

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A MOVIMIENTOS EN
MASA DE LA PLANCHA 136-II-C, ESCALA 1:25.000, APLICANDO REDES
NEURONALES ARTIFICIALES**

**JHONATAN STEVEN RIVERA RIVERA
DIEGO FERNANDO JÁCOME JULIO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A MOVIMIENTOS EN
MASA DE LA PLANCHA 136-II-C, ESCALA 1:25.000, APLICANDO REDES
NEURONALES ARTIFICIALES**

**JHONATAN STEVEN RIVERA RIVERA
DIEGO FERNANDO JÁCOME JULIO**

MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
Trabajo de grado para optar el título de
Geólogo

Director
JORGE LEONARDO CAMARGO DAZA
Geólogo

Codirector
JOAQUÍN ANDRÉS VALENCIA ORTIZ
Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

*A mi padre, Luis Alfredo Jácome Bohórquez,
Por su apoyo incondicional.
Gracias por dejarme la mejor herencia,
Tu ejemplo y mi educación.*

*A mi madre, Neidy Julio Velásquez,
Por su amor incondicional y verdadero,
Gracias por guiarme en cada paso de mi vida.*

*A mis hermanos, Luis Alejandro Jácome y José Alfredo Jácome,
Por ser mi motor y motivación a diario.
Gracias por ser mis compañeros de vida
Y cómplices de sueños.*

*A mi amor y compañera, Alejandra Arévalo,
Por su sonrisa y entrega incondicional,
Gracias por existir y estar conmigo,
En las buenas y en las malas.*

Los amo con todo mi corazón, GRACIAS.

DIEGO F. JÁCOME J.

DEDICATORIA

DEDICACIÓN ESPECIAL A MIS PADRES YESID RIVERA MENESES Y MARIA RIVERA BADILLO, POR LA CONFIANZA, CONSEJOS Y EDUCACIÓN BRINDADA BASADA EN EL RESPETO, RESPONSABILIDAD, HUMILDAD Y COMPAÑERISMO; POR SU ESFUERZO, DEDICACIÓN Y APOYO INCONDICIONAL A LO LARGO DE LA CARRERA, Y SOBRE TODO POR SER EL EJEMPLO DE MI VIDA.

A MI NEGRITA PATRICIA SANDOVAL POR HACERME FELÍZ DIARIAMENTE A TRAVÉS DE SU SENCILLEZ, NOBLEZA Y ALEGRÍA, GRACIAS POR SER LA FUENTE DE INSPIRACIÓN DE MI VIDA, TE AMO, Y DESEO PODER DISFRUTAR MUCHO MÁS TIEMPO DE TÚ CONTAGIOSA SONRISA.

A MIS HERMANAS KAREN Y STEPHANIE POR SER MIS AMIGAS MÁS CERCANAS, Y COMPARTIR MOMENTOS AGRADABLES; LAS QUIERO MUCHO. A MIS FAMILIARES MÁS CERCANOS, EN ESPECIAL A MI NONO LUIS FELIPE POR SU COMPAÑÍA EN LAS SALIDAS EN BICICLETA Y SUS SABIOS CONSEJOS, A MI TÍO JUANCHO POR LAS EXPERIENCIAS ADQUIRIDAS EN LOS VIAJES POR COLOMBIA Y SER UNA FUENTE DE ALEGRÍA INCLUSO EN LOS PEORES MOMENTOS.

A LOS PROFESORES JAIRO CLAVIJO, JOAQUÍN VALENCIA Y LUIS MORENO POR TRANSMITIRME SUS CONOCIMIENTOS Y GUIARME EN LAS RAMAS MÁS IMPORTANTES DE LA GEOLOGÍA, INCULCANDO RESPONSABILIDAD AMBIENTAL E INTERÉS CIERTÍFICO Y SOCIAL.

JHONATAN STEVEN RIVERA RIVERA

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director el geólogo Jorge Leonardo Carmargo Daza, y a nuestro codirector el Geólogo y profesor Joaquín Andrés Valencia Ortiz, nuestro más sincero agradecimiento por depositar toda su confianza en nosotros desde el primer momento, por transmitirnos todos sus conocimientos con tanta entrega y por estar siempre orientándonos y acompañándonos hasta el final para culminar con éxito éste proyecto de investigación.

A nuestras familias por ser esa fuente de apoyo y motivación incondicional para lograr nuestros objetivos y sacar adelante nuestro título como Geólogos, todo se lo debemos a ellos y estaremos eternamente agradecidos.

A la familia Quintero en el municipio de Málaga por permitirnos hospedarnos en su casa durante la fase campo, gracias por su hospitalidad y confianza.

A nuestros compañeros de geología por los momentos compartidos, en especial a Carlos Tavera y Adrian Rueda por acompañarnos durante la fase de campo del trabajo de investigación.

A los habitantes de los municipios de San José de Miranda, Enciso, Carcasí y San Miguel, gente humilde y trabajadora, por su confianza y colaboración durante la fase de campo del proyecto de investigación.

A la Universidad Industrial de Santander por ser nuestra alma mater y forjadora de un pensamiento crítico y profesional ante la vida y la sociedad.

A la Escuela de Geología, y a todos sus profesores por sus enseñanzas y consejos, gracias por ser responsables de nuestra formación académica.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
2. JUSTIFICACIÓN	24
3. OBJETIVOS	25
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	26
5. MARCO CONCEPTUAL	28
5.1. ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA ..	28
5.2. GENERALIDADES DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA	29
5.2.1. Clasificación de los movimientos en masa.....	29
5.2.2. Actividad de los movimientos en masa.	30
5.2.2.1. Estado de actividad.....	31
5.2.2.2. Distribución de la actividad.	32
5.2.2.3. Estilo de la actividad.	34
5.3. GEOMORFOLOGÍA	35
5.3.1. Morfometría.....	37
5.3.1.1. Acuenca.	38
5.3.1.2. Curvatura.	38
5.3.1.3. Rugosidad.....	40
5.3.1.4. Pendientes.	40
5.3.2. Morfodinámica.	41
5.3.3. Morfogénesis.	41
5.4. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	42
5.5. REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	43
5.5.1. Generalidades de las redes neuronales artificiales.....	43
5.5.1.1. Analogía entre una neurona biológica y una neurona artificial.....	44
5.5.1.2. Arquitectura y clasificación de las redes neuronales artificiales.....	47
5.5.2. Algoritmo Back-Propagation (BP)	50
5.5.2.1. Generalidades del algoritmo Back-Propagation.....	50
5.5.2.2. Parámetros de entrenamiento.....	52
5.5.2.3. Ventajas y desventajas del algoritmo Back-Propagation (BP).	54
6. MARCO GEOLÓGICO	57

6.1. LOCALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	57
6.2. ESTRATIGRAFÍA.....	59
6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	60
7. METODOLOGÍA.....	62
7.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA	63
7.2. ELABORACIÓN DE MAPAS PRELIMINARES PARA LA FASE DE CAMPO ..	63
7.3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA Y DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES EN CAMPO	66
7.4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE FACTORES CAUSALES CALIFICADOS.....	68
7.5. PROGRAMACIÓN Y SELECCIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.....	75
7.5.1. Creación del set de datos.	75
7.5.2. Programación de las redes neuronales artificiales.....	77
7.5.3. Determinación de la mejor red neuronal.	79
7.5.4. Validación de la red neuronal final.	80
8. INSUMOS	81
8.1. INSUMOS GENERALES.....	81
8.1.1. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) e Imágenes satelitales.	81
8.1.2. Registro SIMMA de Movimientos en Masa	82
8.2. INSUMOS TEMÁTICOS.....	82
8.2.1. Mapa Geológico.....	82
8.2.2. Mapas de Cobertura de la Tierra y Suelos Edafológicos.	82
9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	83
9.1. GEOLOGÍA	83
9.1.1. Zona de Carcasí.	83
9.1.2. Zona estructural con orientación preferencial Noroeste – Sureste.	88
9.1.3. Zona del Sinclinal de Servitá.....	92
9.2. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	101
9.2.1. Suelos Antrópicos (A).	102
9.2.2. Suelos Coluviales (Sc).....	104
9.2.3. Suelos Orgánicos (So).....	106
9.2.4. Suelos Transportados (St)	106
9.2.5. Suelos Residuales (Sr)	108
9.2.6. Rocas (R).....	110
9.3. GEOMORFOLOGÍA	111
9.3.1. Ambiente Estructural.....	113
9.3.2. Ambiente Denudacional.....	139
9.3.3. Ambiente Fluvial y Lagunar.....	155
9.3.4. Ambiente Antropogénico.....	163
9.4. MORFODINÁMICA	168
9.4.1. Análisis Estadístico.	173

9.4.1.1. Inventario de Movimientos en Masa (IMM)	173
9.4.1.2. Catálogo de Movimientos en Masa (CMM)	179
9.5. FACTORES CAUSANTES	185
9.5.1. Geología.	187
9.5.2. Densidad de fracturamiento.	189
9.5.3. Unidades Geológicas Superficiales.	192
9.5.4. Morfogenética.	195
9.5.5. Morfodinámica.	197
9.5.6. Acuenca.	200
9.5.7. Curvatura.	202
9.5.8. Pendientes.	205
9.5.9. Rugosidad.	207
9.5.10. Cobertura de la Tierra.	210
9.5.11. Suelos.	213
9.6. REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	214
9.6.1. Entrenamiento.....	214
9.6.2. Validación.	221
9.7. SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A LOS MOVIMIENTOS EN MASA	225
9.7.1. Susceptibilidad Muy Alta.	228
9.7.2. Susceptibilidad Alta.....	231
9.7.3. Susceptibilidad Moderada.....	234
9.7.4. Susceptibilidad Baja.....	236
9.7.5. Susceptibilidad Muy Baja.	238
9.7.6. Redes Neuronales Artificiales vs Método Heurístico.	240
10. CONCLUSIONES	245
11. RECOMENDACIONES.....	250
BIBLIOGRAFÍA	252
ANEXOS.....	258

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio correspondiente a la plancha 136-II-C.....	27
Figura 2. Clasificación de los movimientos en masa según su tipo de movimiento.	30
Figura 3. Estado de actividad de los movimientos en masa.	31
Figura 4. Esquema de jerarquización geomorfológica.	36
Figura 5. Perfil de curvatura.	39
Figura 6. Forma en planta de la curvatura.	39
Figura 7. Curvatura.	40
Figura 8. Propuesta de clasificación de UGS.....	42
Figura 9. Analogía entre una neurona biológica y una neurona artificial.....	45
Figura 10. Estructura general de una red neuronal con “n” entradas, “m” salidas y una sola capa oculta.	47
Figura 11. Clasificación de las RNA de acuerdo a su tipo de aprendizaje y arquitectura.	50
Figura 12. Modelo de una red neuronal artificial utilizando el algoritmo de aprendizaje Back-Propagation.....	51
Figura 13. Evolución del error de aprendizaje y del error de generalización en función de las iteraciones. a) Situación idealizada. b) Situación real.....	56
Figura 14. Localización geológica del área de estudio correspondiente a la plancha 136-II-C.....	58
Figura 15. Unidades litoestratigráficas de la plancha 136-II-C.....	59
Figura 16. Diagrama metodológico del trabajo de Investigación.....	62
Figura 17. Localización de movimientos en masa registrados en el SIMMA e identificación de posibles movimientos en masa.	65
Figura 18. Mapa de estaciones de la fase de campo.....	66
Figura 19. Atributos de la variable cobertura de la tierra.....	72
Figura 20. Atributos de la variable suelos.	73
Figura 21. Movimientos en masa de la plancha 136-II-C.	76
Figura 22. Mapa geológico de la plancha 136-II-C.....	84
Figura 23. Formación Paleozoico del Río Nevado (Pcrn).	85
Figura 24. Depósitos de cauce activo (Qal1).	86
Figura 25. Cono de deyección (Qcal).....	87
Figura 26. Formación Aguardiente (Kia).	89
Figura 27. Flanco Este del Anticlinal Aguardiente.....	90
Figura 28. Formación Capacho (Ksc).	91
Figura 29. Formación La Luna (Ksl).....	91
Figura 30. Depósitos coluviales (Qc).	93
Figura 31. Formación Colón – Mito Juan (Kscm).....	95

Figura 32. Contacto neto entre rocas del Paleoceno correspondientes a la Formación Barco (Tpb) y la Formación Los Cuervos (Tplc)	96
Figura 33. Depósitos aluviales del Río Servitá.....	98
Figura 34. Terraza aluvial (Qt) de la Quebrada El Salado.	99
Figura 35. Depósito Coluvial (Qc) representativo del municipio de Enciso.	100
Figura 36. Mapa de UGS de la plancha 136-II-C.	102
Figura 37. Área de las UGS en la plancha 136-II-C.....	103
Figura 38. Relación entre el grado de meteorización bajo o nulo (color naranja) y el grado de meteorización intermedio a alto (color azul) para cada una de las formaciones de la plancha.	103
Figura 39. Suelo Antrópico (A) correspondiente al casco urbano del municipio de Enciso.....	104
Figura 40. Suelo Coluvial (Sc) de la Vereda Ínsula.....	105
Figura 41. Suelo Orgánico (So) de la Vereda San José.	107
Figura 42. Suelo Transportado (St) en la Quebrada Suparí.....	108
Figura 43. Suelos residuales de la Formación Colón - Mito Juan (SrKscm) y la Formación La Luna (SrKsl) en la vereda Loma El Negro.....	109
Figura 44. Roca débilmente meteorizada de la Formación La Luna.....	110
Figura 45. Mapa geomorfológico a escala 1:25.000 de la plancha 136-II-C.	111
Figura 46. Número de unidades geomorfológicas y geoformas catacterizadas en la plancha 136-II-C según los ambientes morfogenéticos.	112
Figura 47. Área de influencia de los diferentes ambientes morfogenéticos presentes en la plancha 136-II-C.....	112
Figura 48. Área de influencia de las unidades geomorfológicas estructurales de la plancha 136-II-C.	115
Figura 49. Panorámica del sector sur de la vereda Babega en el municipio de Carcasí.	116
Figura 50. Colina estructural.	118
Figura 51. Escarpe estructural (See) sobre la Formación Mirador (Tem).	121
Figura 52. Espolón festoneado bajo de longitud larga (Sefesbl).....	124
Figura 53. Panorámica del Valle del río Tunebo.	127
Figura 54. Panorámica de la vereda Cenacuta donde circula la Quebrada La Miel que desemboca en el río Tunebo.	129
Figura 55. Escarpe de línea de falla (Slfe) sobre la Formación Aguardiente (Kia) en la vereda Robles del municipio de Enciso.	134
Figura 56. Lomo de obturación (Slo).....	134
Figura 57. Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle) sobre la Formación Los Cuervos (Tplc) y Lomo estructural (Sloes) sobre la Formación Barco (Tpb).	135
Figura 58. Área de influencia de las unidades geomorfológicas denudacionales de la plancha 136-II-C.....	141
Figura 59. Cima (Dc). a) Localizada en la Sierra de las Veredas Ropejo Bajo y Ropejo presentando una dirección SE-NW, Alto. b) Perfil transversal.....	142
Figura 60. Panorámica de las veredas Loma El Negro y El Juncal del municipio de Enciso desde la vereda Salado Bravo en San José de Miranda.....	143
Figura 61. Panorámica del flanco oriental del sinclinal del valle del Río Servitá.	144

Figura 62. Escarpe de erosión mayor (Deem).	146
Figura 63. Escarpe de erosión menor (Deeme).	147
Figura 64. Escarpe faceteado (Def).	148
Figura 65. Perfil de la loma denudada (Dld) localizada en la Vereda Mosgua del Municipio de Enciso.	150
Figura 66. Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm).	153
Figura 67. Ladera ondulada (Dlo).	154
Figura 68. Área de las unidades geomorfológicas fluviales de la plancha 136-II-C.	156
Figura 69. Panorámica del Valle del río Servitá.	158
Figura 70. Plano y artesa lagunar (Fpl).	160
Figura 71. Terrazas (Fte) y escarpes de terraza de erosión (Ftee).	162
Figura 72. Área de influencia de las unidades geomorfológicas antropogénicas de la plancha 136-II-C.	164
Figura 73. Cantera (Ac) de la vereda Salado Bravo.	165
Figura 74. Panorámica de la superficie de explanación (Asp) correspondiente la Cabecera Municipal de Enciso.	167
Figura 75. Panorámica de las Veredas Saucara, Buenavista y Centro del Municipio de Carcasí.	168
Figura 76. Movimientos en masa de la plancha 136-II-C.	171
Figura 77. Flujo de lodo (DI). (JR-I3).	172
Figura 78. Deslizamiento traslacional de detritos (Dtd) y Flujo de detritos (FI). (JR-17).	172
Figura 79. Deslizamiento traslacional en cuña (Dtc). (JR-I10).	173
Figura 80. Densidad del IMM de la plancha 136-II-C por municipios.	174
Figura 81. Densidad del IMM de la plancha 136-II-C por veredas.	174
Figura 82. Tipo de movimiento para el IMM de la plancha 136-II-C.	175
Figura 83. Estado de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.	176
Figura 84. Estilo de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.	176
Figura 85. Distribución de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.	177
Figura 86. Tipo de material del IMM de la plancha 136-II-C.	177
Figura 87. Tipo de erosión del IMM de la plancha 136-II-C.	178
Figura 88. Litología asociada del IMM de la plancha 136-II-C.	179
Figura 89. Unidad geomorfológica asociada del IMM de la plancha 136-II-C.	179
Figura 90. Densidad del CMM de la plancha 136-II-C por municipios.	180
Figura 91. Densidad del CMM de la plancha 136-II-C por veredas.	180
Figura 92. Tipo de movimiento para el CMM de la plancha 136-II-C.	181
Figura 93. Estado de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.	182
Figura 94. Estilo de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.	182
Figura 95. Distribución de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.	183
Figura 96. Tipo de material del CMM de la plancha 136-II-C.	183
Figura 97. Litología asociada del CMM de la plancha 136-II-C.	184
Figura 98. Unidad geomorfológica asociada del CMM de la plancha 136-II-C.	185
Figura 99. Calificación de susceptibilidad del atributo Geología de la plancha 136-II-C.	187

Figura 100. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Geología.	188
Figura 101. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Geología.	189
Figura 102. Calificación de susceptibilidad del atributo de Densidad de Fracturamiento de la plancha 136-II-C.....	190
Figura 103. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Densidad de Fracturamiento.....	191
Figura 104. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Densidad de Fracturamiento.....	191
Figura 105. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales de la plancha 136-II-C.	192
Figura 106. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales.	193
Figura 107. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales.	194
Figura 108. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Morfogenética de la plancha 136-II-C.	195
Figura 109. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Morfogenética.	196
Figura 110. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo Morfogenética.	197
Figura 111. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Morfodinámica de la plancha 136-II-C.	198
Figura 112. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Morfodinámica.	199
Figura 113. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Morfodinámica.	199
Figura 114. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Acuenca de la plancha 136-II-C.....	200
Figura 115. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Acuenca.....	201
Figura 116. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Acuenca.	202
Figura 117. Calificación de Susceptibilidad del Atributo Curvatura de la plancha 136-II-C.	203
Figura 118. Relación entre el número de píxeles y las clases del atributo "Curvatura".....	204
Figura 119. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo "Curvatura".....	204
Figura 120. Calificación de susceptibilidad del atributo de pendientes de la plancha 136-II-C.....	205
Figura 121. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Pendientes.....	206

Figura 122. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Pendientes.....	207
Figura 123. Calificación de susceptibilidad del atributo de Rugosidad de la plancha 136-II-C.....	208
Figura 124. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Rugosidad.....	209
Figura 125. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Rugosidad.....	209
Figura 126. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Cobertura de la Tierra de la plancha 136-II-C.....	210
Figura 127. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Cobertura de la Tierra.....	212
Figura 128. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Cobertura de la Tierra.....	212
Figura 129. Calificación de Susceptibilidad del Atributo Suelo de la plancha 136-II-C.....	213
Figura 130. Relación entre el número de píxeles y las clases del atributo “Suelo”.....	215
Figura 131. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo “Suelo”.....	215
Figura 132. Arquitectura detallada de la red neuronal.....	219
Figura 133. Arquitectura generalizada de la red neuronal.....	219
Figura 134. Performance de la red neuronal.....	220
Figura 135. Coeficiente de determinación de la red neuronal artificial.....	220
Figura 136. Matriz de confusión para el umbral 0,8.....	223
Figura 137. Curva ROC.....	224
Figura 138. Mapa de zonificación de la susceptibilidad relativa a movimientos en masa de la plancha 136-II-C.....	226
Figura 139. Cantidad de píxeles en cada clase de susceptibilidad.....	227
Figura 140. Cantidad de píxeles de MM en cada clase de susceptibilidad.....	228
Figura 141. Mapa de susceptibilidad relativa a lmovimientos en masa de la plancha 136-II-C aplicando el método heurístico.....	241
Figura 142. RNA vs Método Heurístico. Diferencia entre los mapas de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa generados mediante redes neuronales artificiales y el método heurístico propuesto por el SGC, 2013.....	242

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Clasificación de MM según su material.	29
Tabla 2. Distribución de la actividad de los movimientos en masa.....	33
Tabla 3. Estilos de la actividad de los movimientos en masa.....	34
Tabla 4. Funciones de activación comúnmente usadas en las redes neuronales.	45
Tabla 5. Algoritmos de entrenamiento Back-Propagation.	52
Tabla 6. Parámetros principales a la hora de frenar el entranamiento de una RNA.	53
Tabla 7. Clasificación de pendientes para interpretación morfogenética.....	64
Tabla 8. Depósitos cuaternarios calificados según la susceptibilidad por MM.	68
Tabla 9. Atributo de fábrica calificado según la susceptibilidad por MM.....	69
Tabla 10. Atributo de resistencia calificado según la susceptibilidad por MM.	69
Tabla 11. Atributo de relieve relativo calificado según la susceptibilidad por MM.	71
Tabla 12. Atributo de Inclinación de la ladera calificada según la susceptibilidad por MM.....	71
Tabla 13. Calificación de susceptibilidad por MM de los atributos acuenca, rugosidad, pendiente y densidad de fracturamiento.	73
Tabla 14. Calificación de susceptibilidad por MM del atributo de UGS.	74
Tabla 15. Calificación de susceptibilidad por MM del atributo de Curvatura.	75
Tabla 16. Parámetros constantes utilizados en el entrenamiento.	77
Tabla 17. Parámetros de entrenamiento para cada set de datos.....	78
Tabla 18. Reclasificación de las salidas de la red en valores de susceptibilidad.	79
Tabla 19. Unidades geomorfológicas de origen estructural.....	113
Tabla 20. Unidades geomorfológicas de origen denudacional.	140
Tabla 21. Unidades geomorfológicas de origen fluvial.	156
Tabla 22. Unidades geomorfológicas de origen antropogénico.....	163
Tabla 23. Inventario de MM de la plancha 136-II-C identificados en campo.	169
Tabla 24. Catálogo de MM de la plancha 136-II-C identificados en campo.....	170
Tabla 25. Factores causantes.	186
Tabla 26. Reclasificación en clases enteras de los atributos suelo, cobertura de la tierra y geología.	186
Tabla 27. Relación entre el factor causante Geología y la ocurrencia de MM.....	188
Tabla 28. Relación entre el factor causante Densidad de Fracturamiento y ocurrencia de MM.	191
Tabla 29. Relación entre el factor causante de UGS y la ocurrencia de MM.	193
Tabla 30. Relación entre el factor causante Morfogenética y la ocurrencia de MM.	196
Tabla 31. Relación entre el factor causante Morfodinámica y la ocurrencia de MM.	199
Tabla 32. Relación entre el factor causante Acuenca y la ocurrencia de MM.	201

Tabla 33. Relación entre el factor causante Curvatura y la ocurrencia de MM. ..	203
Tabla 34. Relación entre el factor causante Pendientes y la ocurrencia de MM.	206
Tabla 35. Relación entre el factor causante Rugosidad y la ocurrencia de MM.	208
Tabla 36. Relación entre el factor causante Cobertura de la Tierra y la ocurrencia de MM.	211
Tabla 37. Relación entre el factor causante “Suelo” y la ocurrencia de MM.	214
Tabla 38. Condiciones para la selección de las mejores redes neuronales.	217
Tabla 39. Modelos de redes neuronales pre-seleccionados.	217
Tabla 40. Importancia relativa de cada uno de los factores causantes.	225
Tabla 41. Número de píxeles para cada clase de susceptibilidad.	227
Tabla 42. Número de píxeles con movimientos en masa presentes en cada clase de susceptibilidad.	228
Tabla 43. Número de píxeles y frecuencia relativa de las clases del mapa heurístico de susceptibilidad relativa a movimientos en masa.	241
Tabla 44. Número de píxeles y frecuencia relativa de la magnitud las diferencias entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).	243
Tabla 45. Número de píxeles y frecuencia relativa de las diferencias positivas y negativas entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).	244
Tabla 46. Número de píxeles y frecuencia relativa del valor absoluto de las diferencias entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).	244

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Tabla de recolección de datos de Morfometría para Cartografía Geomorfológica.....	258
Anexo B. Formato modificado para Inventario de Movimientos en Masa (IMM) .	259
Anexo C. Formato modificado para Catálogo de Movimientos en Masa (CMM) .	259
Anexo D. Zonas consideradas como susceptibilidad baja para el primer set de datos de la plancha 136-II-C.....	260
Anexo E. Zonas consideradas como susceptibilidad baja para el segundo set de datos de la plancha 136-II-C.....	260
Anexo F. Secciones de entrenamiento, validación y test para las zonas consideradas como susceptibilidad baja y los MM de la plancha 136-II-C utilizadas en el tercer set de datos	261
Anexo G. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para la plancha 136-II-C.....	261
Anexo H. Tabla de Movimientos en masa registrados en la plataforma SIMMA para la plancha 136-II-C.....	262

RESUMEN

TÍTULO: ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A MOVIMIENTOS EN MASA DE LA PLANCHA 136-II-C, ESCALA 1:25.000, APLICANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES*

AUTORES: Jhonatan Steven Rivera Rivera, Diego Fernando Jácome Julio**

PALABRAS CLAVES: Zonificación, Susceptibilidad, Geomorfología, Movimientos en Masa, Redes Neuronales Artificiales, Backpropagation, Plancha 136-II-C, Carcasí.

