El incremento en el nivel de humedad de los materiales afectados, genera un incremento de su peso, que vence su capacidad de resistencia y provoca la falla de le talud.

### **10.3.10.3 Factores contribuyentes**

Factores contribuyentes que se evidenciaron, la deforestación, irrigación, falta de control de drenajes de aguas de escorrentía superficial ya que este ejerce un proceso lento de erosión socavación y saturación del material lo que incrementa la susceptibilidad del deslizamiento.

Las formaciones superficiales recientes de material suelto e inconsolidados que se encuentran en la zona, como son los depósitos cuaternarios de tipo residual, coluvial y la formación Bata.

### **10.3.11 GEOLOGIA**

**10.3.11.1 Depósito coluvial:** Corresponden a depósito de ladera provenientes de antiguos movimientos en masa, Se originan por procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales, en suelos saturados y no saturados. Los coluviones son depósitos heterogéneos, matriz soportados a clasto soportado, suelto, que se caracterizan por presentar fragmentos con bloques angulosos, y no han presentado movimientos o reactivaciones recientemente.

#### **10.3.11.2 Deposito residual:**

Es el resultado de una serie de procesos denudativos por meteorización, que se han dado en la zona de estudio y que actuaron sobre las formaciones preexistentes. Sobre este depósito se encuentran ubicado gran parte de las zonas inestables que puede alcanzar un espesor de 1 a 4 metros vistos en campo .

#### **10.3.11.3 Formación Bata (Jb) Berriasiano:**

La Formación Bata es una unidad propuesta por Rodríguez y Ulloa constituida por un conjunto consta de conglomerado de color verde a violeta, matriz-soportado, de guijos y guijarros, dispuesto en capas muy gruesas tabulares a lenticulares; el conglomerado es de cantos de limolitas y arenita, subangulares y subredondeados, con moderada selección y fuertemente cementados; la matriz es de arena media a gruesa de color rojo violáceo. Intercalados con estos, se encuentran arenitas de cuarzo de grano muy fino, subangular, en capas medianas tabulares a lenticulares, color gris claro a verde claro, con buena selección y compactadas en la zona q aflora 1.5km de la cabecera municipal de la vía que conduce al municipio de Garagoa.

### **10.3.12 GOMOMORFOLOGIA**

#### **10.3.12.1 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft):**

Esta unida geomorfológica se localiza a la margen derecha e izquierda de Caño Cangrejo se encuentra asociado a depósitos coluviales compuesto

principalmente por bloques angulares a subangulares, gravas y arenas embebidos en una matriz arcillosa, su estructura es de forma de lóbulo o abanico de morfología alomada de longitud muy larga y está relacionada con avalanchas de avenidas torrenciales.

#### **10.3.12.2 Cauce aluvial (Fca):**

Esta unidad geomorfológica se localiza a lo largo de Caño Cangrejo, dado a materiales de los Depósitos Aluviales (Qal) constituidos por gravas, arenas y lodo, la unidad se relaciona dentro de macizos rocosos o dentro de sedimentos aluviales y depende de factores como la pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Cuando la corriente fluye en macizos rocosos se da un proceso básico de erosión, en tallado a dicho macizo y moviéndose lateralmente dentro de rocas menos resistentes. (Fotografía 19).

Fotografía 19: Deslizamiento Caño Cangrejo (N1029949, E1090925)



Fuente: Estudio

#### **10.3.13 Monitoreo del deslizamiento de Caño Cangrejo:**

El sistema de monitoreo para el deslizamiento es monitoreado por la corporación autónoma regional de (Corpochivor), en el cual utilizo una combinación de componentes que permiten conocer de manera periódica los factores que pueden detonar en algún momento estos eventos; registra de forma básica la precipitación de la zona a través de pluviómetros o pluviógrafos y esta información se procesa constantemente para analizar la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, es decir una base de datos; además, implica un proceso de comunicación que debe permitir que toda la población en las áreas de incidencia conozca el comportamiento de las lluvias para poder en algún momento tomar medidas de preparación a partir de una interpretación técnica de la información. El sistema de monitoreo de los deslizamientos debe estar integrado por personas que cumplen la función de observadores voluntarios con el equipamiento y los

mecanismos de organización bien definidos para responder en los eventos relevantes.

Los deslizamientos pueden ocurrir a una velocidad muy lenta para ser observados. Por lo tanto, es necesario realizar mediciones cuidadosas para monitorear el movimiento, porque las lluvias excesivas o los sismos, la velocidad y el tipo de movimiento pueden cambiar espontáneamente.

### **10.3.13.1 Técnicas aplicada por (Corpochivor) para el monitoreo del deslizamiento Caño Cangrejo:**

#### **10. 3.13.1.1 Monitoreo Geotécnico:**

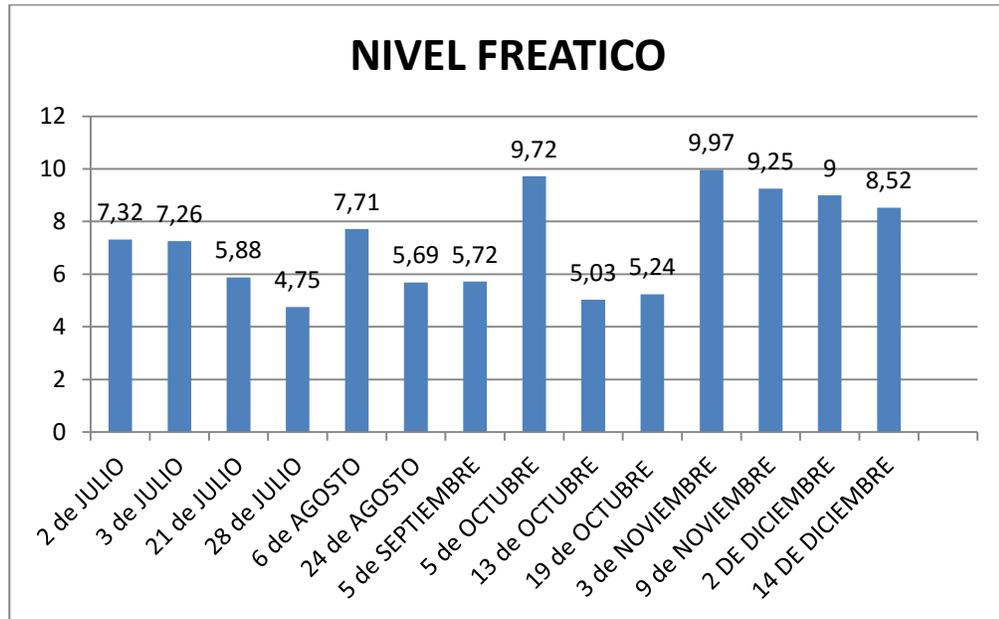
En la zona de estudio se instaló instrumentación para medir los nivel freático de agua, presión de poros del subsuelo como piezómetros en el cual se han tomado lecturas de nivel freático desde el 2 de julio hasta el 14 de diciembre del 2015 (Tabla 51) donde se puede comprobar la lectura correcta de los piezómetros con las precipitaciones diarias 24Hrs correspondiente a la estación Santa María (Grafica 6).

Tabla 48 Niveles freáticos (m)

<b>MESES</b>	<b>NIVEL FREATICO(m)</b>
JULIO	7.32
JULIO	7.26
JULIO	5.88
JULIO	4.75
AGOSTO	7.71
AGOSTO	5.59
SEPTIEMBRE	5.72
OCTUBRE	9.72
OCTUBRE	5.03
OCTUBRE	5.24
NOVIEMBRE	9.97
NOVIEMBRE	9.25
DICIEMBRE	9
DICIEMBRE	8.52

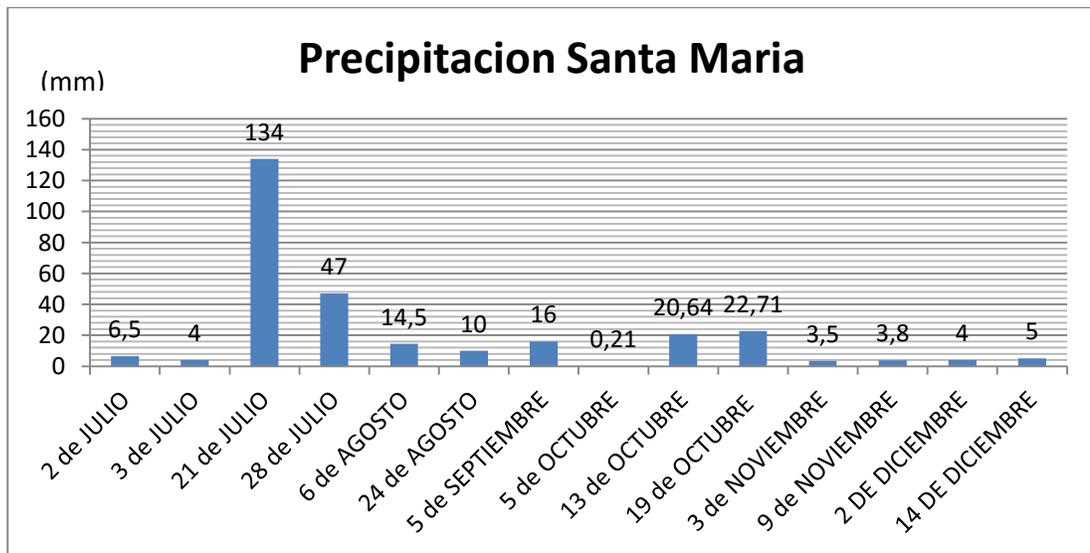
Fuente: Corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor).

Grafico 4: Niveles Freáticos



Fuente: Estudio

Grafico 5: Precipitaciones Santa Maria



Fuente: Estudio

Teniendo en cuenta que el nivel freático más saturado se en cuentan a 4.75 metros de la superficie (Grafica 4)y lo generan las precipitaciones de 28 de julio que son de 47mm(Grafica 5); por lo que debería relacionar con las precipitaciones del día 21 de julio ya que no se puede relacionar directamente debido a que la infiltración de estas aguas lluvia dependen de los tipo de material y sus propiedades de infiltración.

### 10. 3.13.1.2 Análisis de estabilidad del talud deslizamiento de Caño Cangrejo:

Conociendo los diferentes materiales y sus características de cada material dadas por la Corporación Autónoma Regional (Corphochivor) (Tabla52), y tomado como referencia tres niveles freáticos (Tabal 53), por tanto la Corphochivor hizo el siguiente análisis de estabilidad del talud de Caño Cangrejo.

Tabla 49: Materiales con sus características

PROPIEDADES		
TIPO DE MATERIA	COHESION (kPa)	FRICCION
1 GC-GW	0	35
2 SW-SP	1	35
3 SC-SM	1,2	10
4 CL-ML	1	15

Fuente: Corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor).