DESCRIPCIÓN:

La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores causantes (intrínsecos) que contribuyen a la formación de movimientos en masa; un método eficiente y exacto para generar dicha correlación son las Redes Neuronales Artificiales (RNA). En este trabajo de investigación fueron evaluados once factores causantes (geología, densidad de fracturamiento, unidades geológicas superficiales, morfogenética, morfodinámica, acuenca, curvatura, pendientes, rugosidad, cobertura de la tierra y suelos); con el objetivo de realizar la zonificación, a escala 1:25.000, de la susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C, mediante el algoritmo de entrenamiento Back-Propagation de Redes Neuronales Artificiales.

La arquitectura 11-18-1 entrenada con el algoritmo Variable Learning Rate Gradient Descent (GDx), arrojó un buen rendimiento con ACC = 0,8817 y ROC = 0,9841. El análisis de la importancia relativa de las entradas de la red, aplicando el método "Stepwise", indicó que los factores causantes de rugosidad (MSE=0,1874) y morfodinámica (MSE=0,1891) son los más influyentes en la ocurrencia de movimientos en masa. Finalmente el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C indicó que las zonas de susceptibilidad muy alta son las más frecuentes (41,53%), seguidas en orden descendente, por las zonas de susceptibilidad alta (18,3%), baja (14,67%), moderada (13,53%) y muy baja (11,96%); por lo que resulta importante y necesario realizar estudios de amenaza y riesgo en el área de estudio, que permitan establecer zonas donde sea necesario intervenir con el fin de prevenir y mitigar daños causados por este tipo de desastre natural.

*Proyecto de grado. Modalidad: Trabajo de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Jorge Camargo. Co-director: Joaquin Valencia.

ABSTRACT

TITLE: RELATIVE SUSCEPTIBILITY ZONING TO LANDSLIDE OF PLATE 136-II-C, AT 125.000 SCALE, IMPLEMENTED BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. A CASE ASTUDY FROM CARCASI AND ENCISO, SANTANDER*

AUTHORS: Jhonatan Steven Rivera Rivera, Diego Fernando Jácome Julio**

KEYWORDS: Zoning, Susceptibility, Geomorphology, Mass movements, Artificial Neural Network, Backpropagation, Plate 136-II-C, Carcasí.

DESCRIPTION:

The estimation of susceptibility is based on the correlation of the main causing factors contributing to the formation of mass movements; an efficient and accurate method, in order to stablish such correlation, is the Artificial Neural Networks (ANN). In this research were evaluated eleven causing factors (geology, density of fracturing, surface geological units, morphogenetic, morphodynamics, mining area, bend, slope, roughness, land cover and soil); with the aim of zoning the mass movements susceptibility, of a 1:25.000 layer (136-II-C), using Back-Propagation-Artificial Neural Networks training algorithm.

The model 11-18-1 architecture, which was ran with the Variable Learning Rate Gradient Descent (GDx) algorithm, showed a good performance, with ACC = 0.8817 and ROC = 0.841. The relative importance analysis of ANN inputs, using stepwise method, indicated that roughness (MSE=0.1874) and morphodynamics (0.1891) are the most influential causing factors when mass movements happened. Finally, the susceptibility map, which showed this movements of the plate 136-II-C, indicated that the highest susceptibility zones are the most frequent ones (41.53%), followed in descending order by: high susceptibility areas (18.3%), low susceptibility areas (14.67%), moderate susceptibility areas (13.53%) and very low susceptibility areas (11.96%); consequently it is important and necessary to perform threat and risk studies, that allow to settle zones where is necessary to intervene in order to prevent and mitigate damage caused by such natural disaster.

*Degree Project. Modality: Research Work.

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. Geology School. Director: Jorge Camargo. Co-director: Joaquín Valencia.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, los análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa (también llamados MM) en el territorio Colombiano se han desarrollado utilizando diferentes métodos, siendo el método heurístico a escala 1:100.000 el más usado actualmente debido, a que integra diferentes parámetros geológicos, geomorfológicos, edafológicos y de cobertura vegetal los cuales están relacionados directamente a la ocurrencia de dichos fenómenos. Este análisis ha cobrado gran importancia en el país ya que contribuye en la evaluación, prevención y gestión del riesgo, así como en la mitigación de desastres naturales por parte de las entidades territoriales, evitando que dichos eventos afecten la integridad de las personas y la infraestructura de los territorios. Sin embargo, actualmente el entrenamiento y la simulación de sistemas de inteligencia artificial tienen gran auge en el cálculo de dicha susceptibilidad a escalas más detalladas, arrojando resultados muy precisos.

El presente trabajo de investigación busca identificar las zonas más susceptibles a MM a escala 1:25.000, para generar un mapa de susceptibilidad relativa a dichos fenómenos para la plancha 136-II-C, localizada al Este del departamento de Santander y conformada por los municipios de San José de Miranda, Enciso, San Miguel, Capitanejo y Carcasí. Dicha zonificación se realizará aplicando un modelo matemático utilizando redes neuronales artificiales (RNA) a partir del inventario de movimientos en masa (IMM) de la zona de estudio, registrados en la plataforma de Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC, así como del procesamiento de mapas calificados de los diferentes factores causantes de dichos fenómenos, con el fin de aportar conocimiento científico a la escala de detalle mencionada, que contribuya a tomar decisiones importantes por parte de las entidades gubernamentales a la hora de construir planes de ordenamiento territorial y gestión del riesgo, para futuros proyectos de infraestructura y desarrollo, tomando medidas preventivas en las áreas más susceptibles.

1. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Santander es uno de los departamentos de Colombia con mayor registro de MM según el catálogo nacional de movimientos en masa del Ingeominas (2002), cuyo origen está relacionado con el fuerte control estructural al que se encuentra sometido el departamento, manifestado actualmente en los grandes relieves de la Cordillera Oriental de Colombia y en una alta densidad de fracturamiento de las rocas, que sumado a la geología, geomorfología, condiciones climáticas y alta actividad sísmica de la zona, crean un ambiente propicio para la generación de dichos procesos. En este sentido, dado que los MM son uno de los principales fenómenos naturales que amenazan la vida humana y la infraestructura de los municipios de Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) planteó en el 2013 el “Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:100000”, además se realizaron diferentes proyectos en el marco del convenio SGC – UIS: “Contribución a los estudios de geomorfología para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa de las planchas 87,110,119,121,136,137 y 153” también a escala 1:100.000, realizados por Betancourt, Hernández, Jaimes, Forero y Rincón respectivamente en el 2014, con el fin de prevenir y mitigar los efectos o daños ocasionados por dichos fenómenos.

Sin embargo, debido a que dicha metodología se queda corta a escalas más detalladas de ámbito local, y al constante crecimiento en la infraestructura y demografía de la zona de estudio, surge la necesidad de investigar y considerar la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa (también llamada: ZSMM), en este caso de la plancha 136-II-C, una prioridad para mitigar daños en un escenario tan particularmente propenso.

2. JUSTIFICACIÓN

El SGC planteó en el 2013 como se mencionó anteriormente, la metodología para generar mapas de ZSMM a escala 1:100.000 a través del método heurístico basado en criterios expertos, arrojando buenos resultados para trabajos a nivel regional como los del proyecto de amenazas en el 2014 (Convenio SGC-UIS), sin embargo no es una herramienta que se ajusta al trabajar la información a nivel local.

Recientemente se están trabajando nuevos tipos de metodologías para la ZSMM basándose en el entrenamiento y simulación de sistemas de inteligencia artificial, dentro de los que destacan los sistemas de Lógica Difusa (LD), Algoritmos Difusos (AD), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), Programación Geotécnica (PG), Colonia de Hormigas y Algoritmos Evolucionados (SGC, 2013). Cabe resaltar que dentro de todos estos métodos estocásticos, el trabajo con Redes Neuronales Artificiales (RNA) se ha convertido en una herramienta muy útil y cada día es más empleada en diferentes estudios alrededor del mundo, arrojando resultados muy exactos según los estudios de Bi *et al.*, 2014; Lee, 2007; Lee *et al.*, 2003; Nourani *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2011 & Wu *et al.*, 2013.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, el presente trabajo de investigación analizará la ZSMM a escala 1:25.000 de la plancha 136-II-C a partir del modelo matemático de Redes Neuronales Artificiales (RNA), por lo que este proyecto sentaría la base como plan piloto para generar una línea de investigación que contribuya en la construcción de una metodología a escala 1:25.000 aplicable a diferentes regiones del país. La propuesta metodológica a escala 1:25.000 incentivará el continuo aprendizaje de los movimientos en masa en Colombia por parte de la comunidad geológica y promoverá el desarrollo y aplicación de métodos estocásticos utilizados actualmente en otros países, especialmente los relacionados a redes neuronales artificiales (RNA).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Generar el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C, jurisdicción de los municipios Carcasí, Enciso, San Miguel, Capitanejo y San José de Miranda (Santander), aplicando el modelo matemático de Redes Neuronales Artificiales como propuesta metodológica para estudios de susceptibilidad a escala 1:25.000, con el fin de aportar conocimiento científico de óptima resolución que contribuya en futuras decisiones gubernamentales regionales y locales.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar el mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 136-II-C a escala 1:25.000 integrando estudios morfométricos, morfogenéticos y morfodinámicos.
- Refinar el mapa geológico de la plancha 136-II-C a escala 1:25.000 a partir de la información adquirida en la interpretación geomorfológica y el trabajo de campo.
- Elaborar el mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000 a partir de la interpretación de imágenes satelitales y trabajo de campo.
- Generar el mapa de susceptibilidad relativa a movimientos en masa de la plancha 136-II-C a escala 1:25.000, aplicando el algoritmo de aprendizaje backpropagation.

4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

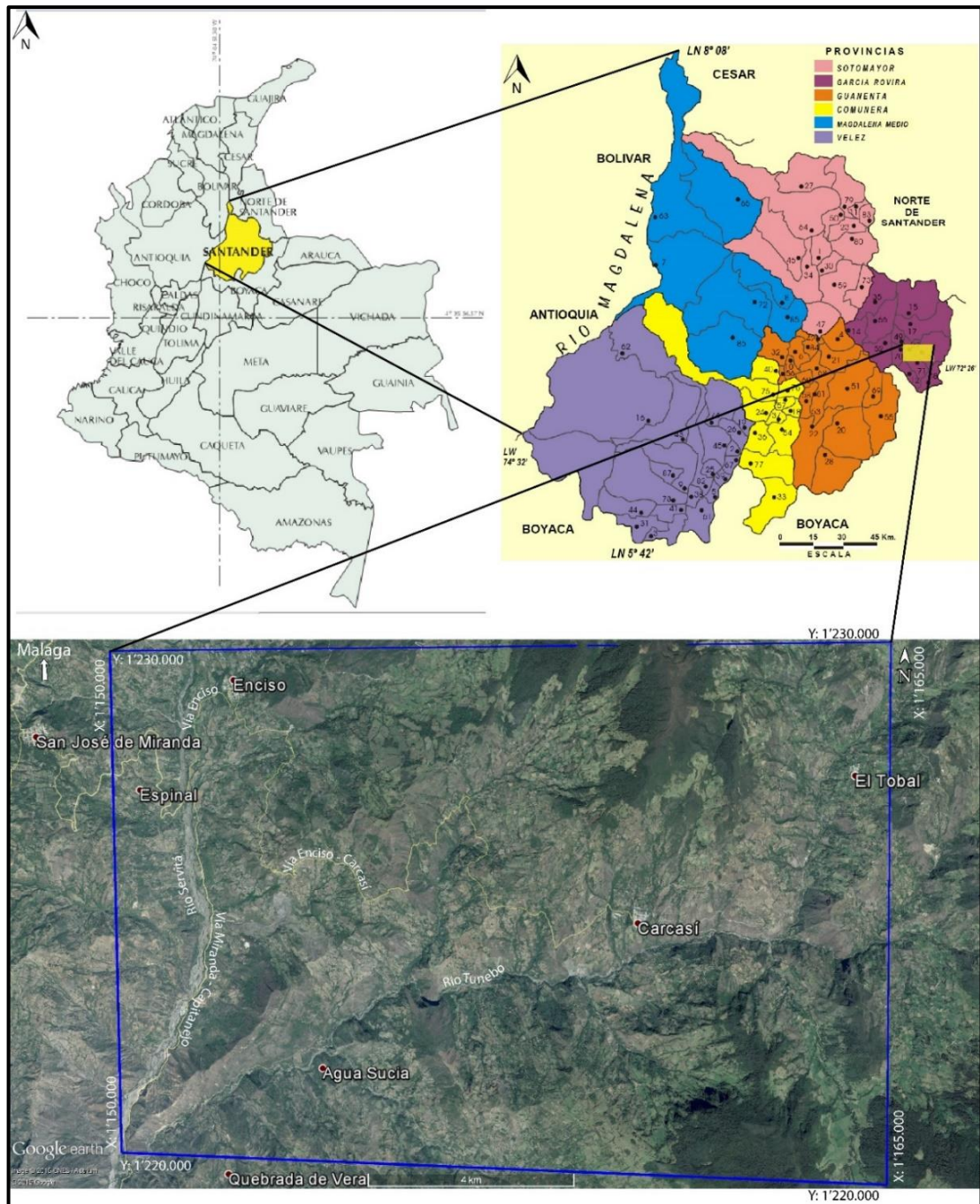
La plancha 136-II-C está ubicada dentro de la Provincia García Rovira del Departamento de Santander y comprende de Oeste a Este los municipios de San José de Miranda, Enciso, Capitanejo, San Miguel y Carcasí, abarcando un área total de 150km²; presenta datum Bogotá con origen central y está delimitada por las coordenadas x: 1'150.000 a x: 1'165.000 al Este; y: 1'220.000 a y: 1'230.000 al Norte tal y como se muestra en la **Figura 1**.

Fisiográficamente se encuentra ubicada sobre la Cordillera Oriental Colombiana al borde oriental del Macizo de Santander, caracterizada por una variedad de climas que varían desde los templados suaves hasta los fríos intensos y el típico clima de páramo, con elevaciones que van desde los 1095 hasta los 3440 m.s.n.m., presentando en su gran mayoría una topografía abrupta con pendientes fuertes.

Hidrológicamente los ríos y quebradas circulan a lo largo de cañones profundos y laderas escarpadas, destacando principalmente el Río Servitá, el cual circula en forma paralela a la falla regional de Servitá en sentido Norte - Sur, así como el Río Tunebo, que se extiende desde el Este de la plancha, atravesando el municipio de Carcasí hacia el Suroeste de la zona de estudio.

La principal vía de acceso desde la capital del Departamento es la carretera Central del Norte, que comunica a Bucaramanga con el municipio de Málaga, esta carretera principal se extiende hasta Capitanejo pasando por San José de Miranda. Dentro de la zona de estudio, otras vías principales son las que comunican los municipios de San José de Miranda con Enciso, Enciso – Carcasí y Carcasí – San Miguel.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio correspondiente a la plancha 136-II-C.



Fuente: a) Mapa político de Colombia (Tomado y modificado de Royero & Vargas, 1999). b) Localización y división político-administrativa del Departamento de Santander (Tomado & modificado de Royero & Clavijo, 2001). c) Imagen satelital CNES/Astrium de la zona de estudio (Tomado y modificado de Google Earth Pro).

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Según Carcedo *et al.*, (2002) en Obregón & Lara. (2013), la susceptibilidad está definida como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada o hallarse bajo la influencia de un proceso determinado. Por su parte, Cataya et al., (2008) define la zonificación de la susceptibilidad como la división de la superficie terrestre en áreas que representan diferentes grados de susceptibilidad relativa hacia la ocurrencia de desastres naturales. De esta manera se entiende por zonificación de la susceptibilidad relativa a los movimientos en masa como la división cualitativa de la superficie terrestre de un área determinada, en zonas que representan diferentes grados de susceptibilidad a encontrarse bajo la influencia de un movimiento en masa.

La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores causantes (intrínsecos) que contribuyen a la formación de MM. Este análisis identifica las condiciones que dieron origen a los MM presentes en la zona de estudio, calcula los pesos o la importancia de cada factor causante a generar MM y genera una ecuación final que permite calcular la susceptibilidad.

Para calcular el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de una zona existen diferentes métodos que pueden ser aplicados teniendo en cuenta tres factores: i) El propósito de la zonificación ii) El nivel de zonificación y iii) La escala de zonificación. Uno de ellos es el método heurístico, en éste son los expertos quienes definen los pesos y la ecuación a utilizar en base a su conocimiento, criterio y experiencia; por otro lado, los métodos estadísticos, determinísticos, basados en entrenamiento y simulación (Redes Neuronales Artificiales y Lógica Difusa), e híbridos; generan el mapa de susceptibilidad a partir de métodos numéricos como

la aplicación de la estadística y las funciones de probabilidad (SGC, 2013). Cabe destacar que los mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa (MSMM), si bien identifican áreas donde se puede generar potencialmente tales procesos, en ellos no figura la totalidad de zonas que pueden ser afectadas, ni predicen cuando ocurrirán los MM (Carcedo et al., 2002 en Obregón & Lara, 2013).

5.2. GENERALIDADES DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA



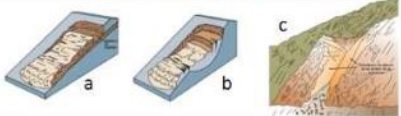
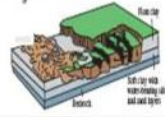
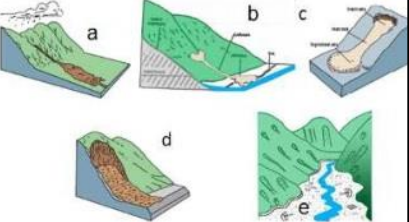

Los movimientos en masa son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original sin que se evidencie medio de transporte alguno, siendo tan solo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras (Gray & Sotir, 1996; Tragsa & Tragsatec, 1994).

5.2.1. Clasificación de los movimientos en masa. Los movimientos en masa se pueden clasificar según su material (**Tabla 1**), geometría, velocidad, mecanismo de disparo y tipo de movimiento (**Figura 2**).

Tabla 1. Clasificación de MM según su material.

TIPO DE MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Roca	Material compuesto en un 100% de elementos parentales o roca expuesta.
Detritos	Material compuesto por un 50% de roca y un 50% de tierra o material meteorizado.
Tierra	Material compuesto por un 100% de suelo o capas muy meteorizadas.

Figura 2. Clasificación de los movimientos en masa según su tipo de movimiento.

Tipo	Subtipo	Esquema
Caídas	Caída de rocas (detritos o suelo)	
Volcamiento	Volcamiento de roca (Bloque). Volcamiento Flexural de roca o del macizo rocoso	
Deslizamiento roca o suelo	Deslizamiento traslacional (a) Deslizamiento rotacional (b) Deslizamiento en cuña (c)	
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)	
Flujo	Flujo de detritos (a) Crecida de detritos Flujo de lodo (b) Flujo de tierra (c) Flujo de turba Avalancha de detritos (d) Avalancha de rocas (e) Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (arena, limo, detritos, roca fracturada)	
Reptación	Reptación de suelos (a) Soliflucción (b) Geliflucción (en permafrost)	

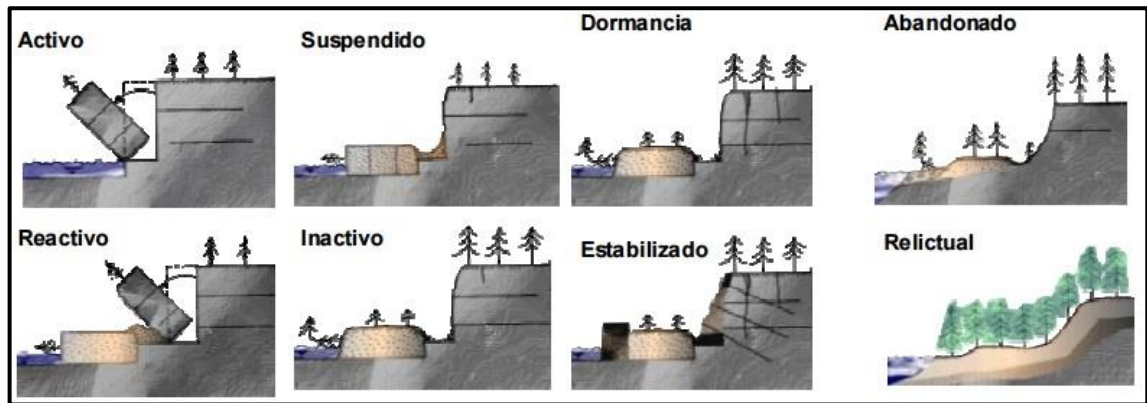
Fuente: Tomado de Proyecto Multinacional Andino (PMA: GCA, 2007).

5.2.2. Actividad de los movimientos en masa. La actividad de un movimiento en masa se refiere a tres aspectos generales del desplazamiento en el tiempo de la masa del material involucrado: el estado, la distribución y el estilo de la actividad. (WP/WLI, 1999 en PMA: GCA, 2007).

5.2.2.1. *Estado de actividad.* El estado describe aquello que se sabe con respecto a la regularidad o irregularidad temporal del desplazamiento. Según el PMA: GCA, 2007 se distinguen ocho estados de actividad, como se muestra en la

Figura 3 **Figura 3.**

Figura 3. Estado de actividad de los movimientos en masa.



Fuente: Tomado de Proyecto Multinacional Andino (PMA: GCA, 2007).

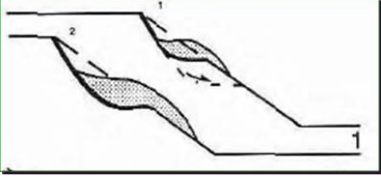
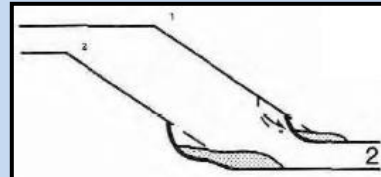
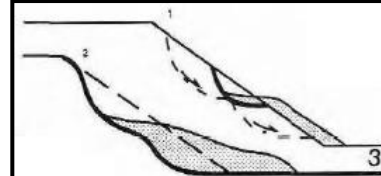
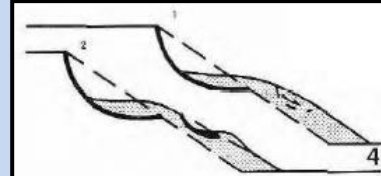

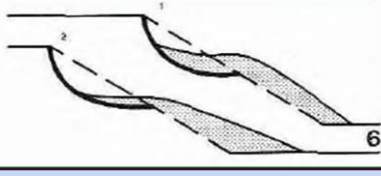
- **Activo:** Movimiento en masa que actualmente se está moviendo, bien sea de manera continua o intermitente.
- **Reactivo:** Movimiento en masa que presenta alguna actividad después de haber permanecido estable o sin movimiento por algún período de tiempo.
- **Suspendido:** Movimiento en masa que se desplazó durante el último ciclo anual de las estaciones climáticas, pero que en el momento no presenta movimiento (Varnes, 1978).
- **Inactivo:** Estado de actividad de un movimiento en masa en el cual la masa de suelo o roca actualmente no presenta movimiento, o que no presenta evidencias

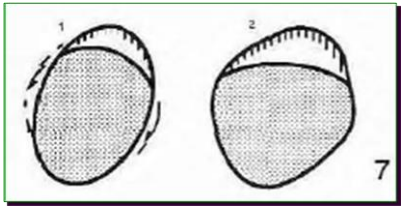
de movimientos en el último ciclo estacional (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007).

- **Dormido**: Movimiento en masa actualmente inactivo, pero en donde las causas o factores contribuyentes aún permanecen (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007).
- **Abandonado**: Estado de actividad de un movimiento en masa en el cual la causa de la inestabilidad del movimiento ha dejado de actuar (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007).
- **Estabilizado**: Movimiento en masa cuyo desplazamiento han cesado debido a la ejecución de obras correctivas o de control (Cruden & Varnes, 1996).
- **Relictual**: Movimiento en masa que claramente ocurrió bajo condiciones geomórficas o climáticas diferentes a las actuales, posiblemente hace millones de años (Cruden & Varnes, 1996).

5.2.2.2. Distribución de la actividad. Descripción de la manera como la actividad de un movimiento se distribuye en la masa que se desplaza y su efecto en las zonas adyacentes. De esta manera, el movimiento puede estar limitado únicamente al material que se desplaza, o la superficie de falla que puede estar extendiéndose añadiendo material al volumen del material desplazado (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007). Según el PMA: GCA, 2007 se distinguen siete tipos de distribución de la actividad, tal y como se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Distribución de la actividad de los movimientos en masa.

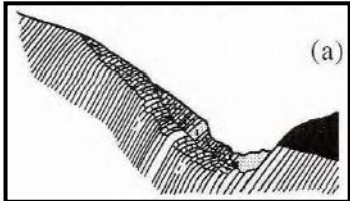
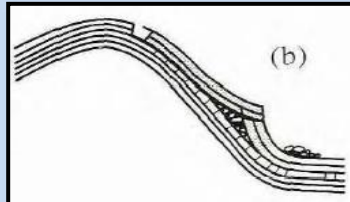
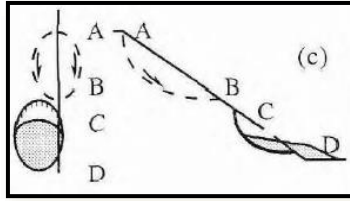
DISTRIBUCIÓN	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
Avanzando	Superficie de ruptura se extiende en la dirección del MM.	
Retrogresivo	Superficie de ruptura se extiende en la dirección opuesta del MM.	
Creciente	La superficie del MM se extiende en una o más direcciones.	
Decreciente	El volumen del material desplazado disminuye con el tiempo.	
Confinado	Existe escarpe pero no una visible superficie de ruptura.	
Móvil	El material desplazado continúa su movimiento sin cambio en la superficie de ruptura y en el volumen desplazado.	

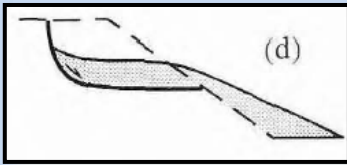
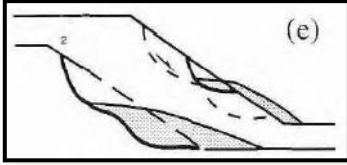
<p>Ensanchando</p>	<p>Superficie de ruptura se extiende hacia uno o ambos flancos del MM.</p>	
--------------------	--	---

Fuente: Tomado y modificado de Cruden & Varnes, 1996; (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007).

5.2.2.3. Estilo de la actividad. Descripción de cómo diferentes movimientos dentro de la masa desplazada contribuyen al movimiento total de esta (WP/WPI, 1993 en PMA: GCA, 2007). Según el PMA: GCA, 2007 se distinguen cinco tipos de estilos de la actividad, tal y como se observa en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Estilos de la actividad de los movimientos en masa.

DISTRIBUCIÓN	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
Complejo	Presenta por lo menos dos tipos de movimiento a manera de secuencia.	
Compuesto	Presenta por lo menos dos tipos de movimiento en diferentes partes de la masa desplazada de manera simultánea.	
Sucesivo	Son del mismo tipo que el anterior, pero no involucran el mismo material desplazado o la superficie de ruptura.	

Único	Involucran un solo desplazamiento o movimiento de material.	
Múltiple	Presentan un desarrollo repetitivo del mismo tipo de movimiento.	

Fuente: Tomado y modificado de Cruden & Varnes, 1996.

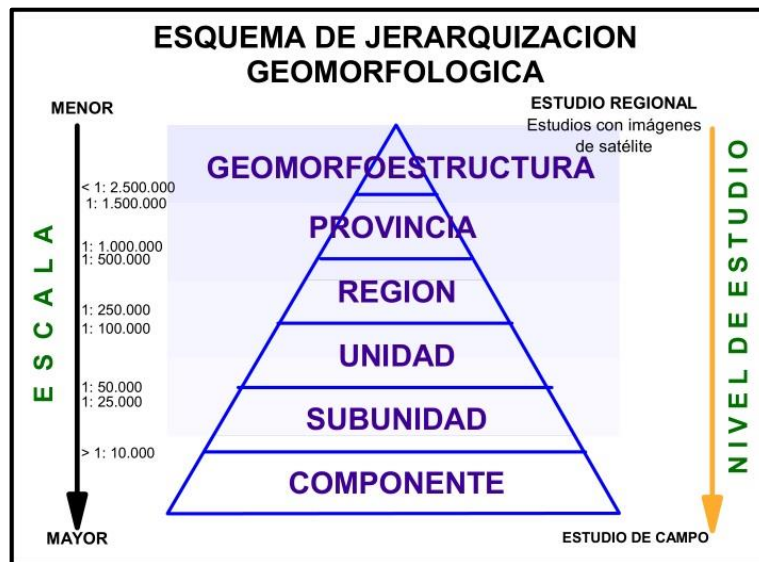
5.3. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es la ciencia que estudia la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y recientes del terreno (tanto terrestres como submarinas) y su relación con las estructuras infrayacentes. Esta ciencia está enfocada al análisis de la superficie de la tierra, en donde interactúa la litosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera, según Carvajal (2008) en Rincón, 2014. Teniendo en cuenta esto, la geomorfología está encargada de estudiar tres aspectos principales de las diferentes expresiones del terreno: forma, procesos e historia (Huggert, R., 2007 en Rincón, 2014).

Las unidades que integran el paisaje o que conforman el terreno, son el objeto de estudio de la geomorfología y corresponden a las denominadas geoformas (Rincón, 2014). Las geoformas, en relación a la superficie del terreno, poseen un componente interno (hipogeo) que refleja el material constituyente de la geoforma (contenido), expresado en sus características genéticas y estratigráficas (cronología); y un componente externo (epigeo) en relación a su figura, su forma, la cual expresa una combinación de características morfográficas y morfométricas (Zinck, 2012 en Rincón, 2014).

Para la elaboración de mapas geomorfológicos se deben describir las geoformas de acuerdo a la escala requerida por el estudio, dado que la escala determinará las dimensiones de las geoformas, y sus características principales. Según Carvajal (2008) los análisis geomorfológicos se deben abordar a partir del sistema de jerarquización que se muestra en la **Figura 4**, proponiendo que para estudios a escala 1:25.000, la caracterización geomorfológica está dada por unidades y subunidades geomorfológicas.

Figura 4. Esquema de jerarquización geomorfológica.



Fuente: Carvajal et al. (2012) para el SGC.

Carvajal et al. (2012) define para el SGC que la unidad geomorfológica es una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico constructivo o destructivo de un ambiente geomorfológico particular, correspondiendo a elementos básicos que componen un paisaje o modelo geomorfológico, los cuales están definidos por criterios genéticos, morfológicos y geométricos; a su vez describe que la subunidad geomorfológica está definida por contrastes morfológicos y morfométricos que relacionan el tipo de

material o la disposición estructural de los mismos, así como por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación.

La valoración del relieve a través de atributos cuantificables permite caracterizar un ambiente geomorfológico, agruparlo en sus similitudes y posteriormente calificarlo en cuanto a la susceptibilidad o predisposición a generar movimientos en masa. Es así como el SGC (2013) en el “Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en masa Escala 1:100.000” integra el estudio de los análisis morfométricos, morfodinámicos y morfogenéticos como una propuesta para el estudio de la susceptibilidad a los movimientos en masa.

5.3.1. Morfometría. Características cuantitativas de las formas del relieve a partir de diversos índices numéricos. (UNAM, 1989 en Rincón, 2014). En otras palabras, según Zinck (2012) en Rincón, 2014, este atributo comprende la caracterización y el análisis digital de las superficies topográficas abarcando los rasgos dimensionales de las geofomas, los cuales se derivan de una representación numérica de la topografía.

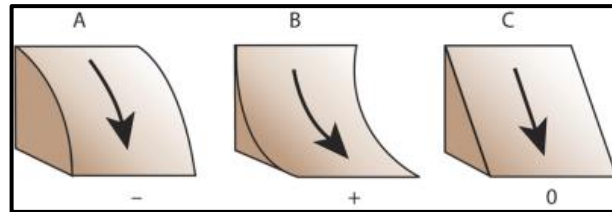
En los estudios de zonificación de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa, se suelen considerar como factores causantes los parámetros de acuenca, curvatura, rugosidad y pendientes.

5.3.1.1. Acuenca. Según Santacana (2001) en el documento metodológico del SGC (2013) mencionado anteriormente, el flujo de las aguas a través de la superficie es siempre en la dirección de máxima pendiente, una vez que la dirección de flujo es conocida, es posible determinar cuáles y cuantos flujos convergen hacia un punto en específico, la sumatoria de estos flujos se denomina (flujo acumulado). La variable acuenca representa el número de acumulaciones de flujo por unidad de área y se expresa en metros cuadrados (m^2).

Valores máximos de acuenca (drenajes) no serán propensas a la ocurrencia de movimientos en masa, ya que el agua sigue fluyendo, aportando poco a la infiltración en el terreno; valores mínimos de acuenca (divisorias o parte aguas) tampoco serán propensas a la ocurrencia de dichos eventos, debido a que no van a estar presentes los esfuerzos producto del espesor saturado. Por lo tanto los valores medios de acuenca serán más propensos a la ocurrencia de movimientos en masa, debido a que favorecen la infiltración.

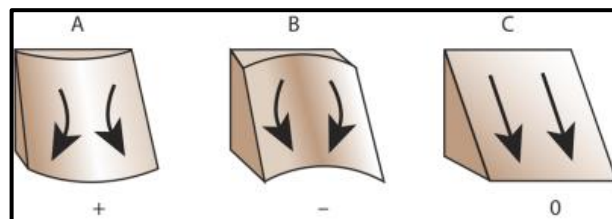
5.3.1.2. Curvatura. La curvatura según Buckley (2010), se entiende como la segunda derivada de una superficie, donde el perfil de curvatura como se muestra en la **Figura 5**, es paralelo a la pendiente e indica la dirección de la máxima pendiente, por lo que un valor negativo en un punto determinado indica que la superficie es convexa hacia arriba de ese punto, mientras que un valor positivo en un punto determinado indica que la superficie es cóncava hacia arriba en ese punto, así un valor de cero indica que la superficie es lineal. La **Figura 6** muestra que la forma en planta de la curvatura es perpendicular a la pendiente y afecta a la convergencia y divergencia de flujo a través de la superficie; un valor positivo en un punto determinado indica que la superficie es convexa lateralmente en ese punto, un valor negativo en un punto determinado indica que la superficie es cóncava lateralmente en ese punto y un valor de cero indica que la superficie es lineal.

Figura 5. Perfil de curvatura.



Fuente: Tomado de Buckley (2010).

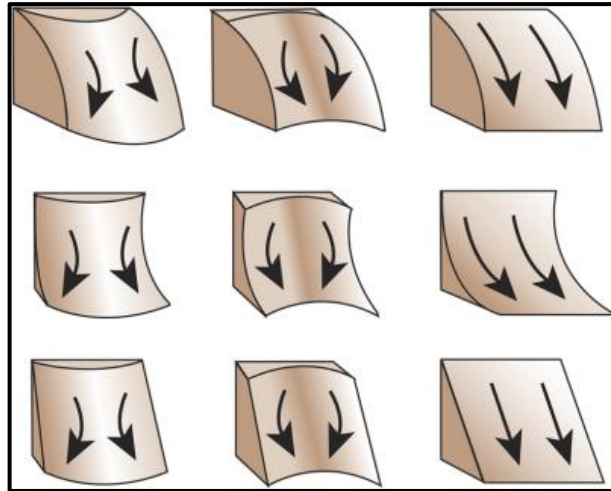
Figura 6. Forma en planta de la curvatura.



Fuente: Tomado de Buckley (2010).

La curvatura (**Figura 7**) afecta la aceleración, infiltración y erosión del flujo sobre la superficie. De tal forma, las curvaturas cóncavas aumentan la aceleración del flujo, produciendo una erosión alta en la superficie, lo que a su vez facilita la ocurrencia de movimientos en masa; mientras que las curvaturas convexas disminuyen la aceleración del flujo, produciendo una infiltración alta de este en la superficie, lo que permite, en menor medida la ocurrencia de movimientos en masa; por otro lado la curvatura lineal, recta o plana, no se encuentra muy relacionada a estos procesos de movimientos en masa.

Figura 7. Curvatura.



Fuente: Tomado de Buckley (2010).

5.3.1.3. Rugosidad. Según el documento metodológico del SGC (2013) la rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. Las rugosidades altas son más propensas a presentar movimientos en masa debido a que cambios sucesivos de pendientes favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno, que a su vez, aumenta la inestabilidad del mismo.

5.3.1.4. Pendientes. La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentajes (SGC, 2013). 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. Las pendientes moderadas a altas son más propensas a presentar movimientos en masa debido al desequilibrio en los esfuerzos estabilizadores y desestabilizadores del talud.

5.3.2. Morfodinámica. La morfodinámica según Carvajal et al. (2012), es la parte de la geomorfología que trata de los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas (SGC, 2012). Todos los elementos móviles determinados por las fuerzas de cambio, capaces de obtener, transportar y depositar los productos provenientes de la meteorización y de la sedimentación, se conocen como agentes morfodinámicos, siendo los más importantes: la escorrentía del agua lluvia, las olas, corrientes costeras y de mareas; los glaciares y el viento. A estos factores de cambio se pueden agregar los animales y el hombre. Estos agentes son los responsables directos de la mayoría de los procesos geomorfológicos exógenos que afectan la superficie terrestre, ya sea degradándola o bien construyendo nuevos paisajes.

5.3.3. Morfogénesis. Carvajal et al. (2012) definen la morfogénesis como el origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo) que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, durante intervalos de tiempos geológicos modelando así el terreno.

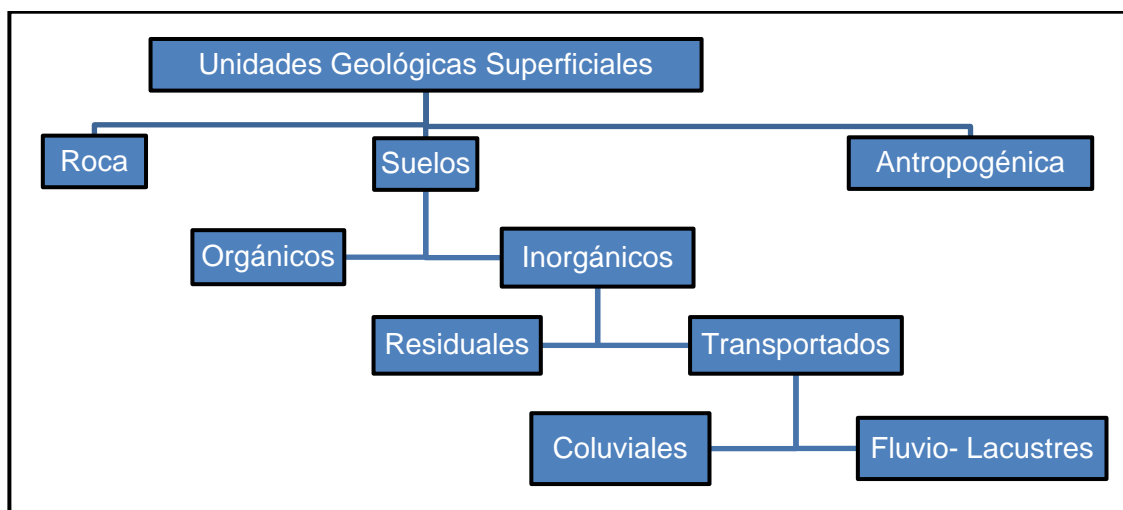
Los ambientes morfogenéticos agrupan las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se formaron las geoformas. Se determina con base en la expresión e interpretación de los procesos geomorfológicos registrados en el terreno, que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las geoformas a través de los diferentes agentes morfogenéticos. Los ambientes morfogenéticos se clasifican en: Estructural (S), Volcánico (V), Denudacional (D), Fluvial (F), Marino (M), Glacial (G), Eólico (E), Kárstico (K) y Antropogénico (A); los cuales son descritos en Carvajal et al. (2012).

5.4. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

Según Hermelin (1987) en INGEOMINAS (2005), denomina formación superficial al conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros. Estas formaciones superficiales incluyen rocas con diferentes grados de meteorización, así como suelos y depósitos no consolidados. Las Unidades Geológicas Superficiales (también llamadas UGS) se consideran como formaciones correlativas de los procesos morfodinámicas, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre, además de ser unidades cartografiables y uno de los productos básicos de la geología aplicada a la ingeniería.

En la **Figura 8** se observa nuestra propuesta de clasificación para las Unidades Geológicas Superficiales, establecida a partir de diferentes estudios previos, donde el grado de meteorización es el atributo principal a partir del cual se caracterizan dichas UGS en Roca (incluyendo la roca sana y rocas con grados de meteorización baja e intermedia), en Suelos (rocas con alto grado de meteorización), asociadas ambas categorías a una litología específica o formación geológica, y en Suelos Antropogénicos generados por la acción directa del hombre.

Figura 8. Propuesta de clasificación de UGS.



Los Suelos se subdividen según su contenido de materia orgánica, involucrando Suelos Inorgánicos y Suelos Orgánicos; los Suelos Inorgánicos se clasifican según su génesis en Suelos Residuales, los cuales tienen su origen a partir de la meteorización y descomposición de la roca quedando localizados en el mismo sitio donde se encuentra su roca fuente (“in situ”), y en Suelos Transportados cuyo origen incluye procesos de erosión, transporte y depositación de partículas disgregadas, generándose en un sitio distal al de su roca fuente. Los Suelos Transportados se subdividen según el medio principal de transporte, donde la acción de la gravedad genera Suelos Coluviales y la dinámica fluvial Suelos Fluvio-lacustres.

5.5. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Como se había mencionado anteriormente, la aplicación de las Redes Neuronales Artificiales (RNA o ANN por sus siglas en inglés) constituye uno de los métodos utilizados actualmente para calcular la ZSMM. Este método ha tomado auge gracias a su capacidad de predicción a partir de un número limitado de datos, independencia de la distribución estadística de los mismos y diferencia entre las unidades de medida de las variables (Tien et al., 2012 en Machuca, 2016).

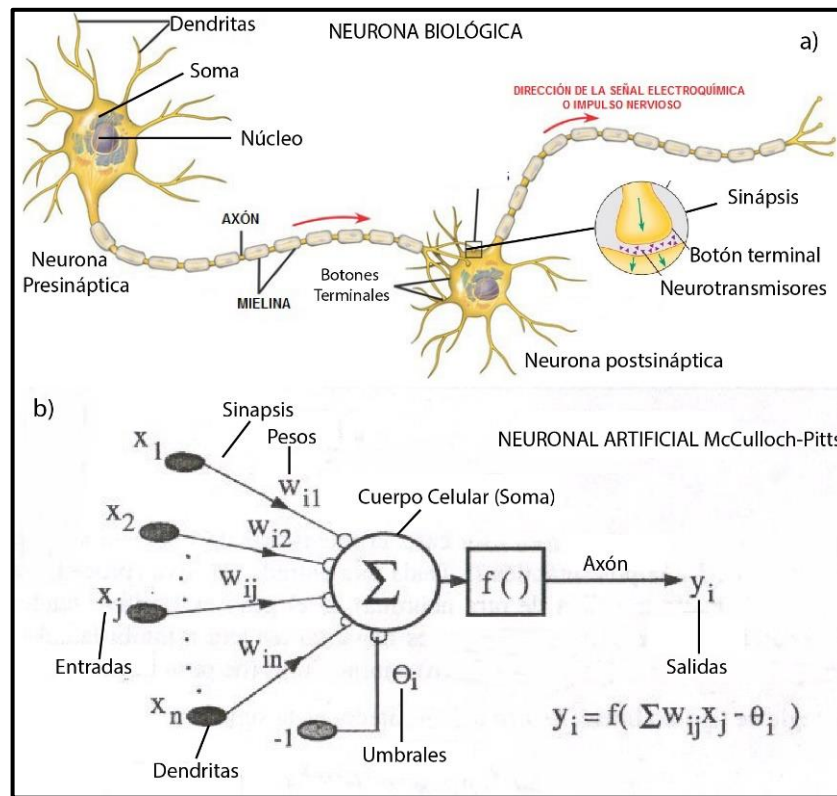
5.5.1. Generalidades de las redes neuronales artificiales. Una red neuronal es un sistema de procesamiento de información que permite la solución de problemas complejos de clasificación, estimación funcional y optimización; a través de la estimación de una relación lineal o no lineal entre los datos de salida y entrada. Las RNA están inspiradas en el proceso de aprendizaje del cerebro humano, imitando a las redes neuronales biológicas en tres características principales: 1) Funcionan en paralelo en tiempo real (paralelismo de cálculo), 2) Ofrecen tolerancia a fallos por la codificación redundante de la información (memoria distribuida) y 3) Poseen capacidad de aprendizaje adaptativo (adaptabilidad al entorno o capacidad de generalización).

5.5.1.1. Analogía entre una neurona biológica y una neurona artificial. Una neurona biológica (**Figura 9a**) es una célula viva que a grandes rasgos consta de un cuerpo celular más o menos esférico de 5 a 10 micras de diámetro, del que sale una rama principal el axón, y varias ramas más cortas denominadas dendritas. A su vez el axón puede producir ramas en torno a su punto de arranque, y con frecuencia se ramifica extensamente cerca de su extremo. La comunicación entre una neurona y otra se realiza a través de la sinapsis, y no por contacto directo.

La sinapsis es un espacio localizado entre los terminales del axón de la neurona presináptica y las dendritas de las neuronas postsinápticas, el cual se encuentra ocupado por unas sustancias químicas denominadas neurotransmisores. Dichos neurotransmisores son los que se encargan de bloquear o dejar pasar las señales eléctricas o químicas que provienen de las neuronas, estas señales pueden ser modificadas por los pesos de la sinapsis. Una vez transmitida la señal, el cuerpo celular (soma) las combina e integra; cuando recibe suficientes entradas la célula se enciende y transmite una señal de salida a través de su axón. Por lo general una neurona recibe información de miles de otras neuronas y, a su vez, envía información a miles de neuronas más; siendo el procesamiento de información de los sistemas neurológicos biológicos paralelos (Caicedo & López, 2009).

Las redes neuronales artificiales también están constituidas por elementos fundamentales llamadas neuronas (**Figura 9b**), las cuales pueden ser principalmente binarias $\{0,1\}$ o $\{-1,1\}$, o reales $[0, 1]$ o $[-1, 1]$; cada neurona tiene un estado interno llamado activación (umbral), el cual es una función de activación de las entradas que ha recibido. Las neuronas envían su estado de activación como una señal a otras neuronas a través de conexiones y cada conexión, tiene asociado un peso. Los pesos son la información que la red usa (ajustándolos) para resolver un problema. Las funciones de activación más utilizadas en RNA se representan en la **Tabla 4**. Según Ayala & García (2011), generalmente una neurona envía su activación como una señal a otras neuronas.

Figura 9. Analogía entre una neurona biológica y una neurona artificial.



Fuente: a) Neurona biológica (Tomado y modificado de Pearson). b) Neurona artificial (Tomado y modificado por autores de De Brío & Sanz, 2007).

Tabla 4. Funciones de activación comúnmente usadas en las redes neuronales.

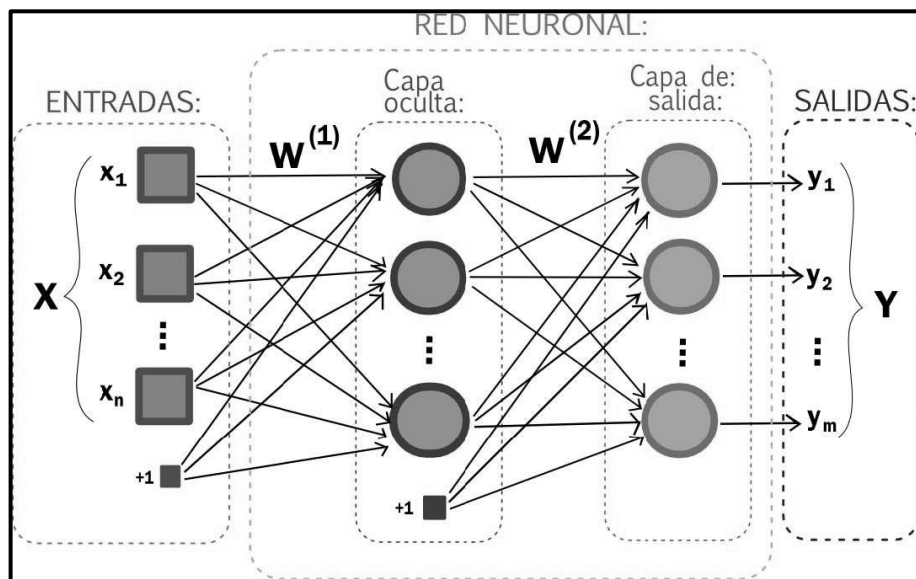
TIPO DE FUNCIÓN	FUNCIÓN	RANGO	GRÁFICA
Identidad	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$	<p>$a = \text{purelin}(n)$</p>

Escalón	$y = \text{sign}(x)$	$\{-1, +1\}$	
Escalón	$y = H(x)$	$\{-0, +1\}$	
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq +1 \\ +1, & \text{si } x > +1 \end{cases}$	$[-1, +1]$	
Sigmoidal	$y = \frac{1}{1+e^{-x}}$	$[0, +1]$	
Tangencial	$y = A$	$[-1, +1]$	

Fuente: Tomado y modificado de De Brío y Sanz (2007) & Matlab R2015a.

5.5.1.2. Arquitectura y clasificación de las redes neuronales artificiales. La arquitectura de una red neuronal artificial se puede observar en la **Figura 10**. Dicha arquitectura describe la forma como se organizan las neuronas en su interior y está estrechamente ligada al algoritmo de aprendizaje usado para entrenar la red. La arquitectura inicia con el ingreso de los datos de entrada, ya sea a partir de los archivos de entrada o directamente desde sensores electrónicos en tiempo real y finaliza con la respuesta de la red neuronal enviando información directamente al mundo exterior (Anderson & McNeill, 1992). Entre estas dos informaciones pueden existir dos tipos de capas: las capas ocultas y las capas de salida. Una capa se define como el conjunto de neuronas artificiales que reciben simultáneamente el mismo tipo de información (Caicedo & López, 2009). A su vez, dentro de la arquitectura de una red pueden existir una o múltiples capas ocultas.