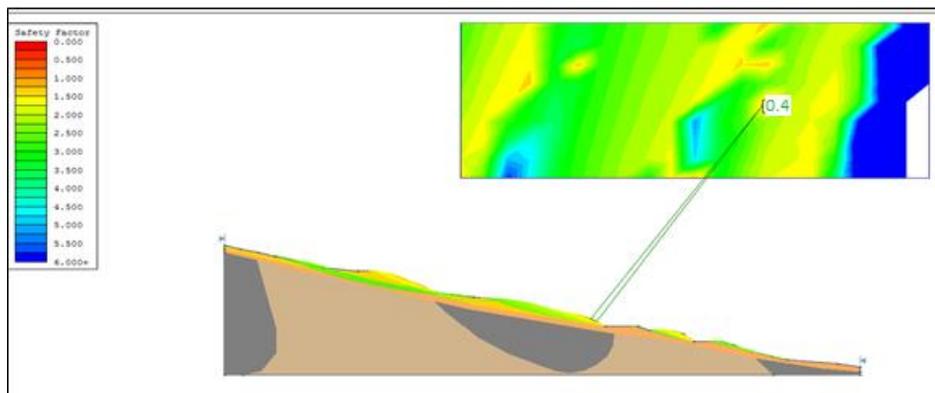
Tabla 50: Niveles Freáticos tenidos en cuenta para el análisis de talud

MESES	NIVEL FREATICO
JULIO	0,82
AGOSTO	2,41
NOVIEMBRE	4

Fuente: Corporación autónoma regional de Chivor (corpochivor)

Se tomaron en cuenta tres niveles piezométricos diferentes (tabla 54), para calcular el factor de seguridad en las condicione más críticas, por los métodos de Bishop, Jambu utilizando aplicación del software SLIDE son:

Figura 45: Modelamiento con un nivel freático de 0.8281 metros.



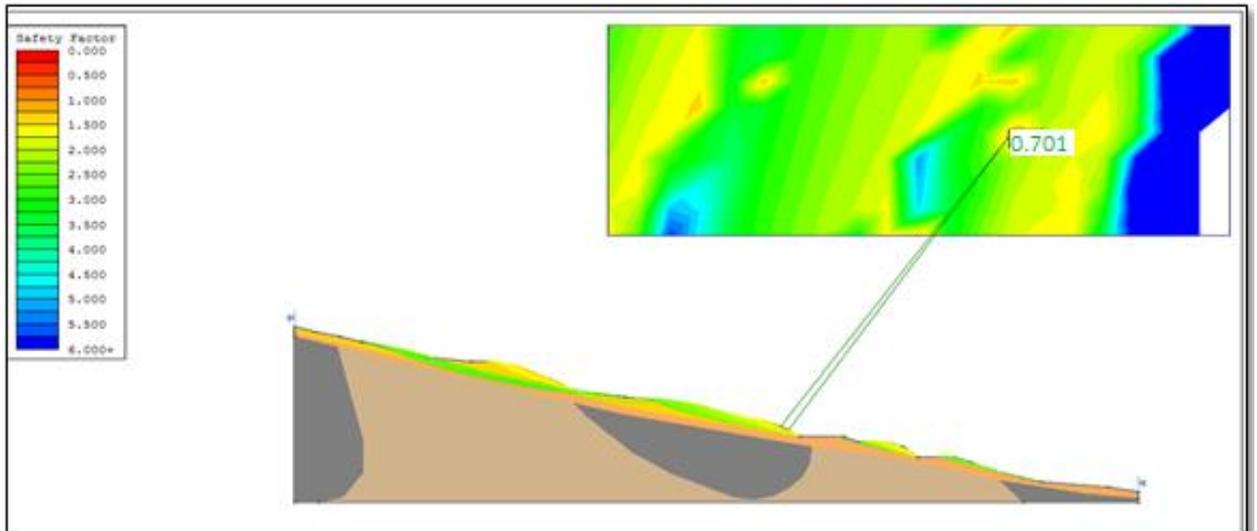
Fuente : Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

Tabla 51: Resultados Fs, nivel freático de 0.8281 metros.

Factores de seguridad	
Bishop simplified	0.398
Jambu simplified	0,389
Jambu corrected	0,4

Fuente: Estudio

Figura 46: Modelamiento con un nivel freático de 2.41 metros



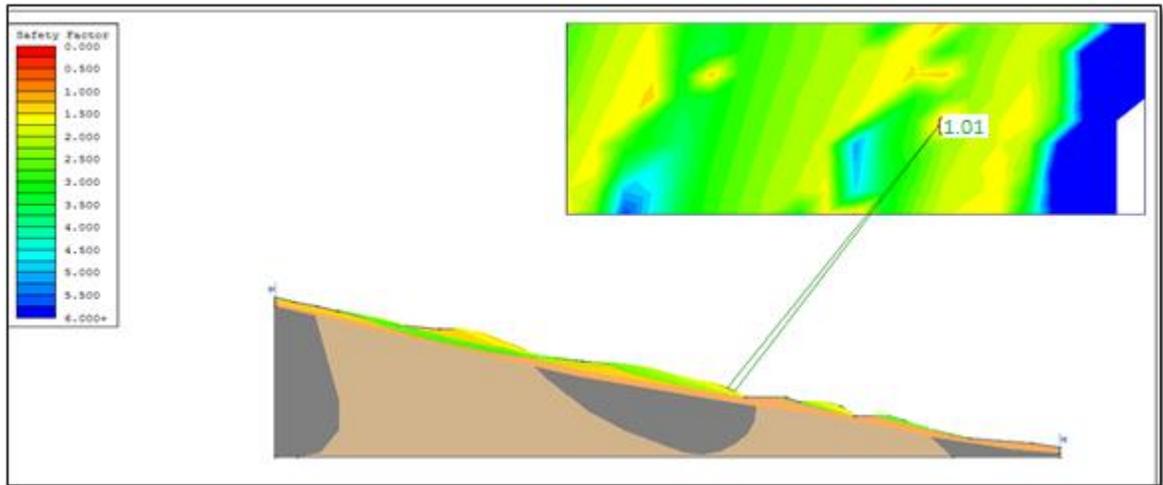
Fuente : Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

Tabla 52: Resultados Fs, nivel freático de 2.41 m

Factores de seguridad	
Bishop simplified	1
Jambu simplified	0,69
Jambu corrected	0,7

Fuente: Estudio

Figura 47: Modelamiento con un nivel freático de 4.m



Fuente :Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

Tabla 53: Resultados Fs, nivel freático de 4.m

Factores de Seguridad	
Bishop simplified	1
Jambu simplified	0,99
Jambu corrected	1,01

Fuente :Estudio

### 10. 3.13.1.3 Análisis de modelamiento

De acuerdo con los diferentes valores suministrados por (Corpochivor) como niveles freáticos, las diferentes características de los materiales y la realización de este modelo estático mediante software Slide, en la zona en general presenta problemas de inestabilidad ya que todos los valores de factor de seguridad es menor a 1.5.

### 10.3.14 PROPIEDADES GEOMECAICAS DE MACIZO ROCOSO

Para conocer los parámetros básicos de la roca y de las discontinuidades así como la estructura del macizo que incluye aspectos como el número de familias de discontinuidades existentes, el espaciado medio de los planos de discontinuidad, las características geomecánicas de las posibles fallas.

Desde el punto de vista de su aplicación en Ingeniería, las propiedades mecánicas de las rocas y de las discontinuidades geológicas, se pueden considerar suficientemente conocidas. Sin embargo los complejos entramados de

rocas y discontinuidades que se han dado en llamar macizos rocosos, aunque se ha hecho un gran esfuerzo para su estudio.

Dentro de las carencias de conocimiento de los macizos rocosos, asociadas a la complejidad de los mismos, existen distintos grados. En general, el comportamiento elastoplásticos de los macizos rocosos así como su criterio de rotura, se pueden estimar con un nivel de aproximación razonable. Esto junto con el hecho de que la mayor parte de los diseños en Ingeniería lo que pretenden es mitigar que se produzca la rotura, ha dado lugar a que la investigación de lo que pasa tras la rotura haya sido mucho menor que la enfocada a evitarla.

#### **10.3.14.1 Localización**

El macizo rocoso se localiza a la margen derecha a la altura kilómetro 3, de la vía de Santa María conduce a Garagoa en las coordenadas N 1.031.984, E: 1.089.465, Z: 810m.s.n.m).

Fotografía 20: Macizo a la margen derecha de la vía que comunica Santa María a Garagoa.



Fuente: El estudio.

### **10.3.14.2 Descripción del problema**

El análisis geomecánico del Macizo Rocoso requerido por (Corpochivor) es para determinar su calidad, las familias de diaclasas predominantes y sus posible probabilidad de mecanismo de falla.

### **10.3.14.3 Metodología para la clasificación de Macizo Rocoso**

#### **HOEKY BROWN GSI:**

Para la clasificación del macizo rocoso por HOEKY BROWN GSI, el (GSI) es un sistema para la estimación de las propiedades geo mecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo.

Las observaciones se basan el estado actual del macizo a nivel estructural se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufre las rocas .Para las condiciones de superficie se tiene en cuenta si esta alterada, si ha sufrido erosión o qué tipo de textura presenta y el tipo de recubrimiento existente.

PARA LA CALSIFICACION DE HOEKY Y BROWN respecto al uso del índice de GSI se de tener en cuenta lo siguiente:

- No es aplicable en aquellos casos en que el comportamiento del macizo rocoso presenta un claro control estructural. De hecho, cuando el macizo presenta solo dos sets de estructuras el criterio de Hoek-Brown (para el cual fue desarrollado el GSI) debe aplicarse con mucho cuidado.
- No considera la resistencia en compresión uniaxial de la roca intacta, ya que al evaluar la resistencia del macizo se incluyen los parámetros que definen el criterio de Hoek-Brown (si se incluyera se “contaría dos veces”).
- No considera el espaciamiento entre estructuras, ya que éste está implícitamente incluido al evaluar la viscosidad del macizo rocoso (a mayor espaciamiento el macizo es más masivo y a menor espaciamiento es de mayor viscosidad).
- No considera la condición de aguas porque el criterio de Hoek-Brown se define en términos de esfuerzos efectivos (si se incluyera se “contaría dos veces”).
- El índice GSI debe definirse en un rango y no como un valor específico. En la práctica es usual definir un rango de unos 15 puntos.

**MOHR-COULOMB:**

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, asume que el corte en las rocas es producto de la combinación de esfuerzos normales y tangenciales, la ecuación que define la superficie de falla es lineal y tangente a los círculos obtenidos mediante ensayos de resistencia a compresión (sin confinamiento y confinada) y tracción, dicho de otra forma  $\tau = f(\sigma)$ . La expresión matemática que representa esta función es:

$$\tau = c + \sigma n \tan \phi$$

Para estimar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, se utilizó el criterio de falla de Mohr-Coulomb, mediante la envolvente de falla, construida a partir de ensayos de resistencia a compresión sin confinamiento y resistencia triaxial mediante el modelamiento del software RocLab, representa de una forma bastante completa las características de resistencia, por lo que se puede establecer las características de resistencia del macizo, para cualquier tipo de estado tensiona.

**BIENIAWSKI:**

Desarrollado por Bieniawski, (1989) constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y de sostenimiento de túneles<sup>30</sup>.

El parámetro que define la clasificación es el denominado índice RMR (ROCK MASS RATING), que indica la calidad del macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de los siguientes parámetros:

- 1.-Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- 2.-R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.
- 3.-Espaciado de las discontinuidades.
- 4.-Condiciones de las discontinuidades, el cual consiste en considerar los siguientes parámetros:

- Abertura de las caras de la discontinuidad.
- Continuidad o persistencia de la discontinuidad.
- Rugosidad.
- Alteración de la discontinuidad.
- Relleno de las discontinuidades.

5.-Presencia del Agua, en un macizo rocoso, el agua tiene gran influencia sobre su comportamiento, la descripción utilizada para este criterio son: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

- 6.-Orientación de las discontinuidades.

---

<sup>30</sup> Clasificación geomecanico para macizo rocoso Bienaski,1989

### 10.3.14.3.1 ANALISI DE CALASIFIACASION DE MASIZO ROCCOSO POR HOEKY BROWN GSI

Para la determinación de la clasificación del macizo roso se desarrolló, mediante la aplicación software RocLab5.0 para la determinación de la masa de roca parámetros de resistencia, basado en el criterio de rotura de Hoek-Brown generalizada. Lo que nos permite obtener estimaciones confiables de las propiedades de las masas de roca y para visualizar los efectos de cambiar los parámetros del macizo rocoso en las envolventes de rotura.

### 10.3.14.3.2 Estimación de GSI

Para calcular el parámetro índice geológico de resistencia se tiene en cuenta la descripción geológica del macizo donde se evidencia que los bloques se encuentra altamente fracturados, anguloso; presenta una meteorización baja donde las condiciones de las discontinuidades son buenas y se evidencia entre ellas óxido de hierro donde se tiene encueta para calificar GSI teniendo encueta la tabla (tabla 57)<sup>31</sup>.

Tabla 54: Estimación del Índice Geológico de resistencias (GSI)

Rock Type: <input type="text" value="General"/>	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="52"/> <input type="button" value="OK"/>	DECREASING SURFACE QUALITY →				
<b>STRUCTURE</b>					
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70	60			
 VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		52	40		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			30		
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

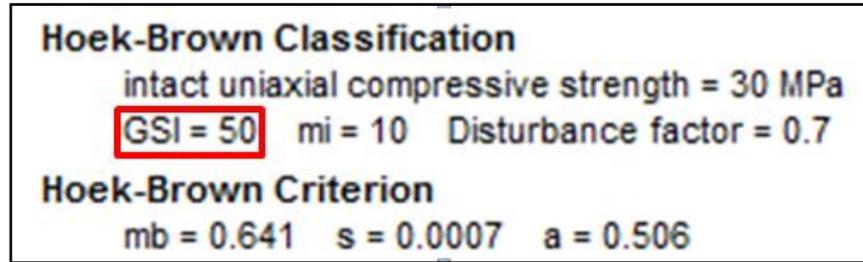
Fuente: Carta para evaluar el índice de resistencia en macizos rocosos fracturados (Tomada de Marinos & Hoek 2000).

<sup>31</sup> Carta para evaluar el índice de resistencia en macizos rocosos fracturados (Tomada de Marinos & Hoek 2000)

La clasificación y criterios arrojados por HOEKY Y BROWN mediante el software RocLab

La clasificación y criterios arrojados por HOEKY Y BROWN mediante el software RocLab fueron:

Figura 48: Resultados arrojados RocLab



Fuente: Estudio

Teniendo en cuenta el valor de GSI (Figura 48) para el macizo rocoso en la zona de estudio es de 50, teniendo en cuenta la clasificación (Tabla 58) el valor de GSI donde la caída de la roca es regular.

Tabla 55: Calificación de macizo rocos mediante GSI

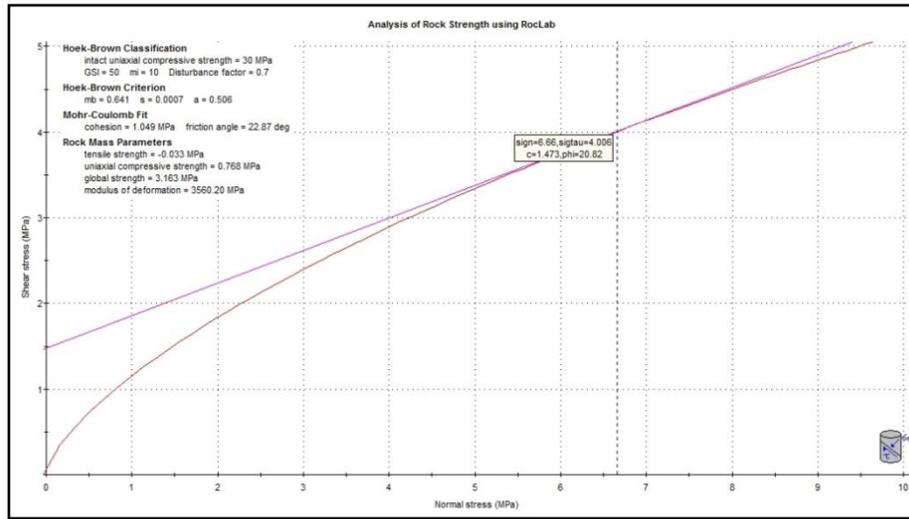
CALIDAD DE LA ROCA	GSI
CALIDAD MUY BUENA	80<GSI<100
CALIDAD BUENA	60<GSI<80
CALIDAD REGULAR	40<GSI<60
CALIDAD MALA	20<GSI<40
CALIDAD MUY MALA	0<GSI<20

Fuente: Carta para evaluar el índice de resistencia en macizos rocosos fracturados (Tomada de Marinós & Hoek 2000).

#### 10.3.14.4 CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOS MOHR-COULOMB

En la (Figura 49) se representa las tensiones de rotura para el criterio de rotura de Hoek&Brown. En la figura se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal. Tal y como se ha indicado para el criterio de rotura de Mohr-Coulomb los estados de tensiones encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico, y los estados tensionales por encima de la curva son inaccesibles para este determinado caso.

Figura 49: Envolvente de Mohr-Coulomb -Software RocLab



Fuente: Estudio

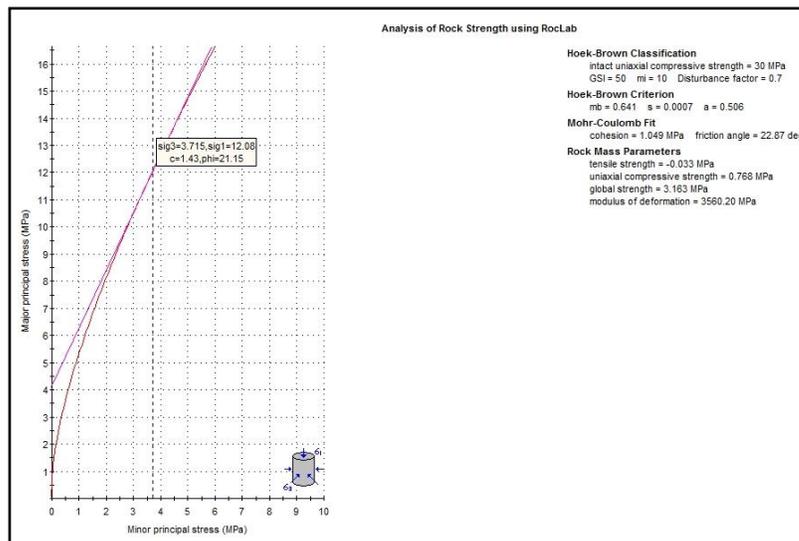
Mediante este criterio y el modelamiento los resultados de cohesión y fricción son:

Tabla 56: Resultados Mohr-Coulomb

Resultados RocLab	
COHESION	1,049
FRICCION	22.87

Fuente: Estudio

Figuras 3: Envolvente de Mohr-Coulomb -Software RocLab Triaxial



Fuente: Estudio

El resultado del modelamiento triaxial Mohr-Coulomb en RocLab son los parámetros de Resistencia en tracción del macizo es de -0.033MPa y de compresión es de 0.768MPa y el módulo de deformación es de 3560.20MPa. Teniendo en cuenta los diferentes resultados la calida del macizo se clasificado como regular.

### 10.3.14.5 CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOS BIENIAWSKI

Para obtener el Índice RMR de Bieniawski se calcula los parámetros siguientes:

**1. Parámetro:** La resistencia a la compresión simple se tuvo en cuenta el valor de la (figura 49) donde corresponde a 70 Pa de la matriz rocosa (Tabla 60).

Tabla 57: Parámetro: resistencia de la roca sana

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE	VALORACIÓN
Extremadamente dura	>250	15
Muy dura	100 – 250	12
<b>Dura</b>	<b>50 – 100</b>	<b>7</b>
Moderadamente dura	25 – 50	4
Blanda - Muy blanda	1 – 5	2-1

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

### 2) Parámetro: Cálculo del R.Q.D.

El parámetro Rock Quality Designation o RQD propuesto por Deere (1967), es un índice cuantitativo de calidad de la roca basado en la recuperación de núcleos con perforación de diamante, y se define como el porcentaje representado por la sumatoria de longitudes de los tramos de núcleo de barrenos de diamante que se recuperan en longitudes enteras mayores o iguales a 100 mm, dividida entre la longitud total barrenada.

$$RQD\% = \frac{\sum \text{Ripios} > 10\text{cm}}{\text{Total de la perforacion}}$$

En los casos donde no existen sondeos geotécnicos existe una fórmula alternativa para relacionar este valor, donde se identifican el número de discontinuidades en el macizo rocoso por m<sup>3</sup>.

$$RQD (\%) = 115 - 3.3J_v \quad \text{PARA } J_v > 4.5$$

$$RQD (\%) = 100 \quad \text{PARA } J_v \leq 4.5$$

El número de juntas (discontinuidades identificadas en el macizo por m<sup>3</sup> valor de la Jv es de 8.5 por lo tanto el RQD corresponde a 87 (Tabla 61).

Tabla 58: Cálculo del R.Q.D.

Índice de Calidad RQD%	Calidad	Valoración
0 - 25	Muy mala	3
25 - 50	Mala	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski, 1989

**3) Parámetro:** Separación de las discontinuidades (Tabla 62):

Tabla 59: La separación o el espaciamiento de las discontinuidades están clasificados según la tabla que a continuación se observa:

Descripción	Espaciado de Juntas	Tipo de macizo	Valoración
Muy separadas	> 2 m	Sólido	20
Separadas	0,6 - 2 m.	Masivo	15
Moderadamente juntas	200- 600 mm.	En bloques	10
Juntas	60 - 200 mm.	Fracturado	8
Muy juntas	< 60 mm.	Machacado	5

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski, 1989

4) **Parámetro:** Condiciones de las discontinuidades (Tabla 63).

Tabla 60: Aberturas de las discontinuidades.