Figura 10. Estructura general de una red neuronal con “n” entradas, “m” salidas y una sola capa oculta.



Fuente: Tomado y modificado por autores de Vilchez (2010).

Una capa oculta es aquella que no tiene conexión directa con el entorno, y que proporciona a la red grados de libertad adicionales gracias a los cuales puede encontrar representaciones internas correspondientes a determinados rasgos del entorno. Las conexiones entre las neuronas pueden ser excitatorias (peso sináptico positivo) o inhibitorias (peso sináptico negativo); por otra parte, se pueden distinguir conexiones intra-capas “laterales” que tienen lugar entre neuronas de la misma capa, conexiones inter-capas que se producen entre las neuronas de diferentes capas y conexiones realimentadas, las cuales tienen un sentido contrario a la dirección de entrada o salida (De Brío & Sanz, 2007).

Las redes neuronales artificiales pueden clasificarse en diferentes modelos RNA atendiendo a distintos conceptos. Dependiendo del número de capas, las redes pueden separarse en redes monocapa (las neuronas sólo cuentan con la capa de salida) y redes multicapa (las neuronas cuentan con la capa de salida, y una o más capas ocultas). Dependiendo de la forma en como fluye la información, pueden existir redes unidireccionales “feedforward” (la información circula desde la capa de entrada hasta la capa de salida de la red en un único sentido) y redes recurrentes “feedback” (la información circula entre las capas de la red en cualquier sentido). Por último, también se clasifican en redes heteroasociativas (la red se entrena para que ante la presentación de un patrón A responda con otro patrón B) y redes asociativas (la red se entrena para que ante la presentación del patrón $A' = A + \text{ruido}$, su respuesta sea el patrón original A) (De Brío & Sanz, 2007).

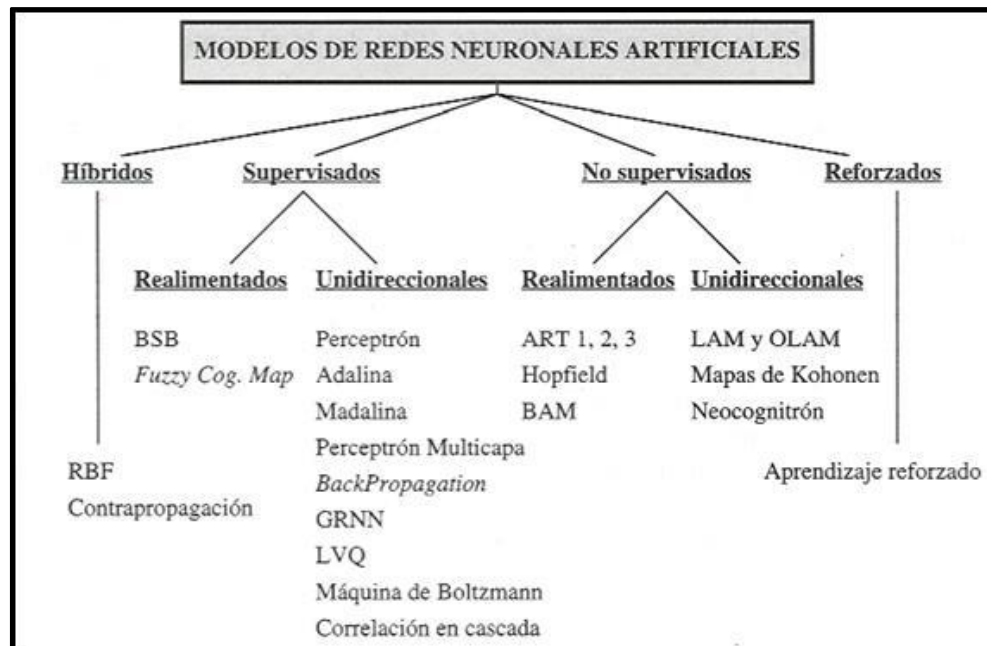
El aprendizaje es la habilidad de la red neuronal artificial para aprender del entorno y mejorar su desempeño, a través de un proceso iterativo que tiene como objetivo calcular la salida correcta a partir de un conjunto de patrones de aprendizaje o ejemplos. Según Mendel McClare (1970) el aprendizaje en las redes neuronales artificiales, se pueden definir como: “Un proceso mediante el cual los parámetros libres de una red neuronal artificial son adaptados a través de un proceso de estimulación del ambiente en el cual está embebida la red”. Caicedo & López (2009)

distinguen en el aprendizaje claramente dos fases de operación, la fase de entrenamiento, donde se entrena la red y la fase de operación donde la red es utilizada para llevar a cabo la tarea para la cual fue entrenada.

Cuando se construye un sistema neuronal, se parte de un cierto modelo de neurona y de una determinada arquitectura de red, estableciéndose los pesos sinápticos como nulos o aleatorios. Existen dos enfoques de aprendizaje, el modelado de la sinapsis que consiste en modificar los pesos sinápticos, y el modelo de creación o destrucción de neuronas, en el cual se modifica la propia arquitectura de la red (De Brío & Sanz, 2007). Krenker *et al.* (2011) manifiestan que existen comúnmente tres grandes paradigmas de aprendizaje: 1) El aprendizaje supervisado, 2) No supervisado y 3) Aprendizaje reforzado. En el entrenamiento supervisado, se proporcionan tanto las entradas como las salidas deseadas. La red procesa las entradas y compara las salidas resultantes con las salidas deseadas, la diferencia entre estas llamadas “errores” se propagan hacia la red, y esta a su vez ajusta sus pesos en un proceso iterativo hasta que su salida tiende a ser la deseada. En el entrenamiento no supervisado, la red está provista de entradas, pero no con las salidas deseadas, la red por si sola debe decidir qué características va a utilizar para agrupar los datos de entrada. Anderson & McNeill (1992) se refieren a este aprendizaje como auto-organizado. La **Figura 11** muestra que dependiendo del modelo de neurona concreto que se utilice, de la arquitectura o topología de conexión y del algoritmo de aprendizaje, surgirán distintos modelos de redes neuronales.

A continuación, se hará énfasis en los modelos MLP, especialmente en el modelo supervisado unidireccional Back-Propagation.

Figura 11. Clasificación de las RNA de acuerdo a su tipo de aprendizaje y arquitectura.



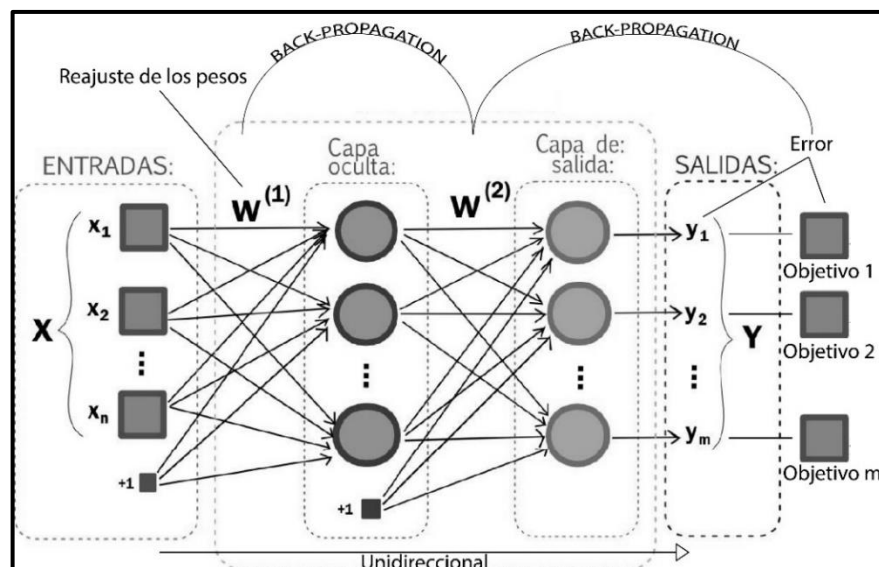
Fuente: Tomado de De Brío & Sanz (2010).

5.5.2. Algoritmo Back-Propagation (BP)

5.5.2.1. Generalidades del algoritmo Back-Propagation. El algoritmo de entrenamiento más utilizado para entrenar un perceptrón multicapa es el de back-propagation o BP (Ver **Figura 12**); este método busca el mínimo de la función de error usando diferentes algoritmos. Cada algoritmo define una función $E(W)$ que proporciona el error que comete la red en función del conjunto de pesos sinápticos W . El objetivo del aprendizaje será encontrar la configuración de pesos que corresponda al mínimo global de la función de error, aunque según Cauwenberghs (1993) en Bertona, 2005, en muchos casos, encontrar el mínimo local es lo suficientemente bueno.

El algoritmo back-propagation consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entradas-salidas dados como ejemplo. Se debe comenzar asignando aleatoriamente valores pequeños a los pesos iniciales de la red y umbrales iniciales nulos, luego se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de neuronas de la red, la señal se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida, se compara el resultado en las neuronas de salida con la salida deseada y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. A continuación, estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa intermedia (ocultas). Cada neurona recibe un error que es proporcional a su contribución sobre el error total de la red. Basándose en el valor del error recibido, se ajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que la siguiente vez que se presente un patrón similar, la salida sea lo más cercano a la deseada. Posteriormente se presentan al azar los demás pares de entradas-salidas y el algoritmo se repite, reajustando nuevamente los pesos (Valencia *et al.*, 2006).

Figura 12. Modelo de una red neuronal artificial utilizando el algoritmo de aprendizaje Back-Propagation.



Fuente: Tomado y modificado de Vélchez (2010).

5.5.2.2. Parámetros de entrenamiento. Los resultados de una red neuronal a otra van a ser siempre diferentes, esto se debe a las diferentes configuraciones en la red según los parámetros escogidos, como por ejemplo, el tipo de arquitectura de la RNA, el número de patrones de entrenamiento, el valor de los pesos y umbrales iniciales, el algoritmo de entrenamiento, etc. Por esto, una selección de los parámetros adecuados de entrenamiento de la red, arrojaran los resultados deseados en la investigación. La función de entrenamiento o algoritmo de entrenamiento es uno de estos parámetros, escoger el algoritmo adecuado depende de la complejidad del problema, objetivo general o enfoque (análisis discriminante “reconocimiento de patrones” o aproximación funcional), número de parámetros de entrada, número de pesos y umbrales, y errores mínimos de la red. La **Tabla 5** muestra un listado de los algoritmos de entrenamiento utilizados en Back-Propagation.

Tabla 5. Algoritmos de entrenamiento Back-Propagation.

FUNCIÓN (MATLAB)	ACRÓNIMO	ALGORITMO
Trainlm	LM	Levenberg-Marquardt
Trainbr	BF	Bayesian Regularization
Trainbfg	BFG	BFGS Quassi-Newton
Trainrp	RP	Resilient Backpropagation
Trainscg	SCG	Scaled Conjugate Gradient
Traincgb	CGB	Conjugate Gradient with Powell/Beale Restars
Traincgf	CGF	Fletcher-Powell Conjugate Gradient
Traincgp	CGP	Polak-Ribière Conjugate Gradient
Trainoss	OSS	One Step Secant
Traingdx	GDX	Variable Learning Rate Gradient Descent
Traingdm	GDM	Gradient Descent with Momentum
Traingd	GD	Gradient Descent

Fuente: Tomado y modificado de Hudson *et al.*, 2015.

En general, estos algoritmos se diferencian entre sí por su tiempo de convergencia (ya que los algoritmos que utilizan segundas derivadas convergen más rápido), la exactitud de sus resultados de acuerdo a su enfoque (reconocimiento de patrones y aproximación funcional), memoria del computador para correr el algoritmo, tipos de arquitecturas a los cuales ofrece buenos resultados y espacio de almacenamiento. En la mayoría de resultados (incluyendo el de ZSMM) los algoritmos LM, RP y SCG son algoritmos rápidos, que arrojan resultados muy buenos en las dos aplicaciones o enfoques. LM es el mejor algoritmo para redes de aproximación funcional pero da malos resultados en reconocimiento de patrones, RP es el mejor algoritmo en redes de reconocimiento de patrones pero arroja resultados malos en aproximación funcional, mientras que SCG ofrece a menudo buenos resultados en la mayoría de problemas según Hudson *et al.*, 2015. Existe una cantidad de parámetros que se deben tener en cuenta para entrenar la red, la **Tabla 6** muestra los parámetros principales a la hora de frenar el entrenamiento de una RNA.

Tabla 6. Parámetros principales a la hora de frenar el entrenamiento de una RNA.

Parámetro (Función en Matlab)	Criterio de parada
min_grad	Magnitud de gradiente mínima
max_fail	Número máximo de fallos en la validación
time	Tiempo máximo de entrenamiento
goal	Valor de exactitud mínima
epochs	Número máximo de iteraciones

Fuente. Tomado y modificado de Hudson *et al.*, (2015)

La forma en que sea actualizan los pesos sinápticos da lugar a dos modos de entrenamiento. En el primero la actualización de los pesos sinápticos se produce una única vez, tras la presentación de todos los patrones de entrenamiento, este esquema es conocido como aprendizaje por lotes (batch). En el segundo la actualización de los pesos sinápticos se produce tras la presentación de cada patrón

entrada-salida de entrenamiento, este esquema es conocido como aprendizaje en serie (on line). Según De Brío & Sanz (2007), el aprendizaje en serie estima mejor el gradiente, permite emplear ritmos de entrenamiento mayores y suele ser más rápido (hasta varios ordenes de magnitud).

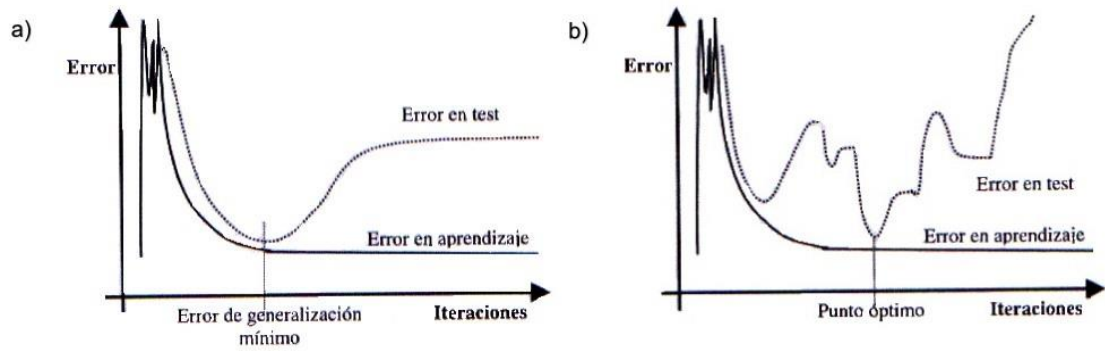
5.5.2.3. Ventajas y desventajas del algoritmo Back-Propagation (BP). El algoritmo BP constituye un método de gran generalidad, lo que presenta ventajas e inconvenientes. Su ventaja principal es que se puede aplicar a multitud de problemas diferentes, proporcionando con frecuencia buenas soluciones con no demasiado tiempo de desarrollo. No obstante, si se requiere una solución realmente excelente, habrá que dedicar más tiempo al desarrollo del sistema neuronal (partir de una arquitectura optima, selección de los pesos iniciales, estilo de aprendizaje, procesamiento de los datos de entrada, conjunto de patrones de aprendizaje empleados, utilización de técnicas que eviten el sobreajuste, etc).

Los principales inconvenientes del BP radican en su lentitud de convergencia, el sobre-aprendizaje, la saturación (no se producen de manera significativa modificaciones de los pesos y por ende del error, dado que se entrena la red sólo con neuronas de salida de 0 o 1), la selección a prueba y error de los parámetros de entrenamiento y tipos de arquitectura (ya que no existen reglas definidas), y que no garantizan alcanzar un mínimo global de la función error, tan sólo un mínimo local, por lo que el proceso de aprendizaje puede estancarse en uno de estos mínimos locales (De Brío & Sanz, 2007). Por otra parte, las Redes Neuronales Artificiales se encuentran entre los métodos conocidos como “caja negra” ya que no es posible conocer exactamente como dichas RNA aprenden, el peso exacto de sus entradas o la aproximación funcional que permite extrapolar la información suministrada a casos nuevos, lo que genera cierta incertidumbre a la hora de aplicar estos métodos (Gómez & Kavzoglu, 2005). Para resolver el problema de lentitud de convergencia se emplean diferentes técnicas o variantes del algoritmo BP, entre

ellos los más usados son el término de inercia, SuperSAB, los métodos de segundo orden, el algoritmo alfa-LMS regla II y III de Madaline; otras técnicas como presentar los ejemplos al azar, el uso de funciones asimétricas, utilizar funciones sigmoides bipolares por ejemplo en el rango $[-1,+1]$ en vez del rango $[0,+1]$, la normalización de las entradas y elegir los pesos iniciales adecuados. Cuando se evalúa una red neuronal no sólo es importante evaluar si la red ha sido capaz de aprender los patrones de entrenamiento (error de aprendizaje), sino que también es imprescindible evaluar el comportamiento de la red ante patrones nunca antes vistos (error de generalización). La generalización es la capacidad de la red neuronal para dar una respuesta correcta a partir de información que no le fue presentada durante la fase de entrenamiento. Para poder obtener una medida de ambos errores es necesario dividir el set de datos disponibles en dos, el set de datos de entrenamiento, y el set de datos de evaluación.

La **Figura 13a** representa el error de aprendizaje y el error de generalización durante el transcurso del aprendizaje (iteraciones); al principio la red se adapta progresivamente al conjunto de aprendizaje, sin embargo, el sistema puede ajustarse demasiado a las particularidades de los patrones empleados aprendiendo ruido presente en ellos, por lo que el error de generalización crece y la red cae en sobreaprendizaje. Con el fin de solucionar el problema de sobre-aprendizaje, la red debería entrenarse hasta un punto donde el error de generalización sea el mínimo (validación cruzada o cross validation), sin embargo, como se observa en la **Figura 13b**, en una situación real pueden presentarse varios mínimos, por lo que se utilizan distintas técnicas de parada temprana (early stopping).

Figura 13. Evolución del error de aprendizaje y del error de generalización en función de las iteraciones. a) Situación idealizada. b) Situación real.



Fuente: Tomado de Perchelt, 1998.

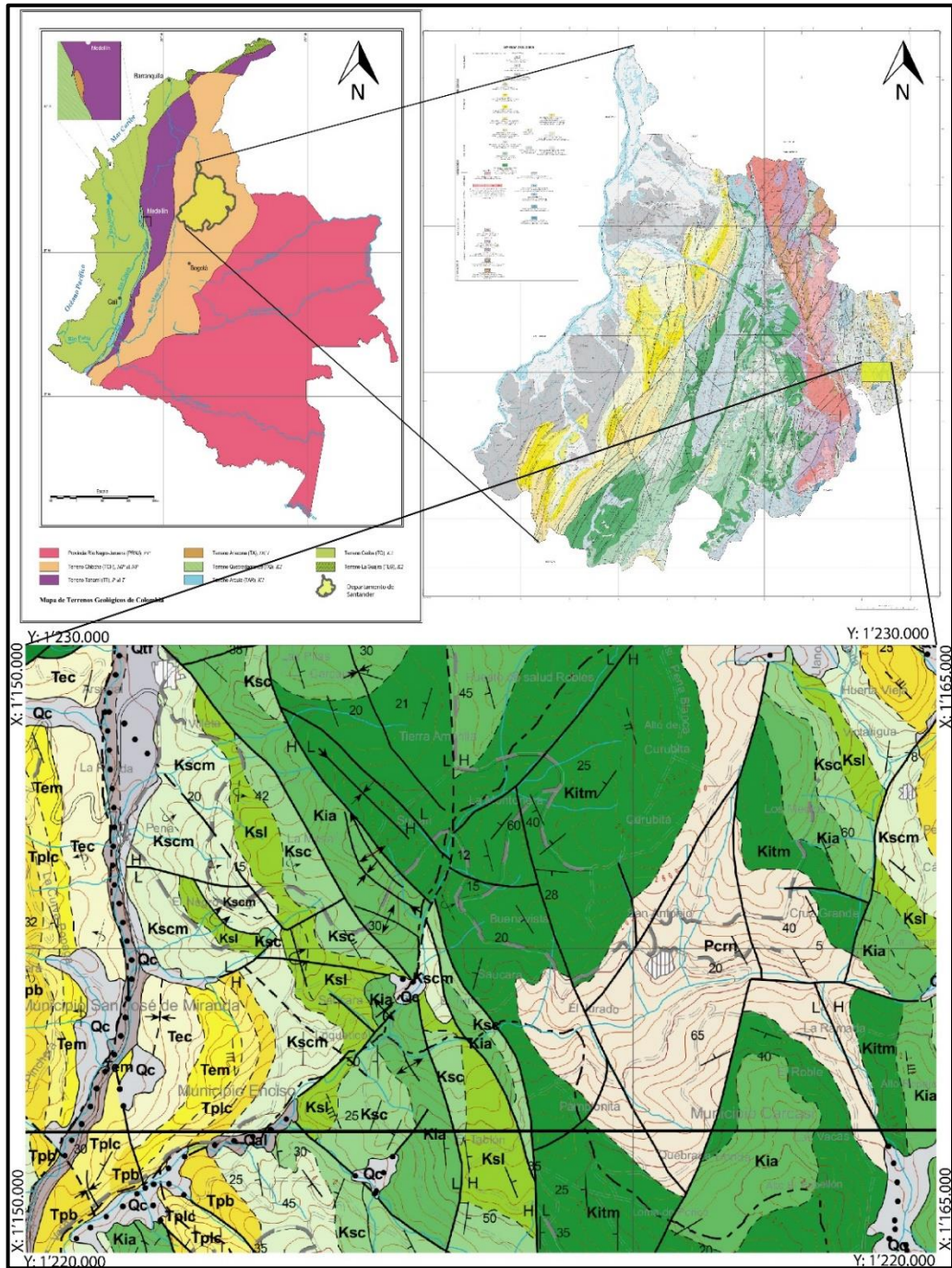
6. MARCO GEOLÓGICO

6.1. LOCALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Departamento de Santander se encuentra al Nororiente de los Andes Colombianos, lo que lo convierte en un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico, cuyo origen está relacionado a la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Caribe, Suramérica (Cediel, 2003). A nivel regional, Santander está ubicado geológicamente dentro del terreno Chibcha; su territorio está subdividido estructuralmente en tres provincias tectónicas: el Macizo de Santander, conformado a su vez por los bloques Floresta, Cucutilla, Pamplona y Ocaña; el Valle Medio del Magdalena y la Cordillera Oriental de Colombia, la cual está restringida por dos bloques, el principal localizado en la región central estructural y el menor ubicado en la región oriental (Royero & Clavijo, 2001).

A nivel local la plancha 136-II-C a escala 1:25.000 se encuentra dentro del bloque de la región oriental en la Provincia Tectónica de la Cordillera Oriental (Ver **Figura 14**). Dicha provincia comprende una amplia faja de rocas sedimentarias Cretácicas y Cenozoicas, la cual se caracteriza por presentar un fuerte control estructural en donde predomina un sistema de fallamiento en bloques, de rumbo Norte-Sur a Noreste, manifestado en pliegues anticlinales y sinclinales estrechos, los cuales están siendo limitados por fallas de cabalgamiento. Dichas estructuras se han generado en respuesta a la actividad tectónica debido a la influencia de los esfuerzos ejercidos principalmente por los sistemas de fallas regionales de Bucaramanga-Santa Marta, Chicamocha y Servitá (Royero & Clavijo, 2001).

Figura 14. Localización geológica del área de estudio correspondiente a la plancha 136-II-C.



Fuente: a) Mapa de terrenos geológicos de Colombia (Tomado y modificado de Gómez et al., 2015). b) Mapa Geológico de Santander (Tomado y modificado de Royero & Clavijo, 2001). c) Mapa Geológico de la zona de estudio a escala 1:25.000, plancha 136-II-C (Tomado y modificado de la plancha 136 Málaga, Vargas et al., 1984).

6.2. ESTRATIGRAFÍA

Las unidades litoestratigráficas que afloran en la plancha 136-II-C son únicamente rocas y depósitos de carácter sedimentario, con edades que van desde el Paleozoico Superior hasta el Cenozoico, tal y como se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15. Unidades litoestratigráficas de la plancha 136-II-C.