Grado	Descripción	Separación	Valoración
1	Abierta	> 5mm	0
2	Moderadamente abierta	1 - 5 mm	1
3	Cerrada	0,1 - 1 mm	4
4	Muy cerrada	< 0,1 mm	5
5	Ninguna	0	6

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

Tabla 61: Rugosidad de las discontinuidades

Grado	Descripción	Valoración
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	3
4	Ondulada	1
5	Plana (espejo de falla)	0

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

Tabla 62: Relleno de discontinuidades

Grado	Descripción	Valoración
1	Blando > 5 mm	0
2	Blando < 5mm	2
3	Duro > 5mm.	2
4	Duro < 5 mm	4
5	Ninguno	6

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

Tabla 63: Alteración de discontinuidades

Grado	Descripción	Valoración
1	Descompuesta	0
2	Muy alterada	1
3	Moderadamente alterada	3

Grado	Descripción	Valoración
4	Ligeramente alterada	5
5	No alterada	6

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

#### 5) **Parámetro:** La presencia del agua

Para calcular la valoración según la presencia del agua se toma como referencia la tabla que a continuación se especifica.

Tabla 64: Tabla para obtener el parámetro de la presencia del agua

Descripción	Valoración
Seco	15
<b>Ligeramente húmedo</b>	<b>10</b>
Húmedo	7
Goteando	4
Fluyendo	0

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

Tabla 65: Valoración de Talud

Calificativo	Valoración
Muy favorable	0
Favorable	-5
<b>Medio</b>	<b>-25</b>
Desfavorable	-50
Muy desfavorable	-60

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski,1989

#### 10.3.14.5 .1 **Análisis de resultados**

Teniendo en cuenta las diferentes calificaciones para determinar la clasificación por Bieniawski la calificación donde el RMR es de 54 (Tabla 68), donde el macizo en el kilómetro 3 de la vía que conduce de Santa María a Garagoa es de una calidad media (tabla 70).

Tabla 66: Sumatoria de puntuación para clasificación RMR

PARAMETRO DE CLASIFICACION	Puntuación
Compresión simple	7
RQD%	17
Separación entre diaclasas	20
Longitud de la discontinuidad	6
Abertura	6
Rugosidad	1
Relleno	4
Alteraciones	3
Estado general	15
Taludes	-25
<b>TOTAL (RMR)</b>	<b>54</b>

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bienaski, 1989

Tabla 67: Calidad del rocoso con relación macizo al Índice RMR

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR	COHESIÓN	ÁNGULO DE ROZAMIENTO
I	Muy buena	100-81	>4 Kg/cm <sup>2</sup>	> 45°
II	Buena	80-61	3 – 4 Kg/cm <sup>2</sup>	35° - 45°
III	Media	60-41	2 – 3 Kg/cm <sup>2</sup>	25° - 35°
IV	Mala	40-21	1 – 2 Kg/cm <sup>2</sup>	15°- 25°
V	Muy mala	< 20	< 1 Kg/cm <sup>2</sup>	<15°

Fuente: Parámetros del macizo rocoso Bieniawski, 1989.

### 10.3.15 COMPORTAMIENTO GEOMECANICAS DEL MACIZO

El comportamiento geomecanico del macizo se realizó mediante software Dips los diferentes mecanismos de falla en taludes están asociados a las diferentes estructuras geológicas presentes en este y la interacción entre estas de acuerdo a la pendiente que tenga el talud, las orientaciones de las mismas y el ángulo de fricción interna de las estructuras a analizar, además es importante decir que para que se de cualquiera de los mecanismos de falla las estructuras y el talud deben cumplir con condiciones particulares dependiendo el mecanismo que se esté presentando.

A partir de las tablas de Dip/DipDir y por medio del programa DIPS, se grafican los diagramas de polos correspondientes, para identificar los familias de diaclasa

más importantes tomadas en campo (Tabla 71) y el ángulo de fricción utilizado es de 35°

Tabla 68: Datos de diaclasas del afloramiento

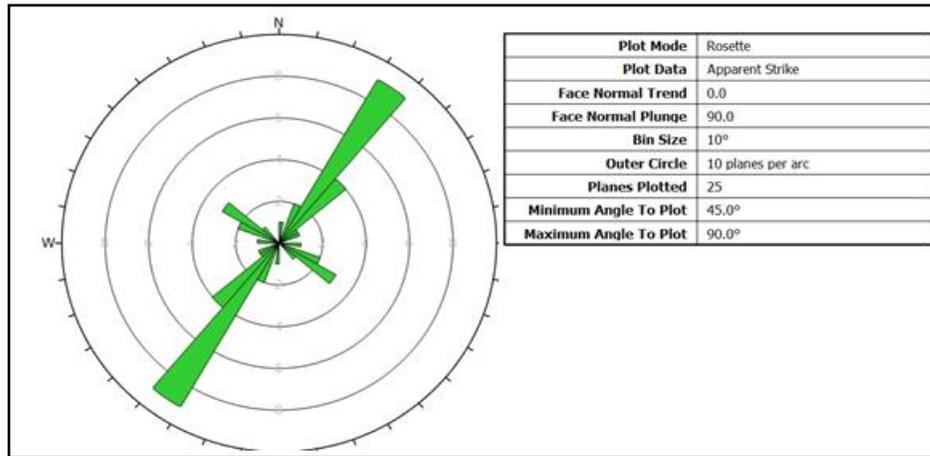
NUMERO	DIP DIRECTION	DIP	NUMERO	DIP DIRECTION	DIP
1	20	80	18	122	45
2	305	88	19	126	49
3	35	20	20	120	38
4	30	35	21	123	39
5	40	42	22	130	40
6	28	33	23	128	45
7	40	40	24	134	60
8	25	75	25	120	38
9	8	81	26	175	35
10	310	80	27	330	62
11	313	88	28	272	73
12	308	75	29	40	56
13	316	73	30	30	86
14	321	80	31	120	45
15	575	48	32	271	32
16	120	48	33	30	48
17	118	43	34	120	74

Fuente: Estudio

### 10.3.15.1 Orientación de discontinuidades

El método de la roseta de juntas se puede representar las discontinuidades de una manera cuantitativa. Las juntas se dibujan, utilizando un círculo graduado de 0 a 360°, mediante líneas radiales dispuestas a intervalos de 10°. El número de juntas está comprendido en intervalos a lo largo del radio utilizando círculos concéntricos (Figura 50).

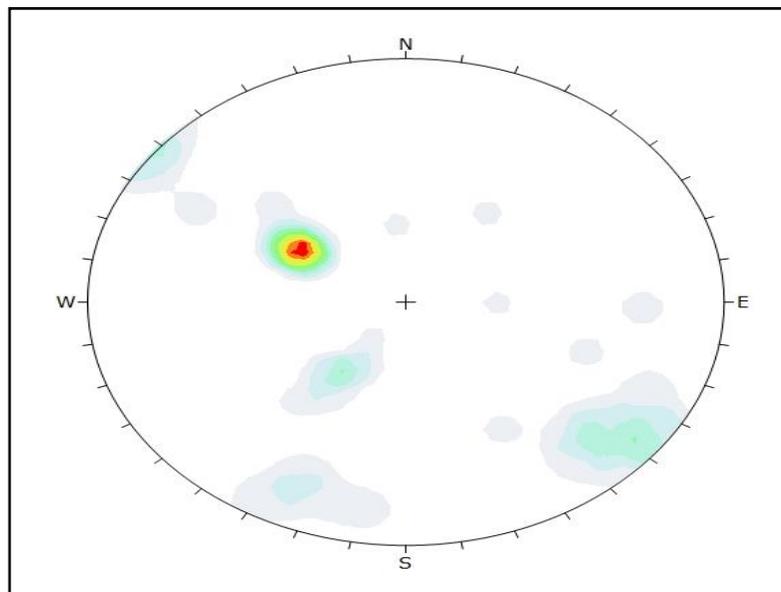
Figura 50: Representación de las discontinuidades en la roseta



Fuente: Estudio

La forma más habitual de representar los planos de discontinuidades por orientación es mediante la proyección hemisférica o sea que se conserva las áreas, utilizando la red de Laberte o Schmidt. Una vez representados mediante dicha proyección los polos de los planos, se puede trazar sobre la red de planos, esta es la mejor forma de localizar el polo de cada familia de diaclasas (Figura 51) y definir el 4 de familias que existan.

Figura 51: representación de discontinuidades



Fuente: Estudio

### 10.3.15.2 Datos estructurales del talud

Los datos estructurales tomados en campo del talud son (Tabla 69):

Tabla 69: Dirección del talud

Dirección del talud	
azimut	335
buzamiento	82

Fuente: Estudio

Los diferentes mecanismos de falla en taludes están asociados a las diferentes estructuras geológicas presentes en este y la interacción entre estas de acuerdo a la pendiente que tenga el talud, las orientaciones de las mismas y el ángulo de fricción interna de las estructuras a analizar fueron tomados del envolvente de Mohr-Coulomb -Software RocLab (Figura 49) y (Tablas 70), además es importante decir que para que se de cualquiera de los mecanismos de falla, las estructuras y el talud deben cumplir con condiciones particulares dependiendo el mecanismo que se esté presentando.

Tabla 70: Los parámetro del material del macizo rocoso

Características	
COHESION	1.049
FRICCION	22.87

Fuente: Estudio

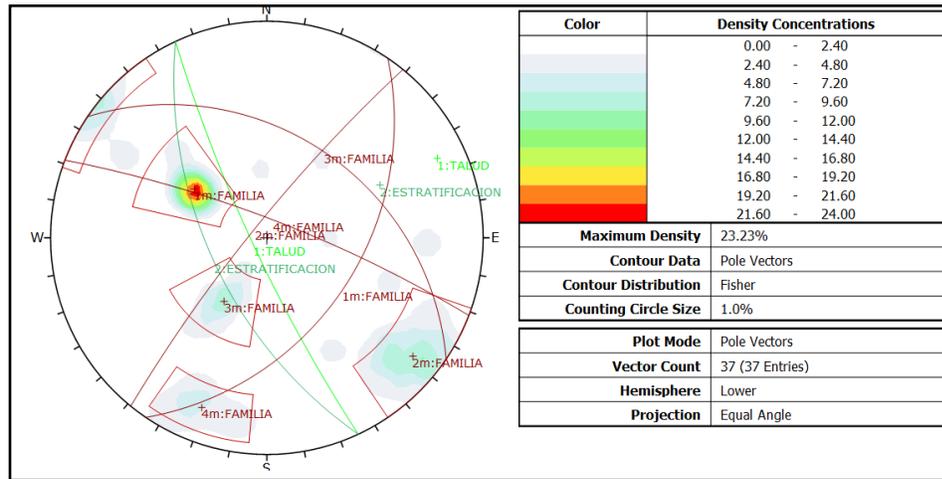
Con base análisis realizado con el programa Dips, se pueden identificar 4 familias de diaclasas en la zona de estudio (Tabla 71).

Tabla 71: Familias de diaclasa

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		82	245	TALUD
2		60	245	ESTRATIFICACION
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		44	124	FAMILIA
2m		82	309	FAMILIA
3m		39	34	FAMILIA
4m		80	21	FAMILIA

Fuente: Estudio

Figura 52: Datos estructurales del talud



Fuente: Estudio

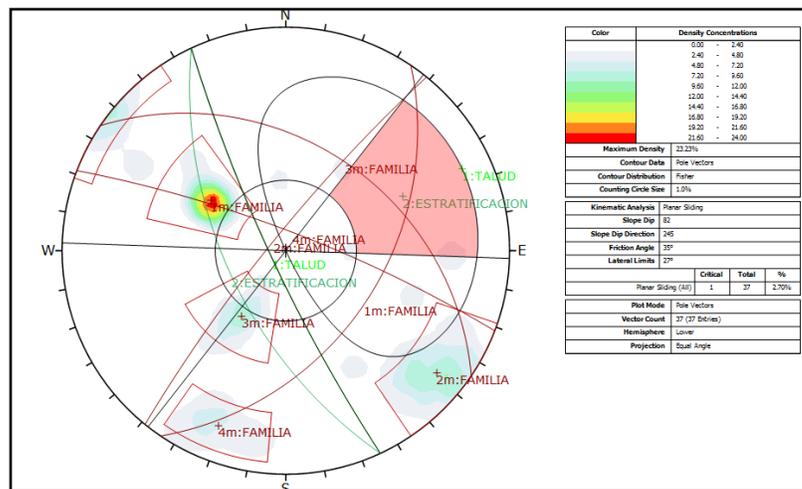
### 10.3.15.3 FALLA PLANAR

La falla planar se produce a favor de la superficie preexistente, que puede ser una estratificación, este deslizamiento se puede producir a lo largo de un superficie plana Hoek y Bray establece las condiciones cinemáticas que deben cumplirse para que se produzca este tipo de falla son.

- La superficie de falla corresponde a un plano continuo que debe tener un rumbo paralelo o casi paralelo a la superficie del talud.
- La superficie de falla debe buzcar hacia el exterior del talud debe de tener un buzamineto menor al del talud
- El buzamiento de la falla debe de ser menor al ángulo de fricción

La probabilidad de falla planar es de 2.7% en el cual toma en cuenta solo una familias de diaclasas (Figura 53).

Figura 53: Falla plana



Fuente: Estudio

### 10.3.15.4 FALLA POR VOLTEO

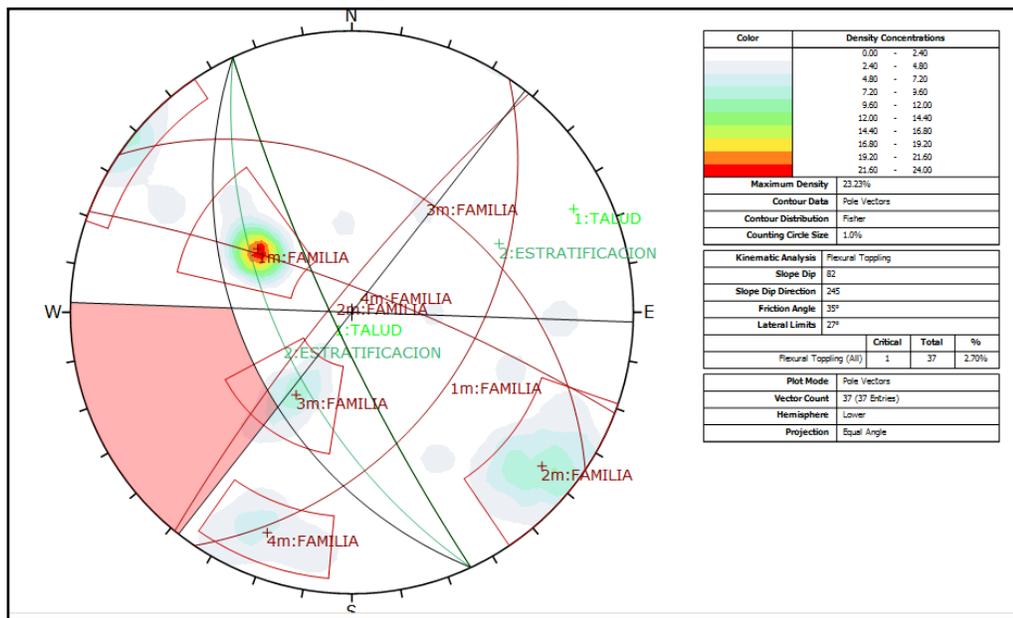
La falla al volteo es un mecanismo de falla muy común en macizos de roca y se caracteriza por la inclinación de estructuras semi-verticalizadas como resultado de la acción de la gravedad.

La inclinación de bloques es común en masas rocosas, las cuales forman bloques columnares o tabulares con un espaciamiento relativamente ancho de discontinuidades y debe de tener las siguientes condiciones:

- La inclinación de talud e inclinación de estratos es mayor a  $65^\circ$ .
- La estratificación tenga un buzamiento controlado a la inclinación del talud, pero con rumbos paralelos o subparalelos en una tolerancia de  $30^\circ$

La probabilidad de falla por volteo es de 2.70 % con toda las familias de diaclasas (Figura 54).

Figura 54: Falla por volteo



Fuente: Estudio

### 10.3.15.5 FALLA EN CUÑA

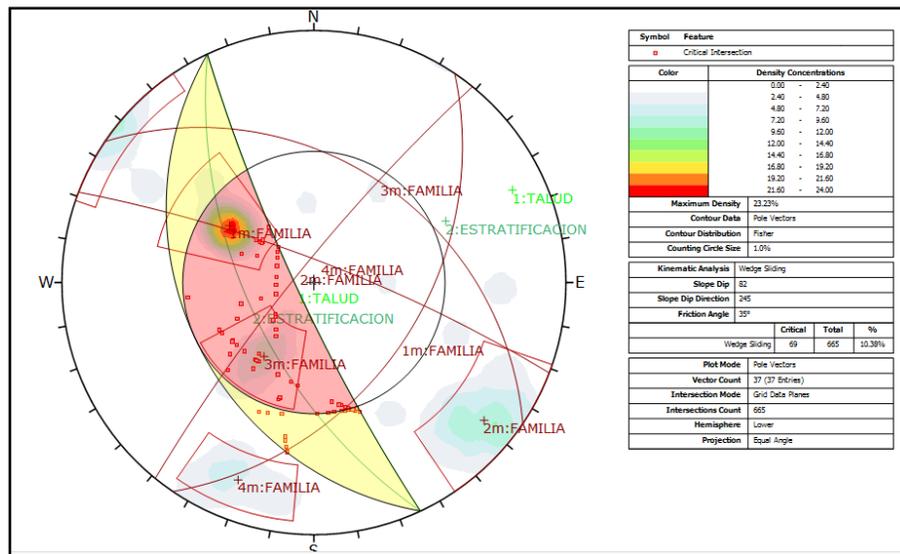
Se define la rotura por cuña a aquella que se produce cuando dos planos de discontinuidades se intersectan y define un bloque tetraédrico donde se debe de cumplir con las siguientes condiciones:

- El rumbo de la línea de falla de intersección de los planos debe ser cercano al rumbo de la cara del talud.

- El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor al buzamiento de la superficie del talud.
- El buzamiento de la línea del talud debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio entre las dos superficies.

La probabilidad de falla en cuña es de 10.38% teniendo en cuenta dos de las familias de diaclasas, de manera que el buzamiento de la línea de intersección de ambos planos tenga un buzamiento inferior al ángulo del talud (figura 55).

Figura 55:Falla en cuña



Fuente: Estudio

### 10.3.15.6 Análisis de Resultados

Teniendo en cuenta el análisis geomecánico del macizo mediante el software Dips, el macizo tiene una tendencia de fallar por la familia 3 que presenta un buzamiento de 39° y su dirección de buzamiento de 34° y presenta una alta probabilidad de fallar por cuña respecto a los diferentes tipos de falla y las familias de diaclasas predominantes del macizo rocoso corresponde a la familia 1 que corresponde a una dirección de buzamiento de 124° y un buzamiento de 44°.

## 11: PLAN DE MONITOREO

El monitoreo tiene como objetivo realizar un seguimiento al comportamiento de zonas inestables o deslizamientos, mediante la instrumentación de diferentes tipos y así lograr determinar algunos parámetros geotécnicos los cuales determinan los posibles mecanismos de falla presentes.

Anterior al presente estudio, en el deslizamiento Caño Cangrejo, se instalaron equipos de medición piezométrica y topográfica, de los cuales se identificaron falencias en la toma de datos y la frecuencia de las mediciones, por tanto se plantea un plan de monitoreo que permita determinar la evolución de los movimientos en el tiempo.

### 11.1 EQUIPOS INSTALADOS

#### 11.1.1 Equipos de medición de desplazamiento:

En el área de estudio, para la medición del desplazamiento del terreno se cuenta con 5 puntos fijos (mojones) (Tabla 72) en las siguientes coordenadas.

Tabla 72: Mojones en el área de estudio

MUNICIPIO	SECTOR	MOJON	COORDENADS		TOMA DE LECTURA MES
			ESTE	NORTE	
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M31	1090799,72	1029758,02	SEPTIEMBRE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M32	1090810,69	1029747,51	OCTUBRE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M33	1090840,35	1029719,66	NOVIEMBRE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M34	1090767,95	1029787,52	DICIEMBRE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M35	1090754,36	1029800,53	ENERO

Fuente: Mejorar la capacidad de respuesta de la comunidad ante emergencias por fenómenos de remoción en masa en los municipios de Garagoa, La Capilla, San Luis de Gaceno, Santa María, Sutatenza y Tenza, de la jurisdicción de Corpochivor.

#### 11.1.2 Equipos de medición de niveles freáticos:

Se realizó la perforación e instalación de un equipo de observación piezométrica, por parte de (Corpochivor) la cual determina las diferentes fluctuaciones del nivel del agua.

Fotografía 21: Piezómetro deslizamiento Caño Cangrejo



Fuente: Estudio

### ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION DE MONITOREO

La dirección del deslizamiento y su desplazamiento se tuvo en cuenta 3 valores, el desplazamiento de mojones donde los valores fueron tomados en diferentes meses donde muestran un desplazamiento de 2.6 metros en promedio en los 4 meses y su dirección fue hacia el noreste, suroeste, donde hay lecturas tomadas por (Corpochivor) (tabla 73).