PERÍODO	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	AUTOR
Cuaternario	Aluviones y Coluviones	Depósitos no consolidados de aluvión, coluvión, derrubios, glaciares, fluvio-glaciares.	Royero & Clavijo, 2001.
PALEÓGENO	Fm. Carbonera	Alternancia de lodolitas grises, gris verdosas y pardas, ferruginosas, con areniscas de cuarzo, gris verdosas, con restos carbonosos, dispuestas en capas medianas y gruesas.	Notestein, et al. (1944)
	Fm. Mirador	Areniscas de cuarzo, blancas y gris claras, de grano fino a medio y ligeramente conglomeráticas, carbonosas, con algunos intraclastos lodolíticos.	Garner en De Porta, et al. (1974) & Notestein, et al. (1944).
	Fm. Los Cuervos	Lodolitas grises a gris oscuras, carbonosas e intercalaciones de areniscas grises a gris amarillentas, cuarzosas, localmente feldespáticas, con algunas capas explotables de carbón.	Notestein, et al. (1944)
	Fm. Barco	Areniscas de cuarzo gris, de grano fino a medio, con estratificación cruzada, localmente arcillosas, alternadas con lodolitas gris oscuro, ligeramente micáceas, carbonosas, con nódulos ferruginosos.	Notestein, et al. (1944)
CRETÁCICO	Fm. Colón - MitoJuan	Lodolitas grises, gris oscuro a negras, fosilíferas (foraminíferos), levemente calcáreas, piritosas, con nódulos ferruginosos y algunas capas de calizas grises, lumaquélicas.	Notestein, et al. (1944) & Liddle en Julivert, et al. (1968)
	Fm. La Luna	Calizas generalmente fosilíferas (amonites y foraminíferos) y lodolitas calcáreas con grandes concreciones y nódulos discoidales, biomicríticos, capas delgadas de chert y rocas fosfóricas.	Notestein, et al. (1944) & Richards (1968)
	Fm. Capacho	Lodolitas griseas a negras, laminadas, localmente calcáreas, con nódulos calcáreos, con escasas intercalaciones de areniscas de cuarzo, grises, de grano fino y calizas grises, arenosas, fosilíferas y limolitas.	Sievers (1888) en Julivert, et al., 1968, Sutton (1946), Rod & Manyc (1954).
	Fm. Aguardiente	Areniscas de cuarzo, grises a gris claras, de grano fino a grueso, glauconíticas, con estratificación cruzada e intercalaciones delgadas de lodolitas grises a negras, carbonosas y micáceas.	Sutton en Julivert, et al., 1968)
	Fm. Tibú - Mercedes	Alternancia de calizas biomicríticas de color gris oscuro, localmente arenosas y arcillosas, lodolitas y areniscas gris oscuras, fosilíferas, micáceas.	Notestein, et al. (1944)
	Fm. Rionegro	Areniscas grises, verdosas a moteadas, de grano fino a grueso, con algunas intercalaciones de conglomerados grises e intercalaciones delgadas de lodolitas grises a verdosas, levemente calcáreas.	Miller (1960), Richards (1968), Vargas, et al., (1976)
PÉRMICO CARBONÍFERO	Paleozoico del Río Nevado	Limolitas gris verdosas y rojizas, lodolitas rojo grisáceas, con nódulos calcáreos, lutitas gris amarillentas, alternancia de calizas y niveles delgados de conglomerados con fragmentos de caliza y areniscas.	Stibane & Forero (1969)

Fuente: Tomado y modificado de Royero & Clavijo (2001).

La secuencia sedimentaria está conformada de base a tope, por el basamento de la unidad Paleozoico del Rio Nevado (Pcrn), infrayaciendo discordantemente las Formaciones Rionegro (Kirn), Tibú-Mercedes (Kitm) y Aguardiente (Kia) del Cretácico Inferior, así como las Formaciones Capacho (Ksc), La Luna (Ksl) y Colón – MitoJuan (Kscm) del Cretácico Superior, dicha secuencia Cretácica la suprayace rocas del Paleoceno correspondientes a las Formaciones Barco (Tpb) y Los Cuervos (Tplc), ésta última infrayace discordantemente a la Formación Mirador (Tem) y Carbonera (Tec) de edad Eoceno. Por último se encuentran los depósitos Cuaternarios de tipo coluvial y aluvial (aluvión y terraza y cono de deyección).

6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Regionalmente la plancha 136-II-C, al formar parte de los Andes Septentrionales, exhibe un dominio compresivo, fuertemente influenciada por la interacción entre las placas Nazca, Caribe y Suramericana. Hace parte de la provincia tectónica de la Cordillera Oriental, caracterizada por pliegues anticlinales y sinclinales amplios, limitados por fallas inversas y de cabalgamiento de direcciones Noreste y Noroeste con inclinación predominante hacia el oriente (Royero & Clavijo, 2001).

La falla de Servitá constituye el principal rasgo estructural de la plancha 136-II-C. Según Ward, D., et. al., (1973) es una falla inversa con dirección predominante Norte-Sur y presenta inclinación hacia el Occidente. Se extiende por una longitud aproximada de 65 km, y se prolonga al sur en Boyacá y al norte en territorio de Norte de Santander.

Vargas *et al.*, 1981 caracterizan el área de estudio con un estilo tectónico limitado por zonas sinclinales, destacando el Valle del Servitá como un sinclinal Terciario de dirección Norte-Sur, asimétrico y fallado cerca al núcleo. El flanco Oeste del sinclinal está cortado transversalmente por la Falla de Servitá al Oeste del municipio de

Enciso y se caracteriza por estar invertido en casi toda su extensión, inversión debida a la falla mencionada. El flanco Este presenta buzamientos fuertes entre 40° y 60°, pero aparece cortando fallas transversales que lo delimitan por el Norte, poniendo en contacto el flanco Terciario con la secuencia Cretácica. Los sedimentos Cretácicos se encuentran cortados por una serie de fallas de dirección Norte-Sur y Noroeste-Sureste al igual que varios pliegues menores de dirección Noroeste oblicuos a la dirección general de las estructuras.

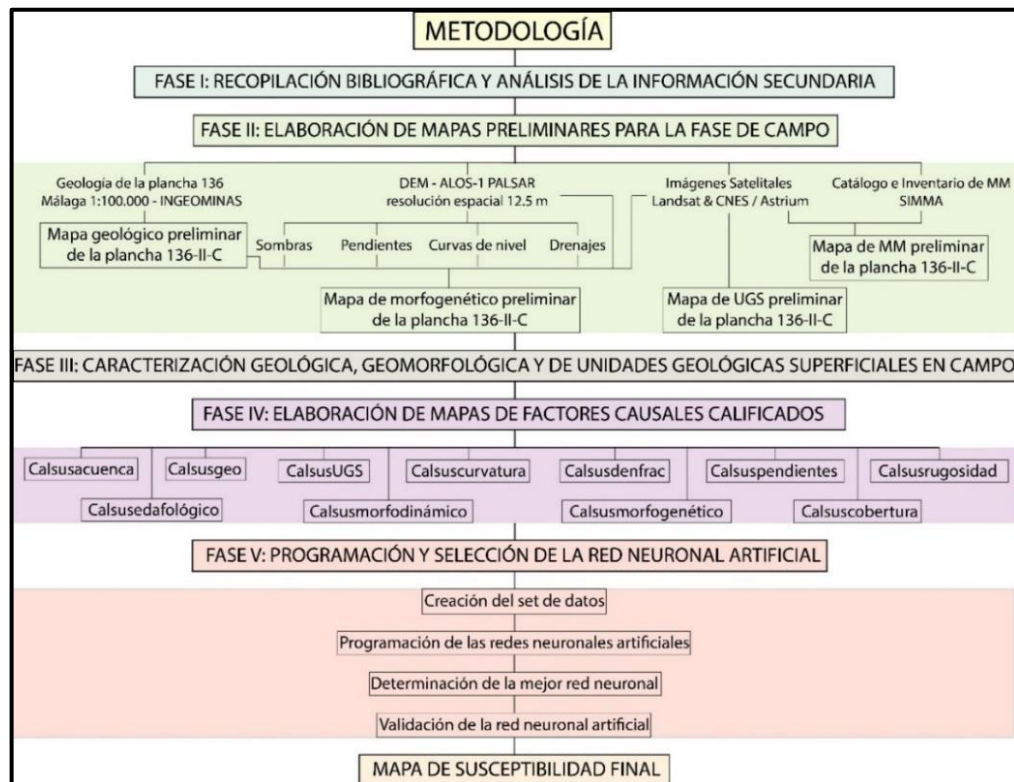
Por su parte, la falla del Río Tunebo de tipo normal con componente de rumbo dextral según Vargas, *et al.*, 1981 ejerce un fuerte control estructural sobre el curso de dicho drenaje, en dirección Este – Suroeste. Barragán & Forero, 2014 la consideran como una falla transversal, en forma de rampa lateral, pues transfiere el desplazamiento a través de su rumbo y permite la apertura de una ventana al Paleógeno en medio de la secuencia Cretácica deformada, poniendo en contacto unidades con buzamiento contrario. Esta falla junto con otros factores es responsable de la inestabilidad del terreno manifestada en movimientos en masa sobre las veredas Centro y Cruz Grande y Garbanzal en el municipio de Carcasí.

En el municipio de Carcasí la influencia de la falla de San Mateo, fractura de tipo inverso con dirección preferencial Norte-Sur con una ligera desviación hacia el Noroeste según Royero & Clavijo (2001), deja en contacto las rocas de la unidad Paleozoica del Río Nevado a ambos lados, siendo afectada por otras fallas transversales. A su vez la Falla de la Quebrada La Honda ejerce un fuerte control estructural sobre el curso de dicho drenaje, presentando un comportamiento estructural de tipo normal con dirección preferencial Norte-Noroeste, la cual presenta una inclinación hacia el occidente según Royero & Clavijo (2001), sin embargo Barragán & Forero (2014) la definen como una falla inversa profunda de alto ángulo, con dirección preferencial NNW-SSE la cual propicia el levantamiento de la unidad Paleozoica del Río Nevado.

7. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se divide en cinco fases tal y como se plantea en el diagrama metodológico de la **Figura 16**. La primera fase inicia con una recopilación y análisis de la información secundaria, en donde se adquirieron los insumos necesarios (Modelo Digital de Elevación (DEM), Geología de la plancha 136 Málaga, Imágenes satelitales de la zona y MM registrados en la plataforma SIMMA). En la segunda fase se procede a elaborar los mapas preliminares para la fase de campo (geológico, morfogenético, de UGS y de MM); luego en la de campo se refinan dichos mapas y se registran nuevos MM de la zona. La digitalización de los anteriores mapas descritos y la elaboración de los 11 mapas de factores causantes se realizan durante la cuarta fase, por último se procede a elaborar el mapa de susceptibilidad final aplicando las redes neuronales artificiales (Fase V).

Figura 16. Diagrama metodológico del trabajo de Investigación.



7.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA

Esta fase comprende la recopilación, selección y análisis de información secundaria (mapas, libros, tesis, artículos, manuales, imágenes, sistemas de información y publicaciones) correspondientes a los estudios geológicos, geomorfológicos y de susceptibilidad a los movimientos en masa, especialmente los realizados en la plancha 136; así como de los estudios de susceptibilidad a los movimientos en masa aplicando Redes Neuronales Artificiales.

De esta manera se establecieron los factores causantes para la generación del mapa de susceptibilidad relativa a movimientos en masa. Los atributos se clasifican en dos tipos, cuantitativos y cualitativos. Dentro de los cuantitativos se encuentra el atributo geológico de Densidad de Fracturamiento y los atributos morfométricos de Acuenca, Curvatura, Pendiente y Rugosidad, los cuales se derivan del procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Dentro de los factores causantes cualitativos se encuentran los atributos geomorfológicos de Morfodinámica y Morfogénesis, Geología (Textura y Resistencia), Unidades Geológicas Superficiales (UGS), Cobertura de la Tierra y Suelos. También se optó por utilizar el algoritmo Back-Propagation como algoritmo de aprendizaje de la red neuronal debido a que produce muy buenos resultados.

7.2. ELABORACIÓN DE MAPAS PRELIMINARES PARA LA FASE DE CAMPO

Para el desarrollo de esta fase se utilizó el software ArcGIS 10.1 y Google Earth Pro. Inicialmente se digitaliza la información secundaria, se generan los insumos para la interpretación geomorfológica a partir del DEM y se realiza una interpretación preliminar del mapa morfogenético y de UGS.

Inicialmente se georreferencia el mapa geológico de la plancha 136 Málaga a escala 1:100.000 elaborado por Vargas et al., 1984, se corta el mapa dejando el área correspondiente a la plancha 136-II-C y se digitalizan las estructuras (fallas, pliegues y lineamientos), los datos estructurales y las unidades geológicas. Luego se proyecta el DEM con resolución espacial de 12,5 metros a Magna Sirgas Colombia – Zona Bogotá, a partir de dicho DEM se obtienen los mapas de pendientes, sombras, curvas de nivel y drenajes; posteriormente se reclasifica el mapa de pendientes en 7 clases (Ver **Tabla 7**); estos mapas, incluyendo el DEM, las estructuras, los datos estructurales y las imágenes satelitales Landsat & CNES/Astrium de Google Earth Pro, son utilizados en la interpretación morfogénica preliminar de la zona de estudio. Dicha interpretación se basa en la guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos y el glosario de unidades y subunidades geomorfológicas propuestas por Carvajal et al. (2012) para el SGC.

Tabla 7. Clasificación de pendientes para interpretación morfogénica.

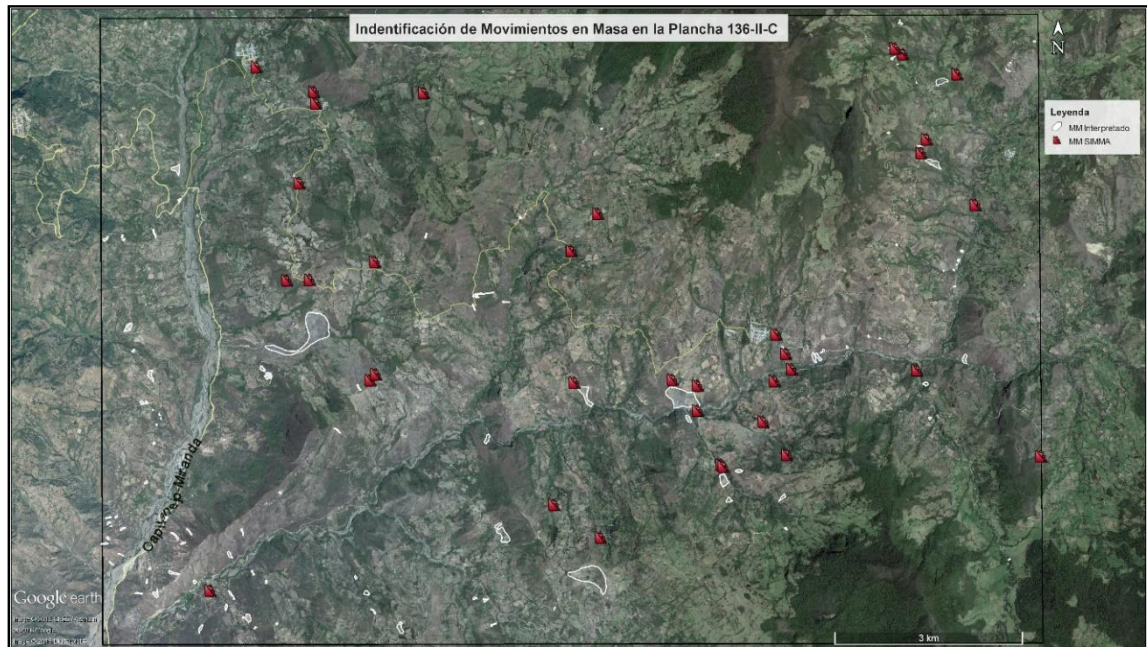
RANGO	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS GENERALES	GEOFORMAS COMUNES
0 - 0.5°	Muy Baja	Terrenos asociados con encharcamiento y pantanos	Llanuras de inundación
0.5 - 2°	Baja	Terrenos asociados con depósitos aluviales clasto-soportados	Vegas y piedemontes aluviales
2 - 7°	Levemente moderada	Terrenos con depósitos pedregosos matriz soportados	Conos Torrenciales
7 - 14°	Moderada	Terrenos con sedimentos variables incluyendo coluviones y sustratos arcillo-limosos	Laderas coluviales finas
14 - 30°	Moderadamente fuerte	Terrenos con depósitos coluviales gruesos y sustrato arcillo-limoso	Laderas coluviales gruesas
30 - 60°	Fuerte	Terrenos con sustrato rocoso superficial	Laderas rocosas
>60°	Muy fuerte	Terrenos con afloramiento rocoso superficial	Escarpes rocosos

Fuente: Tomado de Robertson et al. (2013) en la metodología del SGC (2013).

El mapa preliminar de Unidades Geológicas Superficiales se realiza a partir de imágenes satelitales tipo Landsat & CNES/Astrium de Google Earth Pro, como la

Figura 17, delimitando unidades de roca y suelos (aluviales, coluviales y residuales) de acuerdo a la clasificación propuesta anteriormente para dichas UGS.

Figura 17. Localización de movimientos en masa registrados en el SIMMA e identificación de posibles movimientos en masa.



Fuente: Tomado y modificado de la imagen satelital CNES/Astrium de la plataforma Google Earth Pro (2016).

Una vez terminada la interpretación, se descargan los movimientos en masa registrados en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), adicionalmente se utilizan las imágenes satelitales Landsat & CNES/Astrium de Google Earth Pro para identificar posibles movimientos en masa no registrados en el SIMMA como se muestra en la **Figura 17**; a su vez se establecieron puntos estratégicos para la interpretación de geoformas, unidades geológicas superficiales y refinamiento geológico, con el fin de elaborar una estrategia que permitiera un buen trabajo de campo ahorrando tiempo y costos. Finalmente se elaboran las salidas del mapa de pendientes reclasificado y los mapas preliminares de geología,

La descripción en campo de las unidades morfogénicas se realiza de acuerdo a los parámetros de la Tabla de Recolección de Datos de Morfometría para Cartografía Geomorfológica (Ver **Anexo A**). La descripción en campo de los movimientos en masa se realiza de dos maneras diferentes: la primera describe los MM tipo inventario (MM con un área superior a 2500 m²), en la cual se utiliza el Formato modificado para Inventario de Movimientos en Masa (Ver **Anexo B**), mientras que la segunda describe los MM tipo catálogo (MM con un área inferior a 2500 m² y superior a 100 m²), donde se utiliza el Formato modificado para Catálogo de Movimientos en Masa (Ver **Anexo C**).

A su vez la caracterización geológica consiste principalmente en la revisión de contactos y litologías de las diferentes unidades geológicas, identificación de depósitos cuaternarios presentes y en la definición de nuevos lineamientos, fallas y estructuras. De la misma forma se comprueban las UGS previamente identificadas en la fotointerpretación.

Cabe resaltar que dentro de las limitantes que se presentaron para el refinamiento geológico, se tiene que la caracterización de las formaciones (unidades geológicas) no llega al detalle de subdividir las en grupos y miembros, y que para la caracterización de UGS no se realizaron perfiles de meteorización para conocer espesores ni estudios edafológicos, factores que aumentarían la calidad de la información y contribuiría en la precisión a la hora de identificar las zonas más susceptibles. Es por eso que se hace especialmente énfasis en cartografiar los procesos morfodinámicos actuales, evidenciados principalmente en depósitos coluviales y de MM, así como en aumentar la densidad de fracturamiento identificando nuevos trazos de fallas y lineamientos, además de utilizar los mapas de cobertura vegetal y suelos suministrados por el convenio SGC-UIS (2014).

7.4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE FACTORES CAUSALES CALIFICADOS

En esta fase el software ArcGIS 10.1 fue ampliamente utilizado con el fin de refinar los mapas de morfogénesis, geología, UGS y MM, y así generar los mapas de factores causantes calificados por susceptibilidad relativa a movimientos en masa. Una vez elaborado el mapa morfogenético final, se le asigna a cada geoforma la calificación de susceptibilidad por movimientos en masa en base a sus factores endógenos, exógenos, agradacionales y degradacionales de acuerdo a la metodología del SGC (2013). El mapa geológico se refina partir del mapa morfogenético final, de la siguiente manera: inicialmente se extraen las geoformas asociadas a depósitos (incluyendo los escarpes de erosión mayor (Deem) o menor (Deeme) asociados a depósitos) del mapa morfogenético, luego se eliminan los depósitos cuaternarios del mapa geológico preliminar, acto seguido sobre el mapa geológico se crea el hueco y el relleno correspondiente de las geoformas asociadas a depósitos; finalmente a cada uno de éstos depósitos se les asigna su nomenclatura geológica correspondiente. Los depósitos cuaternarios reciben una sola calificación de susceptibilidad relativa por movimientos en masa (Ver **Tabla 8**), mientras que las formaciones geológicas fueron calificadas para los parámetros de Fábrica/Textura (Ver **Tabla 9**) y Resistencia (Ver **Tabla 10**).

Tabla 8. Depósitos cuaternarios calificados según la susceptibilidad por MM.

DEPÓSITO	NOMENCLATURA	CALIFICACIÓN
Depósitos lagunares	Ql	1
Depósitos de cauce activo	Qal2	1
Depósitos de llanura de inundación	Qal1	1
Depósitos de terraza aluvial	Qt	2
Depósitos de cono de deyección	Qcal	3
Depósitos de detritos (deslizamientos y flujos)	Qco	4
Depósitos coluviales	Qc	5

Fuente: Tomado y modificado de SGC (2013).

Tabla 9. Atributo de fábrica calificado según la susceptibilidad por MM.

CLASE	ROCAS	CALIFICACIÓN
Cristalina Masiva	Granitos, calizas, chert y cuarcitas	1
Cristalina Bandeada	Neis	2
Clásticas Cementadas	Areniscas y conglomerados	3
Clásticas Consolidadas	Arcillolitas, lodolitas, shales	4
Cristalina Foliada y de Falla	Pizarras, filitas, esquistos, milonitas	5

Fuente: Tomado y modificado de SGC (2013).

Tabla 10. Atributo de resistencia calificado según la susceptibilidad por MM.

GRADO	ROCAS	CLASE	CALIFICACIÓN
R6	Basaltos frescos, chert, diabasa, neis, granito, cuarcita.	Extremadamente dura	1
R5	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, neis, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba	Muy dura	1
R4	Caliza, mármol, filita, arenisca, esquivo, shale.	Dura	2
R3	Arcillolita, carbón, concreto, esquivo, shale, limolita.	Moderadamente dura	3
R2	Rocas de sal y Rocas de yeso	Blanda	4
R1	Rocas alteradas o altamente meteorizadas.	Muy blanda	5
R0	Rocas de gouge de falla.	Extremadamente blanda	5

Fuente: Tomado y modificado de SGC (2013).

Dado que las formaciones geológicas presentaban dos atributos diferentes (fábrica y resistencia), se les aplica la ecuación **(1)**, con el fin de generar una sola calificación por susceptibilidad a MM. Finalmente el atributo de geología se obtiene a partir de la rasterización de los valores de susceptibilidad para las formaciones y depósitos cuaternarios.

$$(1) \text{ Susceptibilidad de las formaciones} = 0.45 * \text{Resistencia} + 0.55 * \text{Fábrica}$$

El mapa morfodinámico se elabora a partir de la integración de los mapas de relieve relativo, geoformas asociadas a depósitos y movimientos en masa. El mapa de relaincli se genera utilizando la ecuación **(2)**.

$$(2) \text{ Relaincli} = 0.60 * RR + 0.40 * IL$$

Donde los mapas de relieve relativo “RR” y la inclinación de la ladera “IL” se obtienen a partir del procesamiento del DEM, y posteriormente se reclasifican de 1 a 3 como se muestra en la **Tabla 11** y la **Tabla 12**. Por otro lado, al mapa de depósitos asociados a geoformas previamente generado, se le asigna una calificación de susceptibilidad por movimientos en masa de acuerdo a la metodología del SGC (2013). Los shapes de puntos de MM tipo Catálogo y de MM del SIMMA se convierte a polígono por medio de un buffer de 25 metros de radio y posteriormente se les asigna la calificación morfodinámica más alta (valor de 5). Los MM en calidad de Inventario se convierten a polígono utilizando las imágenes satelitales Landsat & CNES/Astrium, a estos polígonos también se les asigna una calificación morfodinámica de 5. Finalmente se procede a integrar los mapas anteriores donde se tiene como base el mapa de relaincli. Primero se genera el hueco y relleno correspondiente a las geoformas asociadas a depósitos y acto seguido, sobre el resultado, se genera el hueco y relleno correspondiente a todos los polígonos de MM (Inventario, Catálogo y SIMMA).

Por otra parte, como se menciona anteriormente, los mapas de cobertura de la tierra y suelos, suministrados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Grupo de Trabajo de Amenazas de la Universidad Industrial de Santander, en el marco del proyecto de zonificación de la Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000.

Tabla 11. Atributo de relieve relativo calificado según la susceptibilidad por MM.

INTERVALOS DE ALTURA	DESCRIPCION DEL RELIEVE	RESISTENCIA RELATIVA DEL MATERIAL	CALRELIE
< 50m	Muy bajo.	Materiales muy blandos y erosionables.	1
50 – 200 m	Bajo.	Blando erosionable.	1
200 – 400 m	Moderado.	Moderadamente blando y erosión alta.	2
400 – 1000 m	Alto.	Resistente y erosión moderada.	3
1000 – 2500 m	Muy alto.	Muy resistente y erosión baja.	3
> 2500 m	Extremadamente alto.	Extremadamente resistente y erosión muy baja.	3

Fuente: Metodología del SGC (2013).

Tabla 12. Atributo de Inclinación de la ladera calificada según pa susceptibilidad por MM.

INCLINACION (Grados)	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y	CALINCLI
< 5	Plana a suavemente	Muy blanda y Muy baja susceptibilidad a MM.	1
5 – 10	Inclinada.	Blanda y baja 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: Metodología del SGC (2013).

El mapa de cobertura de la tierra es suministrado con la calificación heurística que muestra la **Figura 19**, de tal forma que al aplicar la ecuación **(3)** se calcula la susceptibilidad por cobertura de la tierra. Cabe destacar que este mapa de susceptibilidad por cobertura de la tierra arroja valores tipo float (decimales), los cuales son usados para entrenar la red.

Figura 19. Atributos de la variable cobertura de la tierra.



Fuente: Metodología del SGC (2013).

$$(3) \text{ Susceptibilidad por cobertura de la tierra} = 0.25*PR+0.25*DP+0.25*E+0.35*NE$$

Donde:

PR = Profundidad Radicular, DP = Drenaje Profundo, E = Evapotranspiración y NE = número de estratos.

Por otro lado, el mapa de suelos es suministrado con la calificación heurística que se observa en la **Figura 20**, de tal forma que al aplicar la ecuación **(4)** se calcula la la susceptibilidad por suelos. Cabe destacar que este mapa de susceptibilidad por suelos arroja también valores tipo float (decimales), los cuales se usan para entrenar la RNA.