Tabla 73: Mojones y vector de desplazamiento

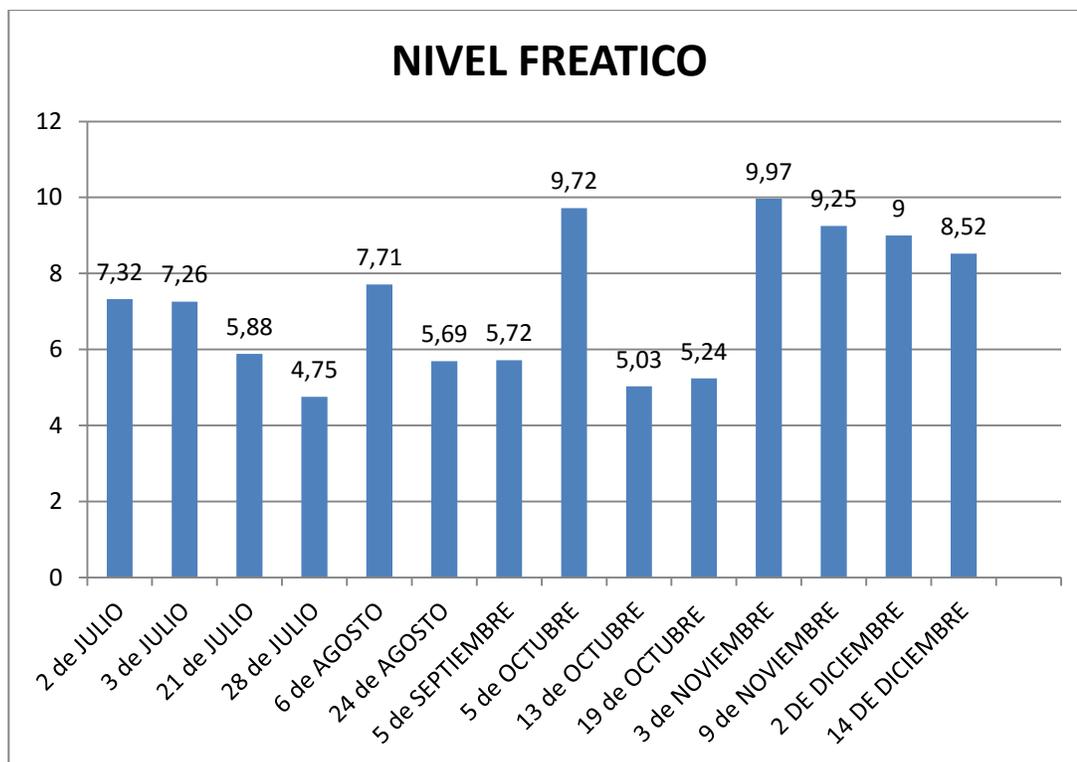
MUNICIPIO	SECTOR	MOJON	COORDENADAS		TOMA DE LECTURA	DESPLAZAMIENTO (m)	DIRECCION
			ESTE	NORTE			
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M31	1090799,72	1029758,02	SEPTIEMBRE	0	-
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M32	1090810,69	1029747,51	SEPTIEMBRE	0	
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M33	1090840,35	1029719,66	SEPTIEMBRE	0	
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M34	1090767,95	1029787,52	SEPTIEMBRE	0	
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M35	1090754,36	1029800,53	SEPTIEMBRE	0	
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M31	1090799,11	1029759,11	OCTUBRE	1.2	NORTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M32	1090810,69	1029749,32	OCTUBRE	1.8	NORTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M33	1090842,81	1029723,57	OCTUBRE	4.19	NORESTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M34	1090765,53	1029786,63	OCTUBRE	2.6	SUROESTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M35	1090751,18	1029798,71	OCTUBRE	3.4	SUROESTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M31	1090798,97	1029759,75	NOVIEMBRE	0.65	OESTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M32	1090810,35	1029750,28	NOVIEMBRE	1.2	NORTE

MUNICIPIO	SECTOR	MOJON	COORDENADS		TOMA DE LECTURA	DESPLAZAMIENTO (m)	DIRECCION
			ESTE	NORTE			
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M33	1090842,08	1029723,4	NOVIEMBRE	0.7	SUR
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M34	1090764,57	1029786,89	NOVIEMBRE	0.9	OESTE
Santa Maria	CAÑO CANGREJO	M35	1090749,96	1029798,74	NOVIEMBRE	1.2	OESTE

Fuente: Mejorar la capacidad de respuesta de la comunidad ante emergencias por fenómenos de remoción en masa en los municipios de Garagoa, La Capilla, San Luis de Gaceno, Santa María, Sutatenza y Tenza, de la jurisdicción de Corpochivor.

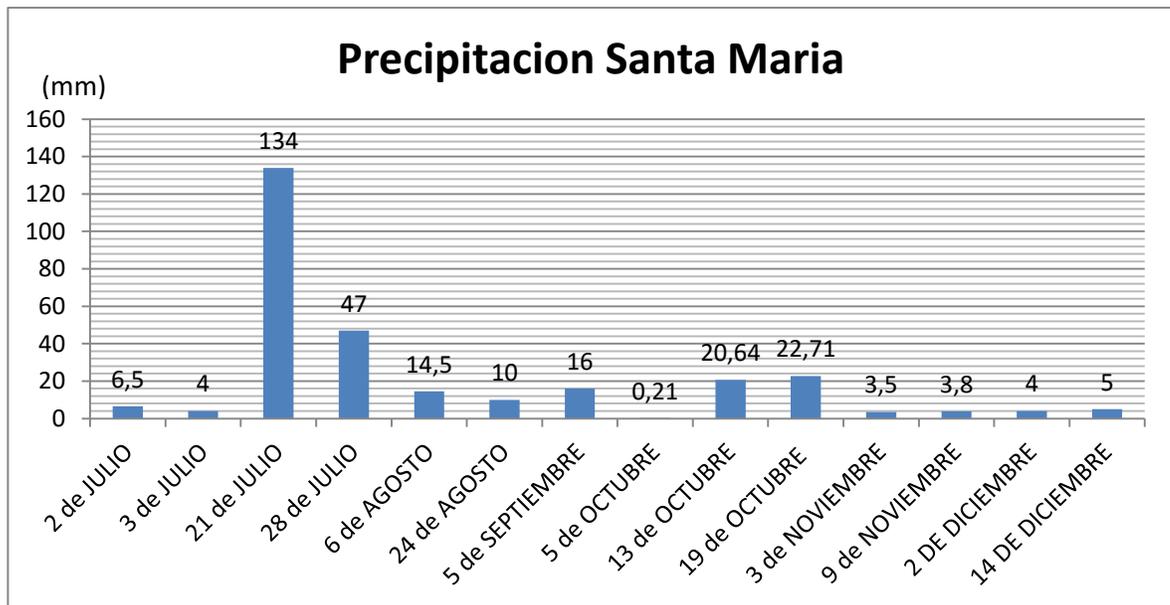
**Control Piezométricos:** esta información correspondiente a las diferentes lecturas de nivel freático ya que estas coinciden con los niveles de precipitación de los mismos días donde se tomaron dichas lecturas, por tanto se determinó que la información piezométricas es válida.

Grafico 6: Nivel freático



Fuente: Estudio

Grafico 7: Precipitaciones Santa Maria



Fuente: Estudio

## 11.2 PROPUESTA DE PLAN DE MONITOREO

Para realizar la planeación de un programa de instrumentación y monitoreo es necesario determinar el tipo de medición que se requiere, corroborar la validez de las teorías propuestas del comportamiento de los movimientos y la cuantificación de los procesos dinámicos de estos.<sup>32</sup>

### 11.2.1 Tipos de instrumento

- Control topográfico de puntos determinados. Se utiliza equipo estándar de topografía
- Inclínómetros miden la deformación horizontal del suelo a profundidad.
- Detectores de superficie de falla. Pueden ser estacas de madera, cintas eléctricas o extensómetros.
- Piezómetros. Miden el nivel de agua o la presión de poros.

### 11.2.2 Control Piezométricos

La información piezométricas nos ayuda a medir el nivel del agua o la presión de poros ya que es el principal detonante, esta es necesaria para el control y seguimiento de los deslizamientos de la zona de estudio.

<sup>32</sup> Jaime Suarez /[www.erosion.com.co/delizamiento geotécnico /instrumentación y monitoreo](http://www.erosion.com.co/delizamiento_geotecnico/instrumentación_y_monitoreo)

Los piezómetros son muy importantes en la parte alta del deslizamiento para determinar las presiones de poros relacionadas con la recarga hidrogeológica.

En la zona correspondiente a los movimientos en masa identificados es necesario conocer el comportamiento de las aguas subterráneas, debido a su influencia directa como factor detonante ante la ocurrencia de movimientos en masa, por tanto se propone<sup>33</sup>:

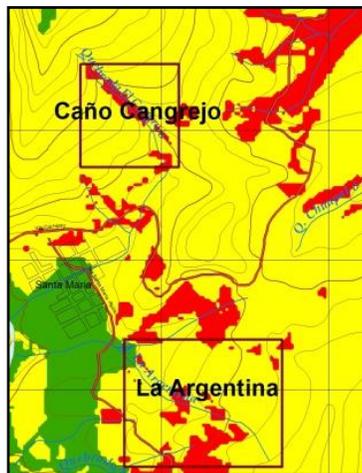
- Instalación de 2 a 3 piezómetros de observación como mínimo en los sectores de La Argentina y Caño Cangrejo (Figura 56), teniendo en cuenta el modelo a seguir (Figura 57).

- Realizar las lecturas de la toma de datos en periodos iguales, de tres a cuatro mediciones mensuales.
- Tener una secuencia en las mediciones de los diferentes instrumentos de medición en los meses siguientes y en el mismo periodo de época en las que se tomen en los meses anteriores.

### 11.2.3 Inclínometros

Los inclinómetros son de gran importancia ya que este sistema nos ayuda a determinar si son movimientos lentos, donde se pueden detectar deformaciones pequeñas, así mismo se puede determinar la profundidad aproximada de la superficie de falla y se pueden ubicar ver (Figura 57).

Figura 56: Áreas planeadas para la instalación de piezómetros

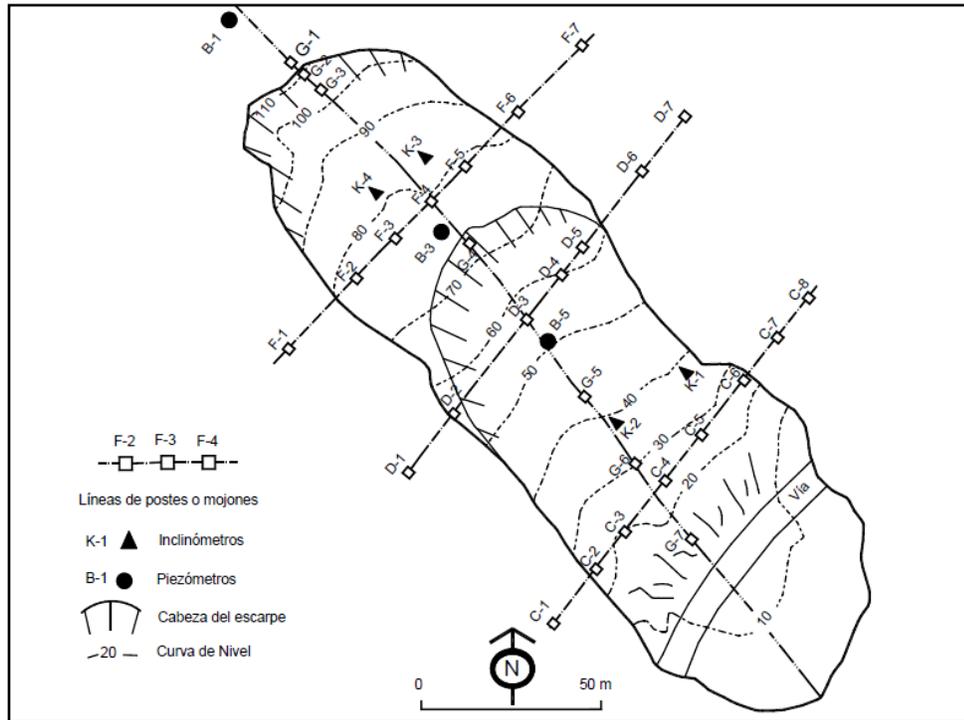


Fuente: Estudio

<sup>33</sup> Jaime Suarez /www.erosion.com.co/delizamiento geotécnico /instrumentación y monitoreo

En la figura 57 se muestran donde se debe de instalar los diferentes tipos de instrumentación de monitoreo en los deslizamientos de La Argentina y Caño Cangrejo para mejorar y determinar el comportamiento mecánico de él.

Figura 57: Modelo para la ubicación de los diferentes tipos de instrumentación



Fuente: Jaime Suarez /deslizamiento geotécnico /instrumentación y monitoreo

## **12) GENERACION DE ALERTAS TEMPRANA EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARIA EN LA JURISDICCION DE LA CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CHIVOR (CORPOCHIVOR).**

Por la condición estructural y genética del terreno sobre los que han sido construidos los municipios de la jurisdicción, éstos han generado diversos fenómenos de remoción en masa que al desgarrar generan amenaza y hacen vulnerable comunidades enteras e infraestructura regional. Al no existir método certero que permita activar un sistema de alerta temprana, salvo pareceres intuitivos, observaciones directas o descripciones del fenómeno de remoción en masa, una vez sucede el evento, es imprescindible acceder a un sistema de monitoreo de piezómetros y mojones con los que cuenta la Corporación, que permitirá definir un método de alerta pragmático que anticipa el evento, dando así la posibilidad de respuesta temprana por parte de las comunidades rurales y municipales.

### **Metodología:**

Como objetivo principal de los estudios detallados realizados por la Corporación, se efectúa el análisis de estabilidad que nos lleva a determinar un factor de seguridad para cada uno de los deslizamientos. El siguiente método fueron utilizados en todos los análisis de estabilidad, seleccionando para el deslizamiento el que resultó más crítico, así:

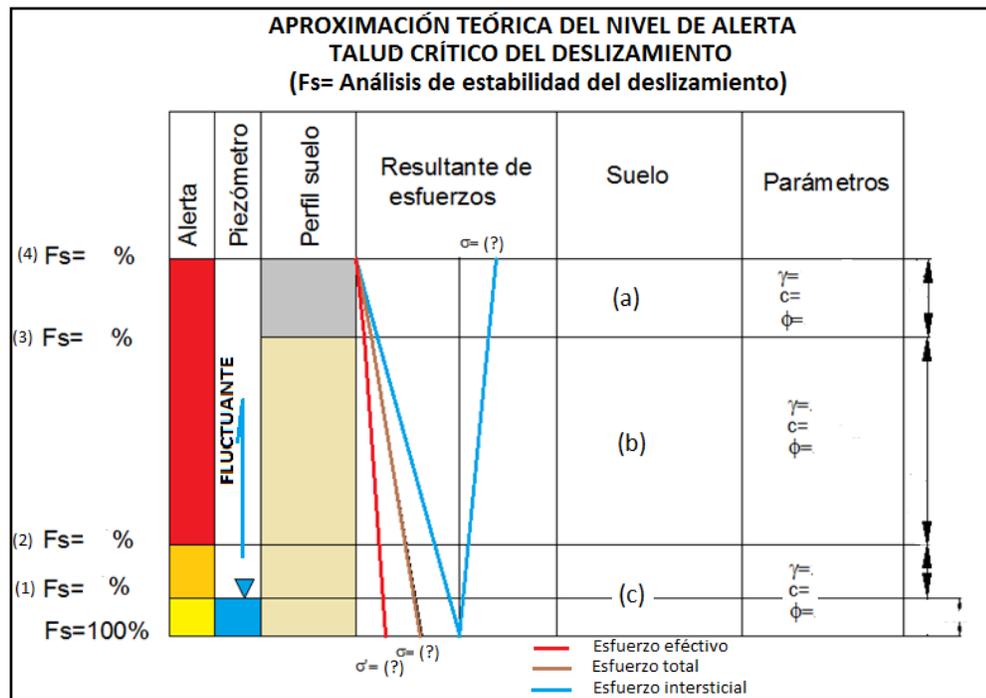
- Jambu corregido (Santa María Bajo, Caño Cangrejo)

Para la determinación de los niveles de alerta, se toma el factor de seguridad como patrón diferenciador, este define la susceptibilidad de la amenaza, partiendo de su condición actual de estabilidad. En tal sentido, se construye el perfil de esfuerzos efectivos ( $\sigma'$ ) disponibles, que es inversamente proporcional al aumento de presión de poros generado por la presencia del agua (presión intersticial), para el que se construye un gráfico de aproximación teórica del nivel de alerta (ver figura 56) y cuyo efecto implica de manera directa el factor de seguridad por cambio del nivel piezométricos. En otras palabras, las fluctuaciones del nivel freático medido en campo definen la proporcionalidad en que el factor de seguridad aumenta o disminuye, determinando así estados de alerta para cuando se sobrepasa ciertos valores del factor de seguridad disponible.

Mediante la toma de lecturas, tanto de los cambios del nivel piezométricos, como del desplazamiento de los mojones, al contar con un gran número de éstas, se hace un recalcu de los factores de seguridad con la información real obtenida, de los cuales se hará una caracterización estandarizada que permita relacionarlos con los niveles de alerta específicos.

Con esta información se recalcula el factor de seguridad, si existe movimiento significa que el factor de seguridad ha tomado un valor menor de 1, por lo tanto se ha encontrado un nivel freático para el cual se establece el nivel de alerta roja)(Figura 58). Es importante aclarar que el nivel normal de alerta es amarillo (por tratarse de un deslizamiento) y que el procedimiento conlleva al establecimiento del nivel naranja (movimiento casi imperceptible) y el rojo (movimiento notorio).

Figura 58 : Aproximación teórica del nivel de alerta del deslizamiento



Fuente :Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

### Instrumentación:

- 1) Piezómetros: Medición periódica del Nivel freático
- 2) Mojonés: Medición de desplazamiento superficial
- 3) Inclino metros: Medición de desplazamiento en profundidad

### Calibración del monitoreo:

Se trata de medir las fluctuaciones del nivel freático y desplazamientos superficiales relacionándolos con eventos climáticos y sísmicos, que pongan en evidencia su interrelación; concretando así de manera pragmática las condiciones que generen la activación de sistema de alerta temprana por deslizamiento, para cuando se superen ciertos valores definidos por la instrumentación.

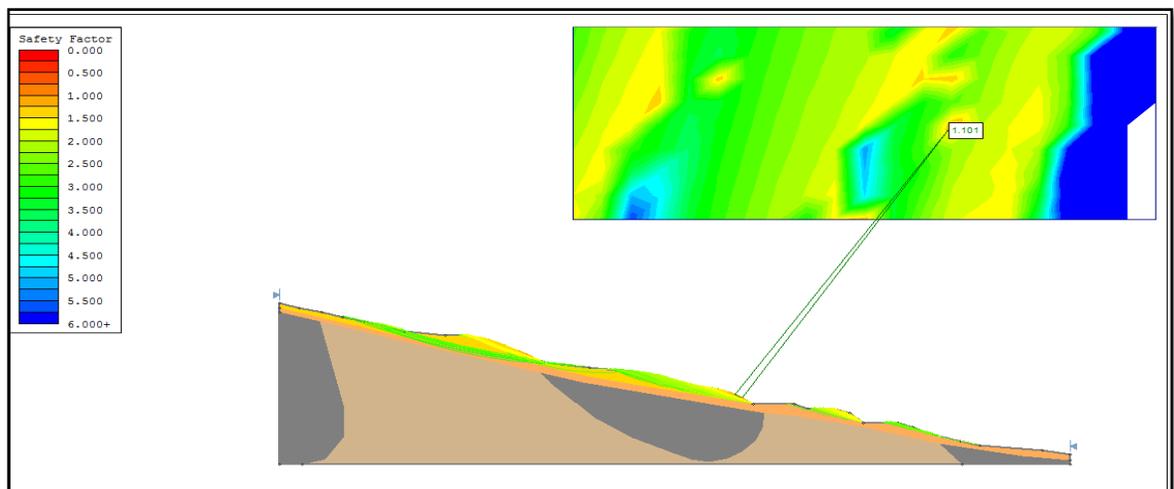
A continuación se describen los resultados del análisis de estabilidad (teórico) para cada uno de los deslizamientos con los respectivos esfuerzos, los cuales serán corroborados con las lecturas interrelacionadas.

### 12.1 Determinación niveles de alerta caño cangrejo bajo, municipio de Santa María

Del gráfico de solución se observa: Talud con esfuerzo disponible en condición seca de  $70.12 \text{ KN/m}^2$  decayendo a  $30.90 \text{ KN/m}^2$  en estado saturado, trayendo como resultado una disminución del 72% en FS (factor de seguridad). Así las cosas con un FS por debajo de lo tolerable ( $<1.5$  para el caso en que haya viviendas) al descender de este límite indicaría ya un estado de emergencia.

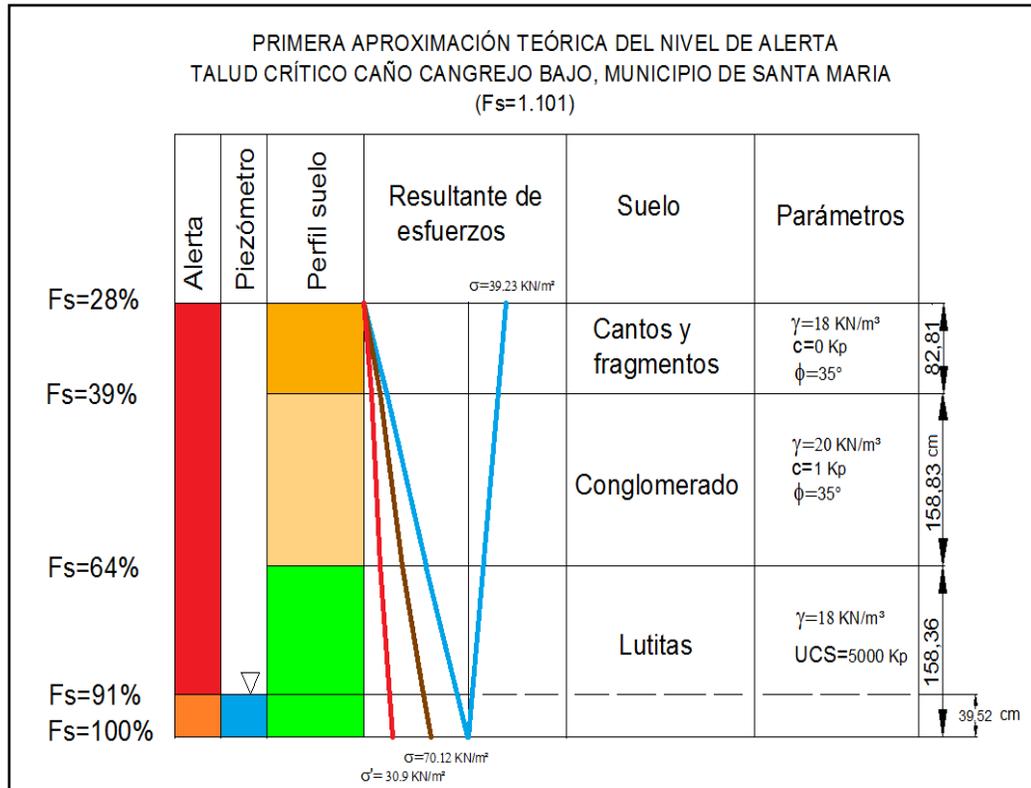
En nuestro caso, para un FS de 1.101 (Figura 58) indicaría, que el talud definido por el círculo de falla estaría cercano a su límite de estabilidad, con descenso del 9% dado que el nivel freático se encuentra a 4 metros podría generar decaimientos, que llevaría al colapso instantáneo de la estructura del suelo. En tal sentido estos estados concretan límites de la alerta entre Naranja y Roja, cuya definición parte del estado deducción de inestabilidad (Figura 60).