Figura 20. Atributos de la variable suelos.



Fuente: Metodología del SGC (2013).

$$(4) \text{ Susceptibilidad por suelos} = 0.30*TE+0.15*TX+0.15*DN+0.2*P+0.2*TA$$

Donde: *TE = Textura, TX =Taxonomía, DN = Drenaje Natural. P = Profundada y TA=Tipo de Arcilla.*

Por su parte, los mapas de acuenca, pendiente y rugosidad, generados a partir del procesamiento del DEM se reclasifican como se observa en la **Tabla 13**, de acuerdo a la metodología del SGC (2013). Para generar el mapa de densidad de fracturamiento se utilizan las herramientas de estadísticas focalizadas sobre las estructuras previamente digitalizadas. Por último, los atributos de UGS y Curvatura se reclasifican según la **Tabla 14** y la

Tabla 15 respectivamente, teniendo en cuenta diferentes autores y criterios.

Tabla 13. Calificación de susceptibilidad por MM de los atributos acuenca, rugosidad, pendiente y densidad de fracturamiento.

ATRIBUTO	CLASE	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Acuenca	0	Divisoria de Aguas	1
	0 – 3500	Escorrentía Lenta	2
	3500 – 40000	Flujo Acumulado	5

	40000 – 1'000000	Drenaje no permanente	3
	1'000000 – 1233'633280	Quebradas, Ríos	1
Rugosidad	0 – 0,985	Rugosidad Muy Alta	5
	0,985 – 0,99	Rugosidad Alta	4
	0,99 – 0,995	Rugosidad Media	3
	0,995 – 0,9975	Rugosidad Baja	2
	0,9975 - 1	Rugosidad Muy Baja	1
	Pendientes	0 – 7	Plana a Suavemente Inclinada
7 – 11		Inclinada	2
11 – 19		Muy Inclinada	3
19 – 40		Abrupta	4
40 – 90		Escarpada	5
Densidad de Fracturamiento	0 - 2.,214832493	Muy Baja Densidad	1
	2.,214832493 – 3,809511888	Baja Densidad	2
	3,809511888 – 5,404191283	Media Densidad	3
	5,404191283 – 7,530430476	Alta Densidad	4
	7,530430476 – 22,59129143	Muy Alta Densidad	5

Fuente: Tomado y modificado la metodología del SGC (2013).

Tabla 14. Calificación de susceptibilidad por MM del atributo de UGS.

ATRIBUTO	CLASE	CALIFICACIÓN
UGS	Suelo Orgánico	4
	Suelo Residual	3
	Suelo Aluvial (Transportado)	2
	Suelo Coluvial	2
	Roca	1
	Antropogénica	1

Fuente: Tomado y modificado la metodología del SGC (2013).

Tabla 15. Calificación de susceptibilidad por MM del atributo de Curvatura.

ATRIBUTO	CLASE	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Curvatura	-29,440001 – -0,001	Cóncavo	4
	-0,001 – 0,001	Plano	3
	0,001 – 33,919998	Convexo	2

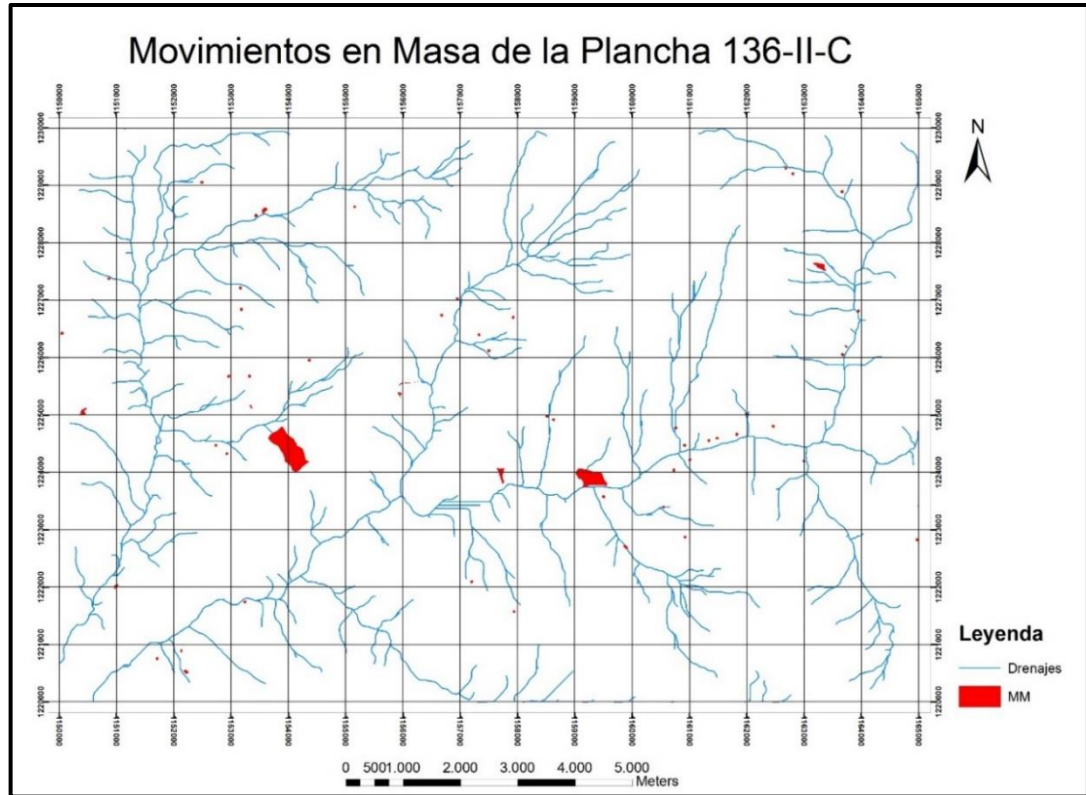
Fuente: Tomado y modificado de la metodología del SGC (2013).

7.5. PROGRAMACIÓN Y SELECCIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Como insumos para el desarrollo de esta fase se utilizan los factores causantes calificados y los polígonos de los movimientos en masa. Se emplea una metodología para la elaboración de una red neuronal utilizando el algoritmo de aprendizaje Back-Propagation, a través de 3 etapas descritas a continuación.

7.5.1. Creación del set de datos. Esta etapa se inicia con la rasterización, teniendo en cuenta la resolución espacial del DEM (12,5 metros); de los mapas de factores causantes, con el fin de que todos sean homogéneos en términos de extensión y número de píxeles. En segundo lugar, se procede a unir en un solo shape todos los polígonos de movimientos en masa, este shape se rasteriza de la misma manera en que se rasterizan los mapas de factores causantes, a partir de esto se determina que los MM cubren 3238 píxeles≈0,33% de un total de 960.000 píxeles que presenta la zona de estudio (Ver **Figura 21**). Posteriormente se seleccionan tres set de datos para entrenar, validar y probar la red, todos con una relación 1:1 de acuerdo a Lee *et al.*, (2003). Es decir 1619 ejemplos de la clase 0 y 1619 ejemplos de la clase 1. Esta relación se utiliza con el fin de que la red no se incline por reconocer una clase en mayor medida.

Figura 21. Movimientos en masa de la plancha 136-II-C.



La elaboración del set de datos 1 y 2 se describe a continuación: inicialmente se determina de manera heurística las zonas de baja susceptibilidad relativa, estas zonas fueron rasterizadas como se pueden observar en los **Anexo D** y **Anexo E**. Estos raster, acompañados con el de MM, son utilizados como máscara para la extracción de los valores calificados en formato "dbf" de cada factor causante, las cuales posteriormente son consolidadas en una sola tabla. El orden escogido de las columnas es el siguiente: Calsusacuenca, Calsusgeo, Calsusmorfodinámico, Calsusmorfogenético, Calsuscoberturadelatierra, Calsusedafológico, CalsusUGS, Calsuscurvatura, Calsusdenfrac, Calsuspendientes, Calsusrugosidad. A partir de esta tabla se seleccionaron aleatoriamente 1619 ejemplos y se les asigna un valor "target" de 0 (ausencia de MM). De igual manera se procedió con las tablas de MM, con la única diferencia de que a sus ejemplos se les asignó un valor "target" de

1 (alta susceptibilidad u ocurrencia de MM). Luego se unen las dos tablas finales, se ordenan aleatoriamente y se exporta la columna “target” y las otras 11 columnas como tablas independientes en formato “XLSX”.

La elaboración de las entradas y targets en formato XLSX del tercer set de datos fue generada a partir de la división de los raster de baja susceptibilidad y de MM en las secciones de (entrenamiento, validación y test) mediante el software de ArcGIS 10.1 (**Anexo F**) y la metodología anteriormente descrita. Adicionalmente a cada set de datos se le generó un set de test final, el cual consta de los 1619 movimientos en masa no utilizados en las secciones de (entrenamiento, validación y test), con un “target” de 1.

7.5.2. Programación de las redes neuronales artificiales. Una vez establecidas las entradas y los targets de cada set de datos, se procede a determinar los parámetros de entrenamiento de la red.

Los parámetros constantes se observan en la **Tabla 16**, mientras que los los parámetros de normalización, función de división y algoritmos de entrenamiento fueron diferentes para cada set de datos (Ver **Tabla 17**). La normalización de -1 a 1 se realiza con la función de MATLAB “mapminmax”, mientras que la normalización de 0 a 1 se realiza utilizando la ecuación (5). Cabe destacar que cada arquitectura del set de datos 2 y 3 se corrió dos veces.

Tabla 16. Parámetros constantes utilizados en el entrenamiento.

Parámetros constantes	
Número de capas ocultas	1
Número de capas de salida	1
Número de neuronas en la capa oculta	[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10] [12,14,16,18,20,25,30,40,50,100]
Función de activación para la capa oculta	Sigmoidal (Logsig)

Función de activación para la capa de salida	Tangencial (Tansig)
Rango de salidas	[0 - 1]
Error de generalización (MSE)	0,05
Número de iteraciones	5000
Número máximo de fallos	100
Número mínimo de gradiente	0,00001
Porcentajes de Ent, Val y Test	[70%, 15% y 15%]
Número de pares de entrenamiento	2266
Número de pares de validación	486
Número de pares de test	486
Número de pares de test final (MM)	1619

$$(5) N = \frac{\text{valor del pixel} - \text{valor mínimo}(1)}{\text{valor máximo}(5) - \text{valor mínimo}(1)}$$

Tabla 17. Parámetros de entrenamiento para cada set de datos.

Set	Normalización de las entradas	Función de división	Algoritmos de entrenamiento
1	[-1 - 1]	Dividerand	Trainlm, Trainscg, Trainrp, Traingdx
2	[-1 - 1]	Divideind	Trainlm, Trainscg
3	[0 - 1]	Dividerand	Traingdx, Trainrp

Una vez definidos los parámetros de entrenamiento se genera el código en Matlab R2015a por lo que se procede a correr la red; inicialmente se generaron 240 modelos de redes neuronales considerando 160 arquitecturas diferentes. Sin embargo, con el fin de hacer algunas comparaciones adicionales (rendimiento del algoritmo e influencia de la variable morfodinámica) se corrió la red 49 veces más. De este modo se generaron en total 289 redes neuronales correspondientes a 186 arquitecturas diferentes. A cada uno de estos modelos se les registró el número de iteraciones “epoch”, error medio cuadrático general “MSE” o “Performance”, R^2 y la exactitud en el test final; esta última corresponde al % de MM cuyo resultado fue correcto (salidas $\geq 0,8$) (**Ecuación 6**).

$$(6) \%MM \text{ del test final en clase 5} = \frac{\# \text{ de salidas} \geq 0,8 * 100}{\# \text{ de MMdel test (1619)}}$$

7.5.3. Determinación de la mejor red neuronal. Luego de un análisis de los datos, se considera seleccionar sólo las redes que presentan una exactitud de MM en el test final entre 85 y 90%. Posteriormente, a las 19 redes seleccionadas, se les calcula la respuesta de la red ante la totalidad del mapa. Para correr la red con los parámetros de entrada de toda la plancha 136-II-C y visualizar sus resultados se procede de la siguiente manera: primero mediante ArcGIS se convierten los raster de cada factor causante a formato "ASCII", luego mediante Excel se le hizo un ajuste a los archivos ASCII para posteriormente convertirse a formato XLSX con el fin de poder ser importados a Matlab R2015a.

Una vez importados se generó la matriz 11*960000 la cual contenía la entrada de los 11 factores causantes para la totalidad del mapa, esta matriz fue normalizada (según el modelo seleccionado) y por último se simuló el mapa final. La salida consistía en una matriz de dimensión 1*960000 con valores entre 0 y 1; esta matriz fue exportada a formato CSV, se editó en el Bloc de Notas y finalmente se guardó en formato TXT para su lectura como ASCII en el software ArcGIS 10.1. El formato ASCII se convirtió a raster, teniendo en cuenta las características del DEM, y sus valores fueron reclasificados de acuerdo a la **Tabla 18**. Cabe destacar que este procedimiento fue realizado para cada una de las 19 redes previamente seleccionadas.

Tabla 18. Reclasificación de las salidas de la red en valores de susceptibilidad.

Salida de la red	Susceptibilidad
0 – 0,2	1
0,2 – 0,4	2
0,4 – 0,6	3
0,6 – 0,8	4
0,8 - 1	5

Los mapas de susceptibilidad generados se compararon entre sí, y tras un análisis de criterio experto se escoge el mapa que mejor representa la susceptibilidad relativa por movimientos en masa de la zona de estudio.

7.5.4. Validación de la red neuronal final. Seleccionada la red neuronal artificial se genera un proceso de validación de la misma, teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: 1) Exactitud (ACC), 2) Ranking de entradas y 3) Comparación cualitativa con el mapa de susceptibilidad heurística de la plancha 136-II-C.

De una forma general, la exactitud del modelo (ACC) se calcula a partir de la matriz de confusión del modelo; por otra parte, el cálculo del ranking de las entradas que más contribuyen en la respuesta de la red, se realiza de acuerdo al método "Stepwise", se selecciona primero la entrada a evaluar, luego se suprimen (reemplazaron por 0) del set de datos las demás variables, posteriormente se simula la red y se calcula el MSE. Dado que el MSE mínimo es el de la simulación de la red con los valores de las entradas sin alterar, se establece como lo plantea Sung (1998), que el MSE más bajo correspondería a la variable de mayor contribución al modelo; mientras que el MSE más alto correspondería a la variable de menor contribución al modelo. Dicho esto, se ordenan ascendentemente los valores de MSE y con ello se obtiene la importancia relativa de cada factor causante. Por último, el mapa de susceptibilidad es comparado con el mapa heurístico de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25.000 de la plancha 136-II-C generado en este trabajo de investigación. Es importante mencionar que este mapa no tiene en cuenta las variables de Curvatura y UGS propuestas en este trabajo de investigación.

8. INSUMOS

El mapa de zonificación de susceptibilidad relativa a movimientos en masa, requiere de diferentes insumos para su generación. En el proyecto de investigación se utilizaron insumos generales e insumos temáticos. Dentro de los insumos generales se encuentra el modelo digital de elevaciones (DEM), las imágenes satelitales y el registro de los movimientos en masa previos; por otra parte, los insumos temáticos utilizados fueron los mapas geológicos, edafológicos y de cobertura de la tierra.

8.1. INSUMOS GENERALES

8.1.1. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) e Imágenes satelitales. El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) contiene la información de la altura “Z” de una determinada área (pixel). El DEM que se utiliza en este proyecto fue liberado por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) (**Anexo G**), producto de la misión del sensor radar ALOS-1 PALSAR. Dentro de estas imágenes de radar, se encuentra el procesamiento Hi-res terrain corrected, el cual incluye el Modelo Digital de Elevaciones con una resolución espacial de 12,5 metros por pixel, la cual brinda una resolución óptima para estudios a escala 1:25.000. El DEM es el insumo de mayor importancia, ya que a partir de él se genera la cartografía básica, los mapas morfométricos y morfodinámicos, además de ser una herramienta muy útil en la interpretación morfogenética y el refinamiento geológico.

Según la metodología del SGC (2913), los sensores remotos son herramientas capaces de detectar y coleccionar la energía proveniente de la superficie de la tierra, convertirla en una señal posible de ser registrada y presentada en una imagen, en una forma adecuada, para la obtención de información de interés. Las imágenes

satelitales LANDSAT & CNES/Astrium utilizadas en este proyecto como la de la **Figura 17**, son suministradas por la herramienta Google Earth Pro.

8.1.2. Registro SIMMA de Movimientos en Masa

El Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) registra, almacena, administra, procesa y visualiza información acerca de los movimientos en masa de Colombia. La **Figura 17** muestra un total de 34 movimientos en calidad de inventario y 1 movimiento en calidad de catálogo ara la plancha 136-II-C.

8.2. INSUMOS TEMÁTICOS

8.2.1. Mapa Geológico. El mapa geológico es un insumo temático importante debido a que brinda información vital para la interpretación morfogenética, a partir de los lineamientos, fallas, pliegues, datos estructurales y unidades geológicas seg Vargas *et al.* (1984), elaboró el mapa geológico a escala 1:100.000 de la plancha 136-Málaga; el cual es utilizado como insumo en este proyecto para su posterior actualización a escala 1:25.000 por medio de la fotointerpretación (**Figura 14c**).

8.2.2. Mapas de Cobertura de la Tierra y Suelos Edafológicos. Los mapas de cobertura de la tierra y suelos son suministrados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Grupo de Trabajo de Amenazas de la Universidad Industrial de Santander, en el marco del proyecto de “Zonificación de la Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000”.

9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. GEOLOGÍA

Los análisis estratigráficos y estructurales son fundamentales a la hora de realizar estudios de susceptibilidad relativa a movimientos en masa, en ellos se debe priorizar la cartografía geológica detallada tanto de Formaciones Geológicas como de Depósitos Cuaternarios y en lo posible acompañarlos de estudios de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI). La cartografía detallada de fallas y pliegues se debe realizar con el fin de indicar posibles zonas de alta densidad de fracturamiento, además una buena interpretación de estas estructuras brinda calidad a la hora de elaborar mapas geomorfológicos.

En el presente trabajo de investigación se refina el mapa geológico a partir de la interpretación de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación, acompañados necesariamente de un trabajo en campo; priorizando la cartografía de depósitos cuaternarios y estructuras. El resultado de la elaboración del mapa geológico a escala 1:25.000 de la plancha 136-II-C se presenta en la **Figura 22**. Para una adecuada interpretación de la geología, se considera caracterizar la plancha en 3 zonas: 1) Zona de Carcasí, 2) Zona estructural con orientación preferencial Noroeste – Sureste y 3) Zona del Sinclinal de Servitá.

9.1.1. Zona de Carcasí. Esta zona está delimitada al Noroeste por la Quebrada Suparí, al Suroeste por el contacto de la Formación Tibú-Mercedes y la Formación Capacho (al oeste de la Quebrada La Honda) y al Sur, Norte y Este por los límites de la plancha.

Estructuralmente la zona se encuentra fuertemente influenciada por la Falla de San Mateo, la Falla del Río Tunebo y la Fallas de las Quebradas Suparí y La Honda.

También afloran rocas del Cretácico correspondientes a la Formación Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho, La Luna, Colón Mito-Juan, y la Formación Barco del Paleógeno. La Formación Tibú- Mercedes ocupa gran parte de esta zona, situándose en las veredas Montonera, Buenavista, Cruz Grande y Garbanzal, Centro, Ropejo Bajo y Quebrada Honda; sin embargo, a pesar de su gran extensión es difícil encontrar un buen afloramiento de esta unidad. Al igual que la Formación Paleozoico del Río Nevado, Tibú – Mercedes se encuentra fuertemente afectada por movimientos en masa, éstos se presentan a lo largo de la carretera Enciso – Carcasí, principalmente en el tramo Quebrada Suparí – Carcasí.

Figura 23. Formación Paleozoico del Río Nevado (Pcrn). Margen derecho del Río Tunebo a 200 metros del puente que comunica el Municipio de Carcasí con el Municipio de San Miguel. Se observa el nivel de limolitas rojas con tonalidades moradas.



El refinamiento geológico de esta zona permite identificar cuatro tipos de depósitos. A continuación, se describe de manera detallada cada uno de ellos.

➤ **Depósitos de Cauce Activo (Qal2).** Depósitos producto de la erosión y depositación de materiales asociados a la dinámica de los drenajes. En la zona estos depósitos se presentan en los ríos Tunebo y Petaquera, ambos con dirección de flujo Este – Oeste; y en la Quebrada El Bejuco de dirección Norte – Sur y la Quebrada El Colmillo con dirección Sur – Norte como se muestra en la *¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..* Dichas quebradas vierten sus aguas al Río Tunebo. Estos ríos se caracterizan por ser cauces rectos que se desarrollan a lo largo de valles estrechos relacionados al control estructural que ejercen la falla del Río Tunebo. La dinámica de estos drenajes dio lugar a la depositación en su lecho, de arenas y gravas en barras longitudinales en periodos secos y bloques de gran dimensión subredondeados a redondeados en épocas fluvio-torrenciales. Estos bloques son en su mayoría, limolitas muy compactas y cuarzoarenitas, las cuales provienen de las formaciones circundantes, en especial de la Formación Paleozoico del Río Nevado y Aguardiente.

Figura 24. Depósitos de cauce activo (Qal1). Bloques subredondeados de limolitas y cuarzoarenitas transportados por la Quebrada el Bejuco, sobre el puente que comunica la Cabecera Municipal de Carcasí con el Corregimiento el Tobal del mismo municipio.



➤ **Depósitos de Cono de Deyección (Qcal).** Superficie en forma de cono o abanico conformada por depósitos heterométricos de materiales no consolidados heterogéneos, producto de la desembocadura de una corriente en una zona plana o de menor gradiente. Este tipo de depósito se presenta únicamente en las inmediaciones de la Quebrada el Bejuco como se observa en la **Figura 25**, al Norte del Corregimiento El Tobal. Litológicamente presenta granulometría más gruesa hacia la zona más alta (Noreste de la Quebrada) y granulometría más fina acompañada de bloques rodados de gran dimensión, hacia la zona más baja (Suroeste de la Quebrada).

Figura 25. Cono de deyección (Qcal). Generado por la acción de la Quebrada el Bejuco, localizada al Norte del Corregimiento El Tobal. En la imagen también se observa el contacto entre las rocas de la Formación Colón-Mito Juan y los estratos en contra pendiente de la Formación Barco.



➤ **Depósitos Coluviales (Qc)**, Los depósitos se encuentran ubicados sobre la Quebrada El Colmillo, las inmediaciones de la Quebrada Honda y hacia el Norte de Carcasí en Vereda Victarigua. Estos depósitos no se pudieron describir en campo, debido a la dificultad para acceder a esta zona. Su identificación se realizó únicamente a partir de imágenes satelitales, por lo que su litología no es descrita en este trabajo de investigación.

9.1.2. Zona estructural con orientación preferencial Noroeste – Sureste. Esta zona está delimitada al Noroeste por el contacto de la Formación La Luna y la Formación Colón – Mito Juan, ubicado al Oeste de la Falla de Villeta; al Suroeste por la Quebrada la Miel, al Noreste por la Quebrada Suparí; al Sureste por el trazo del contacto de la Formación Tibú – Mercedes y La Luna; y al Norte y Sur por los límites de la plancha 136-II-C.

Estructuralmente se caracteriza por presentar una serie de fallas, anticlinales y sinclinales con dirección preferencial Noroeste – Sureste. Como estructuras mayores se encuentra la Falla del Río Tunebo con orientación Este – Suroeste, y la Falla de la Quebrada Suparí con orientación Noreste – Suroeste; hacia estas estructuras se intersectan las Fallas de Robles, Villeta, Pamplonita y Quebrada La Miel, todas orientadas con la dirección preferencial de la zona. En el trabajo de campo se reconoció un lineamiento (Falla Quebrada la Ínsula), la cual recibe su nombre por que su trazo Noreste - Suroeste es paralelo al de la Quebrada homónima. Hacia las Veredas Puertas y Robles del Municipio de Enciso y la Vereda Pamplonita del Municipio de San Miguel se localizan los ejes de los anticlinales y sinclinales con una orientación Noroeste - Sureste; por lo general los anticlinales exhiben sólo su flanco Este; mientras que los sinclinales se encuentran erosionados. Estratigráficamente afloran únicamente rocas cretácicas. La Formación Tibú – Mercedes aflora hacia el norte de la zona, en la Vereda Robles, con presencia de movimientos en masa sobre la vía Enciso – Carcasí, cerca de la Quebrada Suparí.

La Figura 26 muestra en afloramiento La Formación Aguardiente, constituida por intercalaciones de areniscas cuarzosas de color gris con tonalidades claras, de grano medio a grueso, con contenidos de micas y lodolitas grises a negras. Esta formación se caracteriza por presentar una cantidad elevada de plegamientos (Sinclinales y Anticlinales de Puertas y Aguardiente), los cuales generan altos buzamientos en las rocas que a su vez producen movimientos en masa sobre la vía Enciso – Carcasí, en la Veredas Puertas, cerca de la Quebrada Suparí. Cabe destacar la majestuosidad del Anticlinal Aguardiente evidenciado en la **Figura 27**. La formación se distribuye en la zona a manera de delgadas franjas alargadas con dirección Noroeste – Sureste, las cuales se encuentran ubicadas en las Veredas Villeta, Puertas, Saucara, Pamplonita y Arenal.

Figura 26. Formación Aguardiente (Kia). Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, Vereda Puertas. Se observan potentes estratos de areniscas cuarzosas blancas, muy compactas.



Figura 27. Flanco Este del Anticlinal Aguardiente. Margen derecho de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, aproximadamente a 1 km antes de la Quebrada Suaparí.



También afloran rocas de la Formación Capacho, La Luna y en menor proporción Colón – Mito Juan, en forma de franjas alargadas en dirección Noreste – Sureste, distribuidas homogéneamente sobre toda la zona. La Formación Capacho se muestra en la **Figura 28**, y está constituida por intercalaciones de areniscas calcáreas, lutitas negras y calizas; mientras que la Formación La Luna como se muestra en la **Figura 29**, es mucho más calcárea, se encuentra constituida por intercalaciones de lutitas calcáreas con presencia de nódulos calcáreos que llegan a alcanzar los 50 centímetros de diámetro y láminas delgadas de chert negro, calizas y chert.

El refinamiento geológico de esta zona permitió la identificación de dos tipos de depósitos. A continuación, se describe de manera detallada cada uno de ellos.

Figura 28. Formación Capacho (Ksc). Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, Vereda Puertas. Se observan estratos de areniscas ligeramente calcáreas.



Figura 29. Formación La Luna (Ksl). Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, Vereda Carrizal. Se observan estratos verticales altamente meteorizados y concreciones calcáreas con dimensiones de 50 cm de diámetro.



➤ **Depósitos de Cauce Activo (Qal2).** Depósitos producto de la erosión y depositación de materiales asociados a la dinámica de los drenajes. En la zona estos depósitos se presentan en el Río Tunebo con dirección Este – Suroeste, la Quebrada Suparí con dirección Noreste – Suroeste, la Quebrada La Miel con dirección Sureste – Noroeste y la Quebrada la Ínsula con dirección Noreste - Suroeste. La dinámica de estos drenajes dio lugar a la depositación en su lecho, de arenas, gravas y cantos rodados subredondeados a redondeados en sus partes más altas; mientras que en sus zonas más bajas (como en el puente de la Vía Enciso- Carcasí, que permite el paso sobre la Quebrada Suparí), la granulometría decrece hasta formar barras de limos y en algunos casos arcillas, estas zonas distales al nacimiento del drenaje, han permanecido sin alteraciones debido a la ausencia de periodos de crecida; por lo que se ha desarrollado vegetación sobre sus barras.

➤ **Depósitos Coluviales (Qc).** Son depósitos que provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes por la acción de la fuerza de gravedad y el transporte por flujos de agua no canalizados. Consisten en cantos y bloques angulares con diámetros de hasta 50 cm, embebidos en matriz arenosa, heterométricos, situados en terrenos con una topografía inclinada a suavemente inclinada. Dichos depósitos se distribuyen en la Vereda Arenal, Pamplonita, Robles, Puertas, Carrizal y Villetas (Ver **Figura 30**)

9.1.3. Zona del Sinclinal de Servitá. Esta zona se encuentra delimitada al Noreste por el contacto entre la Formación La Luna y Colón – Mito Juan, al Sureste por la Quebrada La Miel, y al Norte, Sur, y Oeste por los límites de la plancha. Incluye la Cabecera Municipal y el Corregimiento Peña Colorada del Municipio de Enciso.

Estructuralmente se encuentra controlado por el Sinclinal Servitá, y la falla satélite (Falla del Río Servitá) de la Falla Servitá, la cual presenta una dirección Norte – Sur,

con una inclinación hacia el Oeste que da origen a vergencias hacia el Este, causando inclusive inversiones en los sedimentos Cretácicos y Paleógenos de la zona (Barragán & Forero, 2014). El Sinclinal de Servitá se extiende por todo el “Valle del Servitá”, que exhibe rocas terciarias (Paleógeno), cuyo eje posee un rumbo N-S y NW-SE hacia el Sur de la plancha 136-II-C.

Figura 30. Depósitos coluviales (Qc). Margen derecho del carreteable que comunica el La Cabecera Municipal de Enciso con la Vereda Cochaga. Se observa cantos y bloques angulares embebidos en una matriz arenosa; los bloques se componen principalmente por areniscas cuarzosas, asociados a la Formación Aguardiente.



En el flanco Oeste del sinclinal se encuentra en el Municipio de San José de Miranda, donde aflora la Formación Barco, Los Cuervos, Mirador y Carbonera. La extensión de este flanco se presenta casi completa, exceptuando el contacto fallado (Falla Los Tapiales), entre la Formación Barco y la Formación Colón-Mirto Juan hacia el Sur de este flanco, exactamente en la Vereda Carbonera; y el contacto fallado (Falla Servitá) entra la Formación Carbonera y, Tibú-Mercedes y Rio Negro hacia el Norte del flanco.

El flanco Este del sinclinal se encuentra fuertemente fallado, es así como hacia el Centro y Norte de este flanco se pierde la secuencia Paleógena y en su defecto aflora la Formación Colón-Mito Juan del Cretácico Superior, el contacto entre estas dos secuencias es un contacto fallado que se presenta a lo largo de la Quebrada Las Puertas, específicamente en la Vereda Loma Del Negro.

Hacia el sur de este flanco, en la Vereda Loma Del Negro, El Juncal y Agua Sucia la secuencia Paleógena (Formación Barco, Los Cuervos, Mirador y Carbonera) hace parte de una gran sierra, en donde sus formaciones presentan un ligero cambio de rumbo de Norte-Sur a Noreste-Suroeste; esta sección sur del flanco es cortado hacia el oeste, en la Vereda Quebrada de Vera y El Juncal, por una serie de fallas y sinclinales locales y hacia el sur, en la Vereda Cenacuta, por la Falla del Río Tunebo, en donde el sinclinal toma una dirección Noroeste – Sureste; en estos dos lugares, el sinclinal pierde claridad y exhibe únicamente rocas de la Formación Barco y Los Cuervos.

Estratigráficamente afloran en pequeñas proporciones las Formaciones del Cretácico Inferior Rio Negro, Tibú Mercedes y Aguardiente; y la Formación del Cretácico Superior Colón-Mito Juan. Así como las Formaciones Carbonera, Mirador, Los Cuervos y Barco del Paleógeno, a manera de franjas alargadas con direcciones preferenciales Norte – Sur.

En la **Figura 31** se observa la Formación Colón - Mito Juan, la cual se caracteriza por presentar intercalaciones de lodolitas grises y areniscas de grano fino a muy fino; su contacto con las Formaciones Paleógenas de la plancha es principalmente fallado y en algunos sectores concordante. Asociada a esta formación se encuentran numerosos MM, los cuales representan la mayor área de movimientos en masa de la plancha 136-II-C, básicamente por el área de afectación del movimiento en masa ubicado en la Vereda Loma Del Negro, al margen sur de la

Quebrada Puertas. Estos MM se pueden asociar al predominio de lodolitas en esta formación.

Figura 31. Formación Colón – Mito Juan (Kscm). Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, Vereda Loma del Negro. Se observa la intercalación de areniscas de grano fino a medio y lodolitas.

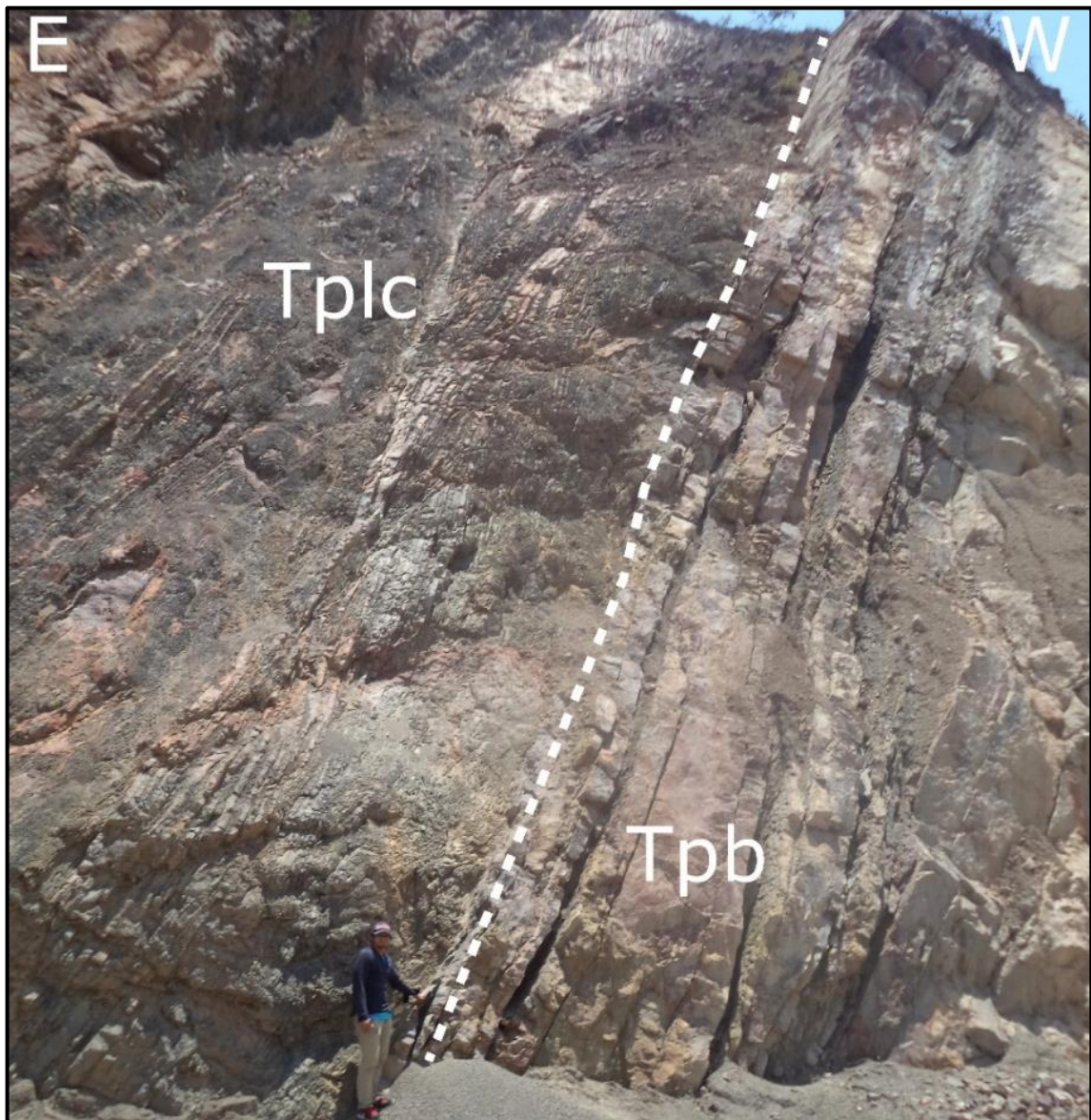


La Formación Barco está constituida por potentes capas de areniscas blancas cuarzosas de grano medio a grueso hacia su base, intercalaciones de areniscas blancas con tonalidades amarillentas y verdosas de grano medio y capas delgadas de lodolitas negras con tonalidades grisáceas hacia su techo, frecuentemente muy meteorizadas.

La Formación Los Cuervos está constituida por intercalaciones de arcillolitas y limolitas grises con tonalidades verdosas y oscuras, lodolitas con presencia de

delgadas capas de carbón y arenisca gris de grano fino a muy fino; el contacto entre estas dos formaciones es neto (Ver **Figura 32**).

Figura 32. Contacto neto entre rocas del Paleoceno correspondientes a la Formación Barco (Tpb) y la Formación Los Cuervos (Tplc), margen derecho de la vía que comunica el Municipio de Capitanejo con el Municipio de Málaga, Vereda El Juncal. Se observan las potentes capas de areniscas grises con tonalidades amarillentas de la Formación Barco, en contacto neto con las arcillolitas grises verdosas de la Formación Los Cuervos.



La Formación Mirador está constituida por intercalaciones de areniscas ligeramente conglomeráticas, las cuales presentan laminación y limolitas grises carbonáceas mientras que la Formación Carbonera por su parte se compone principalmente de lodolitas y areniscas. A pesar de la extensión cubierta por las dos formaciones descritas anteriormente, no fue posible identificar en el trabajo de campo un afloramiento representativo de estas unidades

El refinamiento geológico de esta zona permitió la identificación de cinco tipos de depósitos. A continuación, se describe de manera detallada cada uno de ellos.

➤ **Depósitos de Cauce Activo (Qa12).** Depósitos producto de la erosión y depositación de materiales asociados a la dinámica de los drenajes. En la zona estos depósitos se presentan a lo largo del Río Servitá con dirección Norte – Sur, el Río Tunebo con dirección Noreste – Suroeste, la Quebrada Ínsula con dirección Noreste – Suroeste, la Quebrada Espinal con dirección Oeste - Este y la Quebrada El Salado con dirección Noroeste – Sureste.

La dinámica de estos drenajes dio lugar a la depositación en su lecho, de arenas, gravas y bloques rodados redondeados a subredondeados de gran dimensión provenientes de las Formaciones Paleógenas aledañas y en menor medida de las Formaciones Cretáceas de la zona; y el desarrollo de barras esencialmente longitudinales.

➤ **Depósitos de Llanura de Inundación (Qa11).** Sedimentos no consolidados aluviales depositados en las márgenes de los ríos, a lo largo de su cauce, en periodos de inundación. Este tipo de depósitos consisten en partículas de arena media a gruesa y presencia heterogénea de cantos y bloques rodados polimícticos, en las partes más cercanas a su cauce, y partículas de arenas finas, limos y arcillas hacia sus partes más distales.

La mayoría de estas llanuras de inundación presentan vegetación, indicando periodos prolongados de energía baja; se presentan únicamente a lo largo del Río de Servitá como se muestra en la **Figura 33**, iniciando específicamente en la Vereda Popaga y Loma del Negro pertenecientes a los municipios de San José de Miranda y Enciso, respectivamente; y finalizando en la Vereda Carbonera y Quebrada de Vera. Su principal diferencia con los depósitos de cauce activo son su distancia del cauce, que se desarrollan en zonas planas, su granulometría más fina y el tamaño de sus bloques.

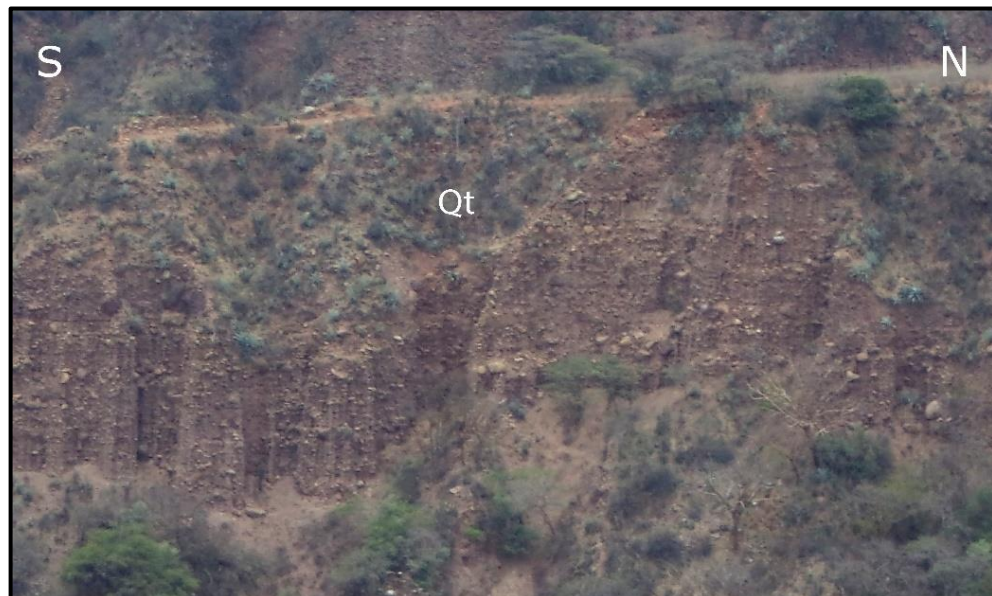
Figura 33. Depósitos aluviales del Río Servitá. Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Capitanejo con el Municipio de Málaga, Vereda Quebrada de Vera - Enciso. Se observan cantos rodados embebidos en una matriz de arena gruesa (QaI2), y sedimentos de arena y lodos con presencia de vegetación (QaI1).



- **Depósitos de Terraza Aluvial (Qt).** Depósitos aluviales localizados hacia las márgenes de los drenajes, como producto de la incisión y profundización de estos drenajes sobre sus llanuras de inundación, su pendiente en planta es plana a ligeramente ondulada, mientras que en sus perfiles alcanzan pendientes muy inclinadas a abruptas.

En la plancha 136-II-C se presentan como terrazas poligénicas compuestas gravas y cantos polimícticos tal y como se observa en la **Figura 34**, con bloques de forma subangular a subredondeada, inmersos en una matriz areno-arcillosa pseudointercalados con sedimentos no consolidados de arenas y limos, también se alcanza a notar una ligera gradación lateral, principalmente en la terraza conocida como “terrazza grande”, donde los tamaños de los bloques y gravas disminuyen su dimensión a medida que se alejan del drenaje, esta terraza presenta una gran altura, superando incluso los 100 metros, lo que la hace susceptible a la meteorización, exhibiendo surcos y cárcavas. Este tipo de depósitos sólo se presentan en las márgenes del Río Servitá y la Quebrada El Salado; la terraza aluvial ubicada al este del Río Servitá, al oeste de la Cabecera Municipal de Enciso; constituye la terraza y a su vez, el depósito de mayor extensión en la plancha 136-II-C, cubriendo un área aproximada de 1,73 Km².

Figura 34. Terraza aluvial (Qt) de la Quebrada El Salado. Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Capitanejo con el Municipio de Málaga, Vereda Quebrada de Vera - Enciso. Se observa la pseudoestratificación de cantos y gravas con arenas y limos



➤ **Depósitos Coluviales (Qc).** Son depósitos acumulados que provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes por la acción de la fuerza de gravedad y el transporte por flujos de agua no canalizados. Consiste en bloques angulares matriz soportados, heterométricos, situados en terrenos con una topografía inclinada a suavemente inclinada, principalmente de rocas de la Formación Mirador, Los Cuervos y Colón-Mito Juan; estos bloques alcanzan dimensiones de hasta 2 metros de diámetro como se evidencia en la **Figura 35**. Dichos depósitos se distribuyen en la Vereda Carbonera, Carrizal, Cenacuta, Agua Sucia, El Juncal, Ínsula, Villeta y Moscua.

Figura 35. Depósito Coluvial (Qc) representativo del municipio de Enciso. Margen izquierdo del camino que comunica la Vereda Loma Del Negro con el Juncal. Se observan bloques de areniscas de gran tamaño, los cuales provienen probablemente de la Formación Mirador



➤ **Depósitos de detritos de MM (Qco).** Son depósitos acumulados en forma de cono o lóbulos de materiales compuestos aproximadamente por un 50% de roca en forma de bloques y fragmentos angulares a subangulares y un 50% de tierra o material fino meteorizado, generalmente donde la topografía presenta una

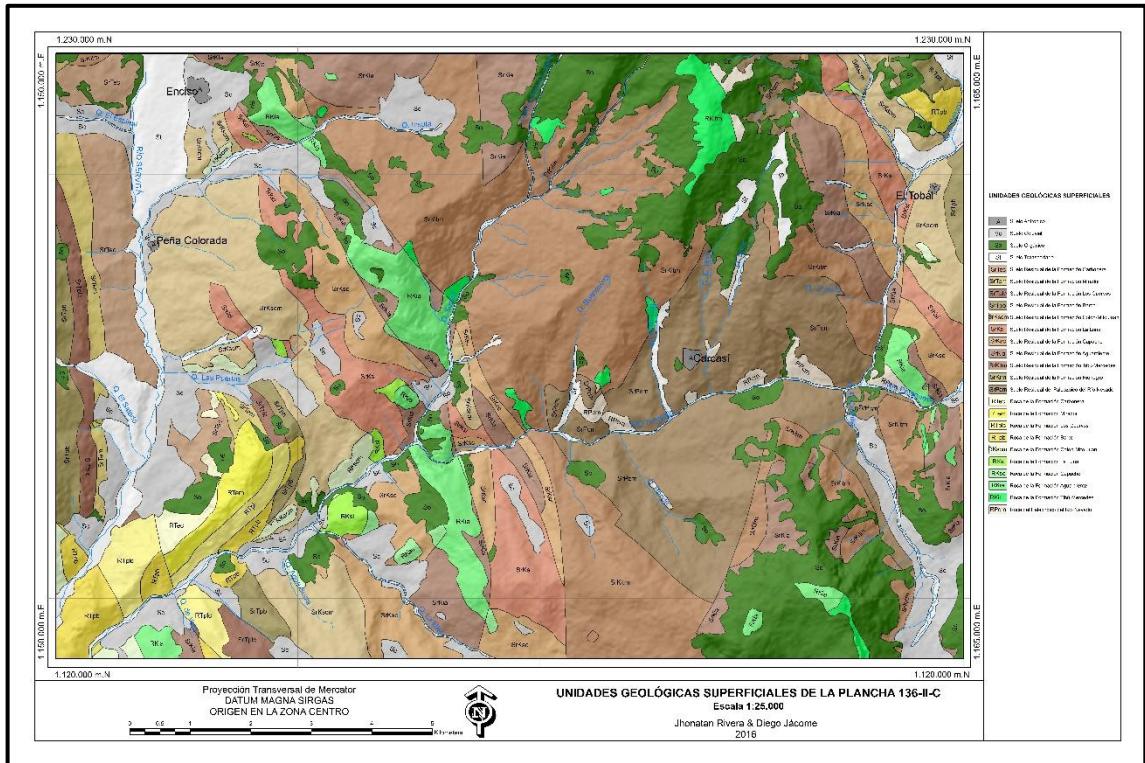
morfología alomada. Este tipo de depósito sólo se encuentra en la Vereda Loma Del Negro, asociado a flujos y deslizamientos rotacionales de las Formaciones Colón - Mito Juan y La Luna, generando un cono depósitos de arcillas gises con tonalidades oscuras sobre las inmediaciones de la Quebrada Puertas.

9.2. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

La cartografía de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) es un estudio fundamental a la hora de elaborar mapas de susceptibilidad, su cartografía permite identificar las génesis de cada una de las unidades de roca y de suelo presentes en la zona; lo que facilita una posterior calificación cualitativa de susceptibilidad. Además representa el insumo principal para estudios de Unidades Geológicas Ingenieriles (UGI), las cuales juegan un papel primordial en estudios de alto detalle, escalas 1:5000 y 1:2000, ya que permiten conocer las propiedades geotécnicas básicas de cada unidad. El estudio realizado en la plancha 136-II-C a partir de la fotointerpretación de imágenes satelitales permite identificar 25 tipos de UGS como se muestra en la **Figura 36**.

Como se puede observar en la **Figura 37**, el Suelo Residual predomina en la plancha 136-II-C, seguidos en orden descendente por Suelos Orgánicos, Rocas, Suelos Coluviales, Suelos Transportados y en menor proporción Suelos Antrópicos. Por otra parte, con el fin de tener una idea de la resistencia de las formaciones a la meteorización, se representa en la **Figura 38** los porcentajes correspondientes a la roca fresca o levemente meteorizada (Roca) y la roca con grado moderado, alto y extremo de meteorización (Suelo Residual) de cada formación. Esta relación indica que las Formaciones Paleógenas (Los Cuervos, Barco y Mirador) son las que presentan mayor resistencia a la meteorización, seguidas de la Formación Aguardiente del Cretácico Inferior. Éste alto grado de resistencia se debe básicamente a su composición litológica, principalmente de areniscas cuarzosas.

Figura 36. Mapa de UGS de la plancha 136-II-C.



9.2.1. Suelos Antrópicos (A). Los suelos antrópicos corresponden a lugares de asentamiento humano, por lo general en pendientes planas a suavemente inclinadas; en donde, de manera antrópica se han depositado materiales heterogéneos, heterométricos, de baja permeabilidad y alta compactación, proveniente de las rocas sedimentarias circundantes, especialmente arcilla, arenas, gravas y cantos; recubiertos por lo general por una capa de cemento. Estos materiales también pueden presentarse “in situ” en cuyo caso sólo se compactan y en algunas ocasiones se recubren por una capa de cemento. En la zona de estudio se presentan sobre los cascos urbanos de lo municipios de Enciso (Ver **Figura 39**) y Carcasí, y en los Corregimientos de Peña Colorada y el Tobal.