Figura 59: Análisis de estabilidad del talud caño cangrejo



Fuente :Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

Figura 60: Aproximación teórica del nivel de alerta temprana talud caño cangrejo



Fuente :Corporacion autonoma regional (CORPOCHIVOR)

### 12.3 Calibración del Método:

Se toma el factor de seguridad como principal indicador de la generación de alerta temprana como patrón, este define la susceptibilidad de la amenaza, y así la determinación de las diferentes alertas naranja y roja partiendo de su condición actual de estabilidad y su comportamiento geomecánico ya que las fluctuaciones del nivel freático medido en campo nos dan una aproximación del factor de seguridad, ya que puede aumentar o disminuir con la diferentes precipitaciones registradas en el área de estudio

Mediante el monitoreo de las diferentes lecturas piezométricas y de los desplazamiento de mojones, al contar con un gran número de éstas, se hace un recalcu de los factores de seguridad con la información real obtenida, de los cuales se hará una caracterización estandarizada que permita relacionarlos con los niveles de alerta propuestos por (corpochivor).

## CONCLUSIONES

En el área del deslizamiento de Santa María están enmarcados geológicamente por depósitos Cuaternarios de tipo Residuales, con aspectos variables que van desde los 8m aproximadamente esto a su vez subprayacen en las rocas sedimentarias de la formación lutitas de Macanal ya que esta presenta problemas de friabilidad muy alta con el contacto con el agua y desfavorece a las condiciones de estabilidad.

Desde el punto de vista tectónico el municipio se encuentra en un alto grado ya que se encuentra la falla de Santa María y Lengupa donde se evidencia el replegamiento de la formación lutitas de Macanal y tiene gran afectación a los dos deslizamientos y a la cabecera municipal y posterior afectación a la población.

En el área del deslizamiento de Caño Cangrejo esta enmarcados geológicamente por Depósitos cuaternario residual y coluvial con espesores que van de los 4 metros aproximadamente esto a su vez subprayacen la formación bata constituida cantos subangulares embebidos en un matriz limo arcilloso.

El sitio del proyecto se encuentra ubicado dentro de un relieve geomorfológico más detallado estructural generado por las fallas Santa María y Lengupa, Denudacional, originando por depósitos de material no consolidados que en algunos sitios generaran valles que suelen presentar problemas de estabilidad o fenómenos de remoción en masa.

Es importante tener en cuenta que los procesos geomorfológicos son cambiantes y avanzan progresivamente en el tiempo geológico, por lo cual es necesario implementar medidas que prevengan o mitiguen la aceleración de fenómenos de remoción en masa existentes y que puedan llegar a afectar la estabilidad.

En el desarrollo de amenaza el área de estudios se siguió un proceso analítico del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local donde se aplicada la propuesta metodológica del Servicio Geológico Colombiano 2012, ya que esta da un valor de un 100% al detónante sismo y detónante climático, dado que por la escala que se manejó a 1:10.000 se aprecia que esa ponderación no nos da un grado de detalle alto que requiere el estudio donde Se concluye dar un porcentaje de 80 % al detónante sismo y climático, evidenciando así el cambio significativo en el grado de detalle requerido en el área de estudio.

En general desde el punto de vista de estabilidad de taludes, la zona de estudio presenta taludes de pendiente media y alta, con problemas de saturación de aguas evidenciados en los dos deslizamientos. Por lo anterior, es importante complementar un tratamiento especial de drenaje, en toda la zona afectada del deslizamiento para mitigar el proceso de inestabilidad por saturación y garantizar la estabilidad de la zona.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los materiales existentes se pueden catalogar desde materiales poco permeables hasta materiales de gran permeabilidad; como es el caso de la formación lutitas de Macanal catalogada como acuitardos y los depósitos cuaternarios residual, aluvial se considerandos como materiales permeables que permiten la infiltración de aguas superficiales, causante de los deslizamientos.

Desde el punto de vista de la caracterización del macizo rocoso, es de gran importancia, debido a la condición tectónica del área cuyo control es orientada por la falla de Santa Maria, generando patrones estructurales para la infiltración, definidos por familias de diaclasas predominantes, por los cual puede generar afectaciones que puede traer a una de las vías principales que comunica el municipio de Santa Maria con Garagoa. La clasificación del macizo rocos tiene una condición regular con probabilidad de generar fallas en cuña.

El factor de seguridad no satisface ninguna condición de estabilidad, por lo que se puede inferir movimientos reptacionales y posibles deslizamientos localizados, a corto y mediano plazo.

Teniendo en cuenta los análisis de estabilidad realizados y lo observado en el terreno se puede determinar que, en términos generales, el talud presenta un nivel de amenaza alto por fenómenos de remoción en masa en la zona del deslizamiento.

Los factores más relevantes que influyeron en la ocurrencia del deslizamiento, fueron:1) mal manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, las cuales produjeron un aumento de la presión de poros, ayudando al avance del deslizamiento, 2) factor antrópico generado por los cambios en el uso del suelo, deforestación, regadíos excesivos de los pastos del área de los deslizamientos y las fuertes olas invernales que se están presentando en la actualidad.

Teniendo en cuenta la aplicación de la metodología de generación de alertas tempranas elaborada por la corporación autónoma regional (corpochivor), como prueba piloto para su posterío aplicación en los demás deslizamientos de la jurisdicción, a partir de la dinámica de mojones y fluctuaciones del nivel freático, que aplica a (F.s) y a pesar de la falta de constancia en la toma de datos es observable correlación entre precipitación, movimiento de mojones, fluctuación del nivel freático y disminución en el patrón de estabilidad.

## RECOMENDACIONES

Las acciones que se proponen aquí están relacionadas con el manejo integral del talud. Estas acciones deben ser estudiadas y complementadas por especialistas de diferentes disciplinas, ya que involucra la reforestación de toda la ladera, el manejo de aguas de escorrentía, la construcción o ampliación de canales y alcantarillas en las quebradas Caño Cangrejo y La argentina, la disminución del nivel freático local, entre otras.

Se debe dar un manejo adecuado de las aguas de escorrentía y de las aguas sub superficiales con evacuación a los zanjones y o quebradas de la red de drenaje local; se debe realizar labores de mantenimiento a las zanjas colectoras (limpieza del suelo y material vegetal para evitar la obstrucción y posibles represamientos y pequeñas avalanchas que puedan afectar la geometría del talud y las viviendas en la cabecera municipal. Se recomienda adicionalmente la instalación en el lecho de la quebrada pequeñas obras de contención que disminuya le energía de las aguas al descender por la ladera.

Se deben construir drenajes y filtros en el cuerpo del deslizamiento que disminuyan el nivel freático para evitar que estas aguas sirvan como detonante de un posible deslizamiento.

Se propone la siembra y conservación de especies vegetales livianas con alto poder de enraizamiento (incluyendo pasto vetiver) en la parte afectada; se recomienda, adicionalmente, la conservación de los márgenes de las quebradas, para mitigar los efectos erosivos; prohibir de manera inmediata prácticas agropecuarias u otras actividades antrópicas ya que producen decaimiento en los parámetros de estabilidad y un deterioro mayor del entorno.

Se propone realizar 5 a 8 sondeos ubicados encabeza, cuerpo y pata del deslizamiento de Caño Cangrejo para conocer las características del suelo y sus posibles superficies de falla.

Se deben tomar lecturas constantes en piezómetros y mojones, estableciendo el registro con estación topográfica para generación de los vectores de velocidad-desplazamiento, mejorando en la estimación de la magnitud del fenómeno, refinación del modelo y grado de exactitud dela predicción; para ello es de tomar datos en periodos iguales y en tiempos extremos de precipitación, que redundará en la selección adecuada de las obras y eficiencia de diseño para las obras de mitigación.

Es vital como obras adicionales del monitoreo la construcción de dos inclinómetros tanto en la cabeza y en la pata de los fenómenos de remoción de masa de (Caño Cangrejo y La Argentina) para la cuantificación del desplazamiento de fondo en el plano de falla.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Esquema de ordenamiento territorial EOT. Municipio de SANTA MARÍA

ULLOA, C., CAMACHO, R., ESCOBAR, R. Mapa geológico de la plancha 229 Gachalá, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá, 1975.

Hobbs, R.J. y Margules, C.R. Metodología Corinel and Cover adaptada para Colombia 2010 Saunders, D.A., C.R. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. Conservation Biology D.A., C.R. C.R. 1991 19915: 18-32.

Apoyo al Ministerio de Educación para la Elaboración de material educativo en el tema SAT, la inclusión del tema SAT en la currícula escolar y la facilitación de talleres de sensibilización y formación en el tema

Carvajal, José Henry Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000, Bogotá D. C. Agosto de 2013 INGEOMINAS, Programas De Exploración de Aguas Subterráneas, Bogotá DC. Diciembre de 2004

Carvajal, José Henry DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 VERSIÓN No. 2 Bogotá D. C, Agosto de 2013

Carvajal, José Henry Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos, Anexo A, glosario de unidades y subunidades geomorfológicas.

Freeze, R. A., and J. A. Cherry, 1979, Groundwater: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 604 p.

INGEOMINAS, Estándares de Presentación Cartográfica Versión 1.1, Escalas 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000 y 1:2.000. Ingeominas Subdirección de Información Geológica Minera, Julio 200

Carvajal, José Henry ESTÁNDARES DE CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA APLICADA A MOVIMIENTOS EN MASA PARA PLANCHAS A ESCALA 1:100.000

Carvajal, José Henry PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA EN COLOMBIA Por José Henry Carvajal (1) Geólogo – INGEOMINAS Bogotá, septiembre 2011

Salamanca. Jorge .PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL CARBON UTILIZADAS EN EL CALCULO Y DISEÑO DE PILARES DE LA MINA EL BOSQUE –SOGAMOSO-BOYACA 2013

Ramírez . Jimmy. ESTUDIO GEOLOGICO –GEOTECNICO Y ANALISIS DE ESTABILIDAD PARA EL DESLIZAMIENTO PRESENTADO EN LA BACA DE LA VIA CUITIVA , DEL MUNICIPIO DE CUITIVA ,DEPARTAMENTO DE BOYACA 2012

**MSc. Norly Belandria, MSc. Francisco Bongiorno** UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE GEOLÓGICA GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GEOLOGÍA APLICADA (GIGA) CLASIFICACIONES GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS SEGÚN: BIENIAWSKI. BARTON. HOEK Y BROWN. ROMANA. GEOTECNIA APLICADA 2012

Jaime Suarez /[www.erosion.com.co/delizamiento geotécnico /instrumentación y monitoreo](http://www.erosion.com.co/delizamiento_geotecnico/instrumentación_y_monitoreo)