Figura 37. Área de las UGS en la plancha 136-II-C

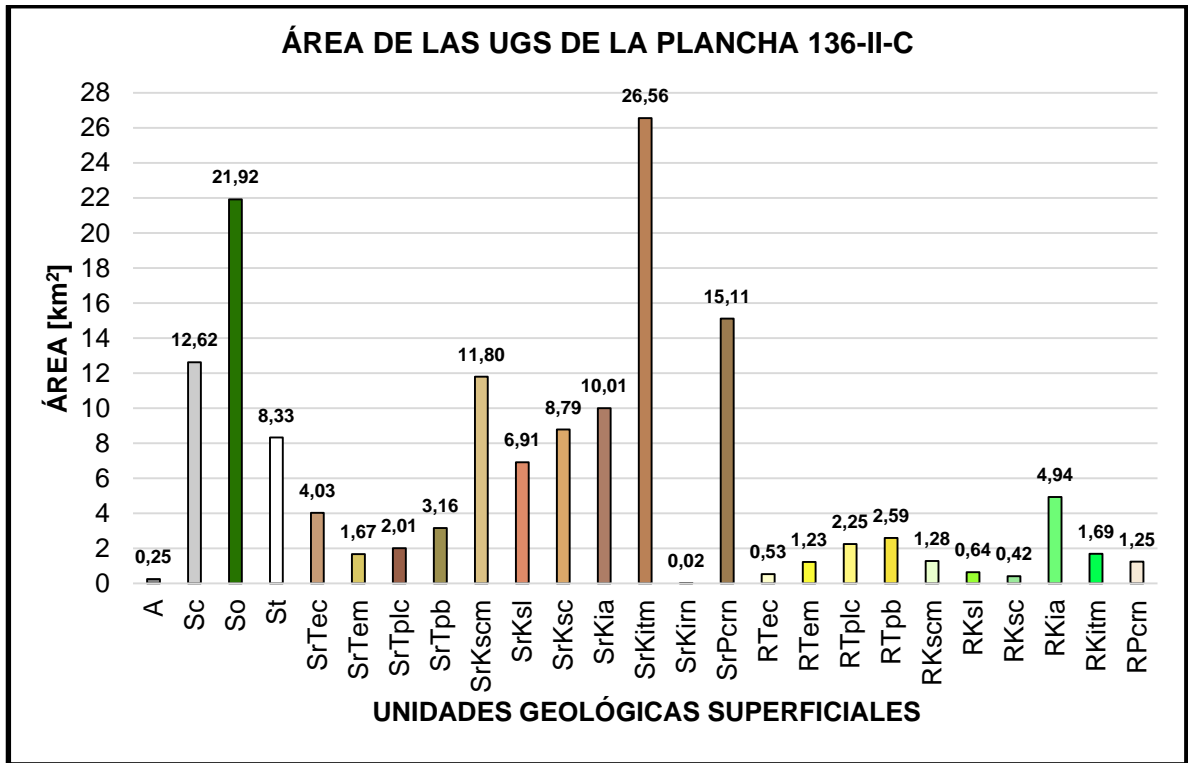


Figura 38. Relación entre el grado de meteorización bajo o nulo (color naranja) y el grado de meteorización intermedio a alto (color azul) para cada una de las formaciones de la plancha.

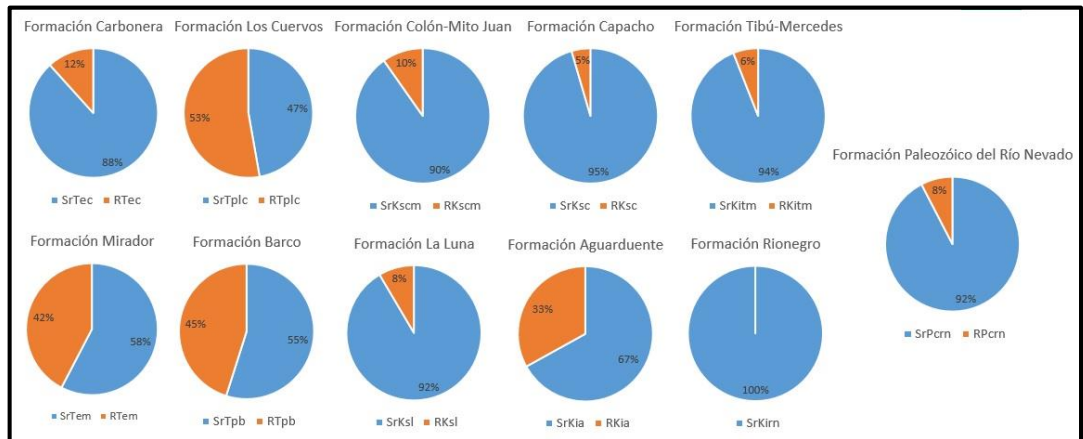


Figura 39. Suelo Antrópico (A) correspondiente al casco urbano del municipio de Enciso. Se observa el Suelo Antrópico alrededor del Suelo Coluvial de la Vereda Villetas, hacia el Oeste se presenta el Suelo Transportado (Fluvial) correspondientes a los depósitos de terraza aluvial del Río Servitá.



9.2.2. Suelos Coluviales (Sc). Materiales incoherentes, heterogéneos y heterométricos, compuestos por cantos y bloques de roca depositados por la acción de la gravedad, embebidos en una matriz de suelo arcillo-limo-arenosa, ligeramente consolidado.

Los bloques se presentan de manera desordenada dentro de la matriz de suelo y pueden alcanzar el metro de diámetro en algunos sectores. La composición de estos suelos depende de su roca fuente. En la mayoría de ocasiones desarrolla una delgada capa orgánica que permite el crecimiento de pastos y ocasionalmente rastrojos. Estos suelos suelen desarrollarse en pendientes palanas a suavemente inclinadas e inclinadas. Cabe destacar que espacialmente los Suelos Coluviales no corresponden exactamente a los Depósitos Coluviales, su principal diferencia radica en el desarrollo necesario de suelo, así como el espesor mínimo para ser cartografiable, por lo que generalmente son más extensos.

Los Suelos Coluviales se distribuyen en toda la plancha 136-II-C, ocupando mayor extensión hacia el Municipio de Enciso, principalmente en las Vereda Villeta, Robles, Ínsula y el Juncal. Los depósitos de la Vereda El Juncal están constituidos por bloques heterométricos grises, subangulares a subredondeados de composición arenosa, embebidos en una matriz de suelo arcillo-limoso.

Figura 40. Suelo Coluvial (Sc) de la Vereda Ínsula. Margen derecho de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí. Se observa la presencia de bloques heterométricos grises angulares envueltos en una matriz principalmente arcillo-limoso; estos suelos son utilizados para trabajos agrícolas.



Estos bloques que pueden llegar a alcanzar el metro de diámetro, provienen principalmente del desprendimiento de rocas de la Formación Mirador ubicada en la parte más alta de la Sierra Sinclinal de Enciso, la distancia entre estos suelos y su roca fuente, indican un transporte largo de sus bloques, lo que a su vez permite que sean subredondeados en el momento de su depositación. Los Suelos Coluviales de la Vereda Ínsula que se observan en la **Figura 40** son mucho más

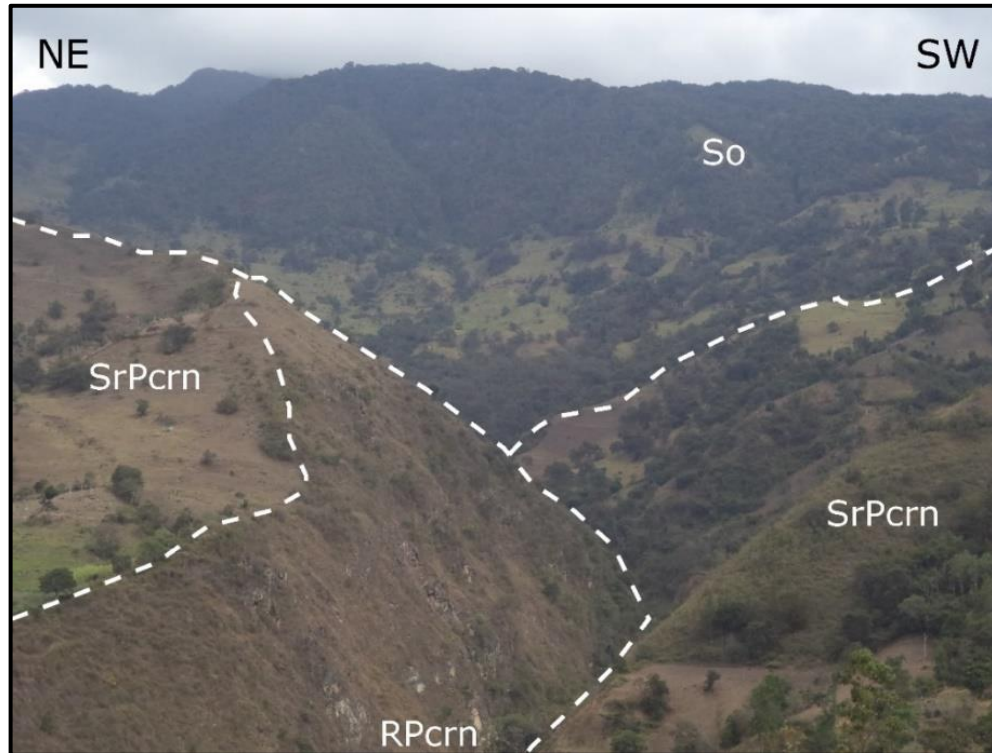
heterogéneos en su composición, conteniendo material de origen cretácico principalmente. Por su parte los suelos de la Vereda Villeta están constituidos por cantos y bloques heterométricos blancos con tonalidades amarillentas, angulares de composición arenosa, embebidos en una matriz de suelo areno-limosa de tonalidades claras. Estos bloques pueden llegar a alcanzar los 50 cm de diámetro, y debido a su composición probablemente provengan de la Formación Aguardiente.

9.2.3. Suelos Orgánicos (So). Los Suelos Orgánicos se componen de una mezcla de material orgánico y material generalmente arcilloso, producto de un alto grado de meteorización sobre la roca o depósito “in situ”. Estos suelos por lo general se presentan con espesores reducidos y se caracterizan por la abundante vegetación que crece sobre ellos; desarrollando diferentes tipos de vegetación que van desde bosques secundarios densos hasta bosques primarios. Se localizan en zonas de pendiente plana a escarpadas. La cartografía de esta unidad se realizó principalmente a partir de imágenes satelitales. Los Suelos Orgánicos se distribuyen a lo largo de toda la plancha, principalmente en las partes altas de las Sierras Norte y Sur del Municipio de Carcasí, ubicadas en las Veredas Victarigua y Montenera, y las Veredas San José y San Jacinto, tal y como se muestra en la **Figura 41**.

9.2.4. Suelos Transportados (St)

Los suelos “transportados” o suelos aluviales, corresponden a los materiales que han sido depositados por los drenajes, incluyendo los depósitos de cauce activo, llanura de inundación, terraza fluvial y conos de deyección. A manera general estos depósitos son materiales de baja compactación, heterométricos, redondeados a subredondeados y de composición heterogénea. Se disponen a lo largo de los ríos y quebradas principales de la zona de estudio, primordialmente a lo largo del Río Servitá y las Quebradas El Salado y El Bejuco (Ver **Figura 42**).

Figura 41. Suelo Orgánico (So) de la Vereda San José. Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de San Miguel con el Municipio de Carcasí, Vereda Quebrada Honda. Al fondo, se observan los Suelos Orgánicos de la Sierra Sur del Municipio de Carcasí, caracterizado por la alta densidad de vegetación; alrededor se observan Suelos Residual (SrPcrn) y Roca (RPcrn) de la Formación Paleozoico del Río Nevado.



Pueden ir desde materiales pseudoestratificados, no consolidados, compuestos por cantos y bloques rodados de pequeñas dimensiones, embebidos en una matriz de suelo areno-gravosa, localizados a una altura mayor que la del cauce actual (Depósitos de Terrazas Fluviales); hasta materiales caóticos compuestos por bloques de gran dimensión embebidos o no, en sedimentos de arenas y gravas, localizados a las márgenes de los drenajes, con desarrollo de pastos y rastrojos (Depósitos de Cauce Activo). Suelen presentar una delgada capa con una cantidad moderada de materia orgánica, la cual permite el desarrollo de pastos, rastrojos e inclusive vegetación herbácea.

Figura 42. Suelo Transportado (St) en la Quebrada Suparí. Margen derecho de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí. Se observa la presencia de bloques subredondeados, heterométricos, sueltos de color gris con tonalidades claras, depositados sobre un suelo arcillo-arenoso.



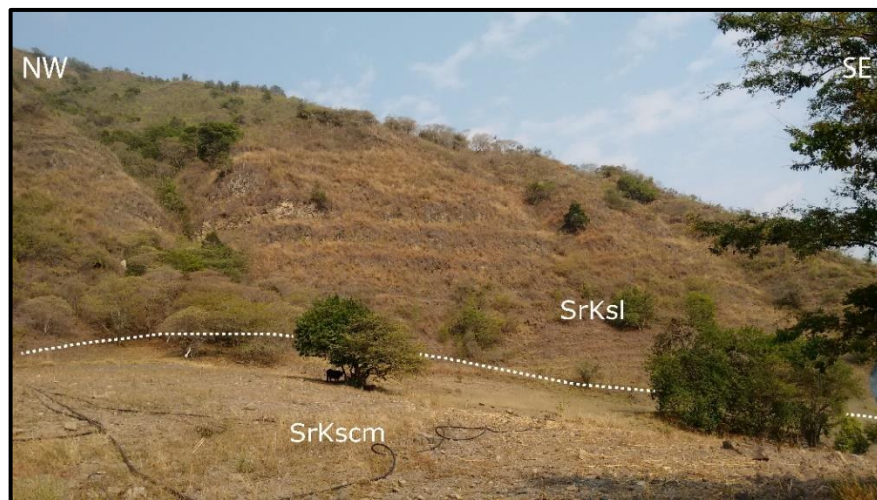
9.2.5. Suelos Residuales (Sr)

Los suelos residuales se originan cuando la velocidad de meteorización de la roca supera su velocidad de erosión; causando que los productos del proceso de meteorización no sean transportados, si no que se acumulen "in situ". La evolución "in situ" del suelo residual está caracterizada por una pérdida de resistencia y un aumento de su deformabilidad, al tiempo que sufre una variación de la granulometría debido a la descomposición de materiales inestables, lo cual implica un aumento en la porosidad, permeabilidad y con ello susceptibilidad por movimientos en masa.

Esta unidad comprende los grados IV, V y VI del perfil de meteorización de Dearman (1976). De manera general, los suelos residuales están compuestos por materiales de arena, limo y arcilla moderadamente calibrados; correspondientes a la descomposición de rocas Paleozoicas, Cretácicas y Paleógenas de la zona de estudio; estos materiales suelen presentar procesos de erosión laminar y erosión en surcos. La mayoría de los suelos contienen un horizonte de materia orgánica; el cual permite el crecimiento de pastos, rastrojos y vegetación herbácea de tamaño considerable. Suelen localizarse en pendientes suavemente inclinadas, inclinadas y escapadas asociadas principalmente a geformas denudacionales

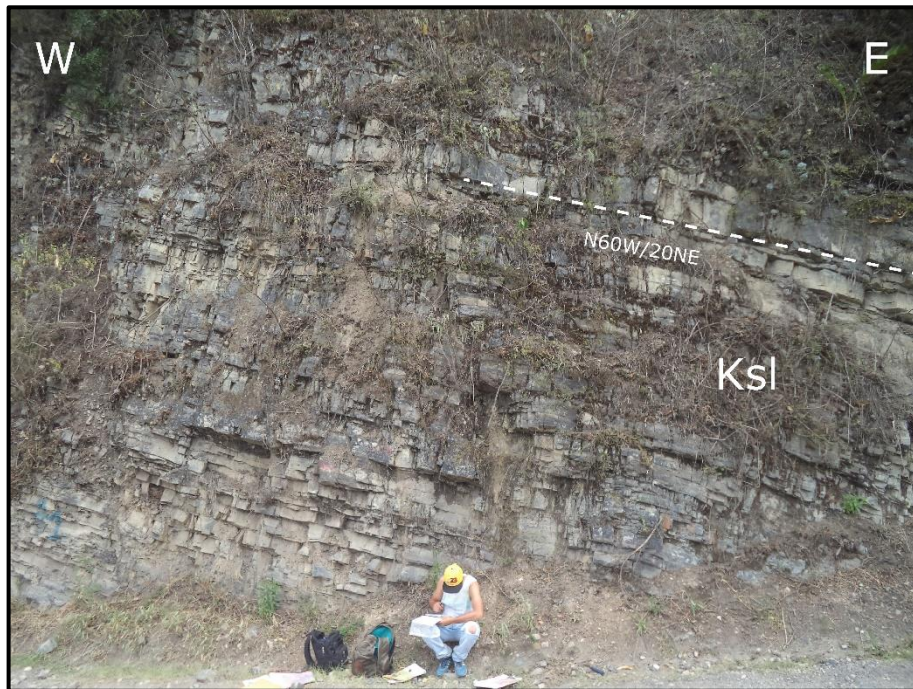
En la zona de estudio se identificaron 11 suelos residuales, los cuales variaban en su composición, morfometría, color y vegetación asociada. Estos suelos residuales se distribuyen a lo largo de toda la plancha, siendo los Suelos Residuales de las Formaciones Tibú-Mercedes, Paleozoico del Río Nevado y Colón-Mito Juan (Ver **Figura 43**) los de mayor extensión.

Figura 43. Suelos residuales de la Formación Colón - Mito Juan (SrKscm) y la Formación La Luna (SrKsl) en la vereda Loma El Negro.



9.2.6. Rocas (R). Comprende los macizos rocosos en los que el material se presenta como una roca fresca a débilmente meteorizada, es decir los grados I, II y III del perfil de meteorización de Deaman (1976), esta unidad es la menos susceptible a los procesos de movimientos en masa, sin embargo, rocas de composición arcillosa, con buzamientos altos o alta densidad de fracturamiento, suelen ser muy susceptibles a movimientos en masa, provocando caídas, flujos y deslizamientos. La unidad “Roca” (Ver **Figura 44**) se presenta en zonas de pendientes abruptas a escarpadas asociadas a un fuerte control estructural; este es el caso de las Formaciones Paleógenas de la plancha 136-II-C, las cuales hacen parte del Flanco Este del Sinclinal de Servitá; y los anticlinales de la Formación Aguardiente localizados en la Vereda Puertas y Villetas de Enciso; y Pamplonita y Arenal del Municipio de San Andrés.

Figura 44. Roca débilmente meteorizada de la Formación La Luna. Margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Enciso con el Municipio de Carcasí, 200 metros antes del puente de la Quebrada Ínsula.



9.3. GEOMORFOLOGÍA

La **Figura 45** es el mapa unidades geomorfológicas a escala 1:25.000 de la zona de estudio, elaborado a partir de la integración de las metodologías propuestas por Carvajal et al. (2012). El modelado actual del relieve de la plancha 136-II-C obedece a la acción continua de procesos estructurales, denudacionales, fluvio-lagunares y antropogénicos, los cuales dan origen a 48 unidades geomorfológicas distribuidas en 269 geoformas, como se muestra en la **Figura 46**. El área de influencia de los diferentes ambientes morfogenéticos se evidencia en la **Figura 47**, siendo el ambiente estructural el de mayor predominio en la zona de estudio. A continuación se describe cada uno de los ambientes morfogenéticos y sus unidades geomorfológicas asociadas, en base a sus rasgos morfogenéticos, morfométricos y morfodinámicos.

Figura 45. Mapa geomorfológico a escala 1:25.000 de la plancha 136-II-C.

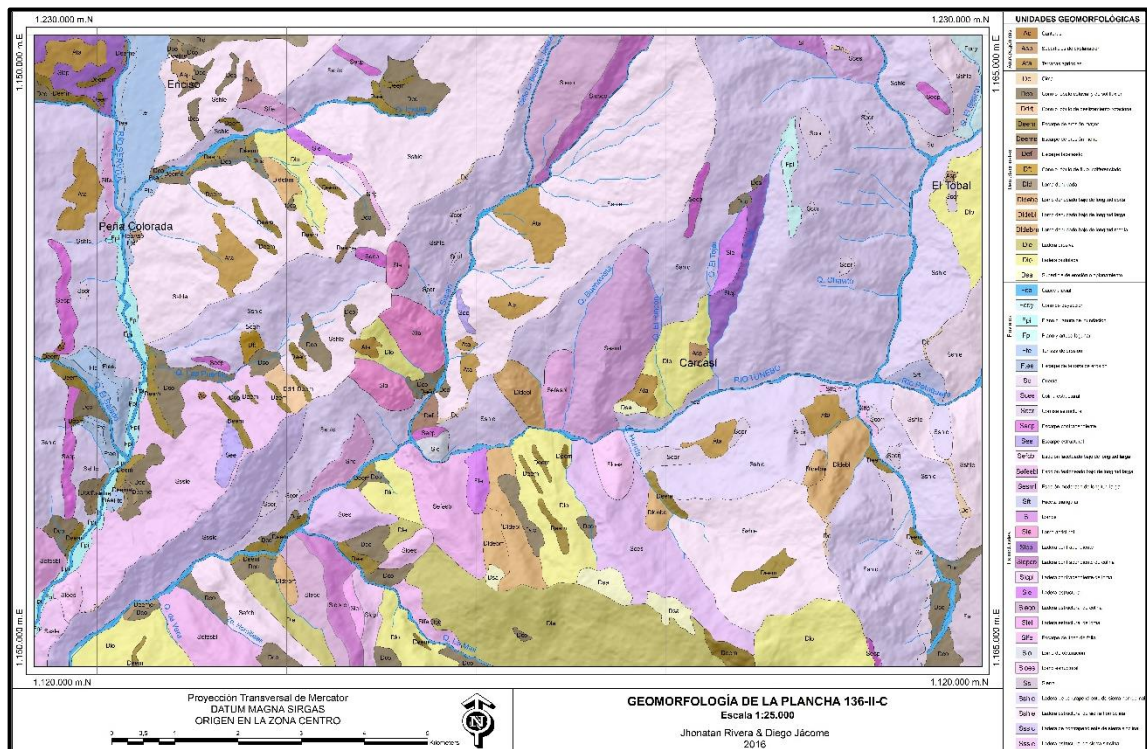


Figura 46. Número de unidades geomorfológicas y geoformas catacterizadas en la plancha 136-II-C según los ambientes morfogenéticos.

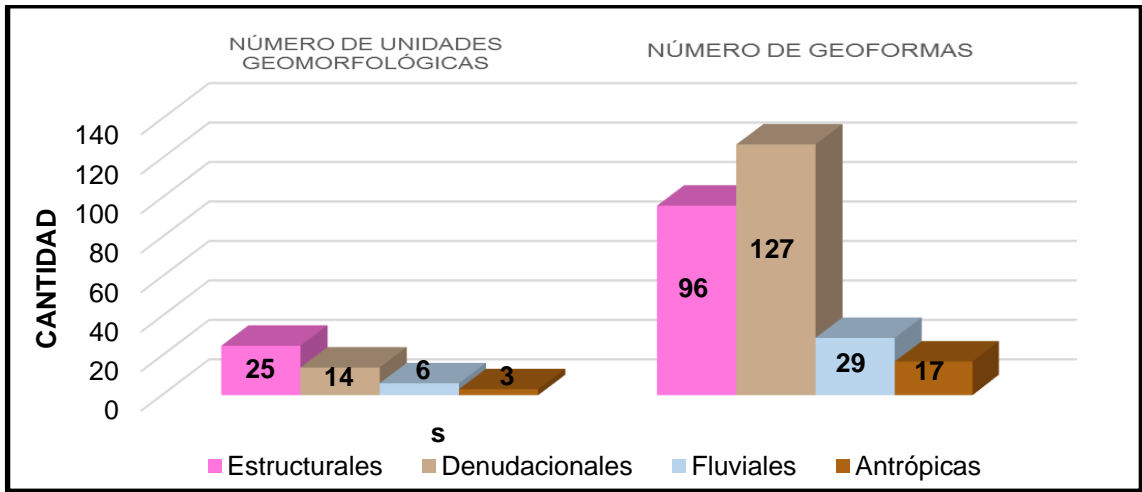
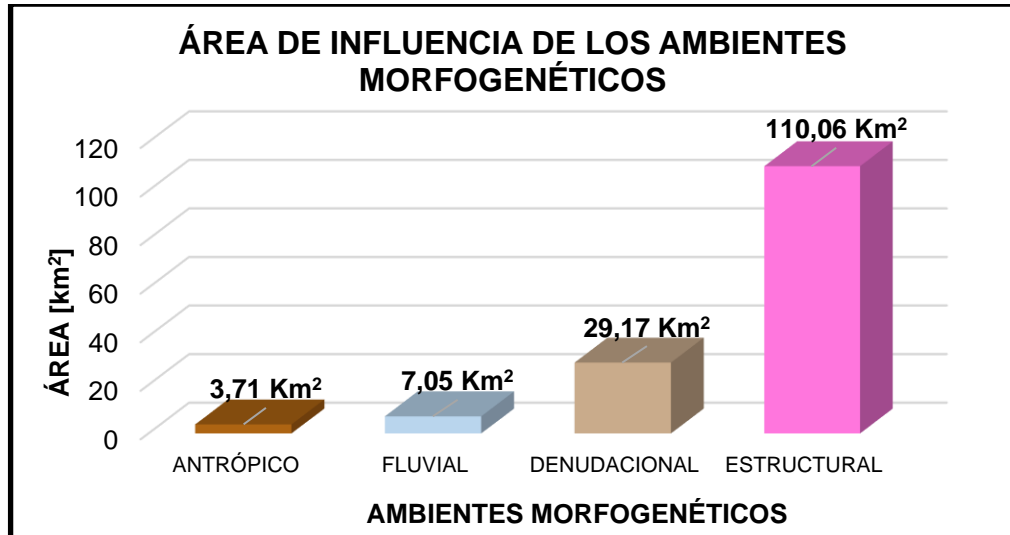


Figura 47. Área de influencia de los diferentes ambientes morfogenéticos presentes en la plancha 136-II-C.



9.3.1. Ambiente Estructural. Las geoformas estructurales son generadas por la dinámica interna de la tierra, producto de esfuerzos compresivos los cuales están asociados especialmente a fallamientos y plegamientos. Dichas geoformas predominan en la zona de estudio, cubriendo un área aproximada de 110,06 km² (73,37% del área de la plancha, producto del fuerte control estructural ejercido en gran medida por la influencia de la Falla Servitá, el Sinclinal de Servitá y en menor medida por la Falla del Río Servitá, la Falla del Río Tunebo, la Falla del Río Suparí y la Falla de la Quebrada la Honda. Se identificaron un total de 96 geoformas estructurales asociadas a 25 unidades geomorfológicas, como se muestra en la **Tabla 19.**

Tabla 19. Unidades geomorfológicas de origen estructural.

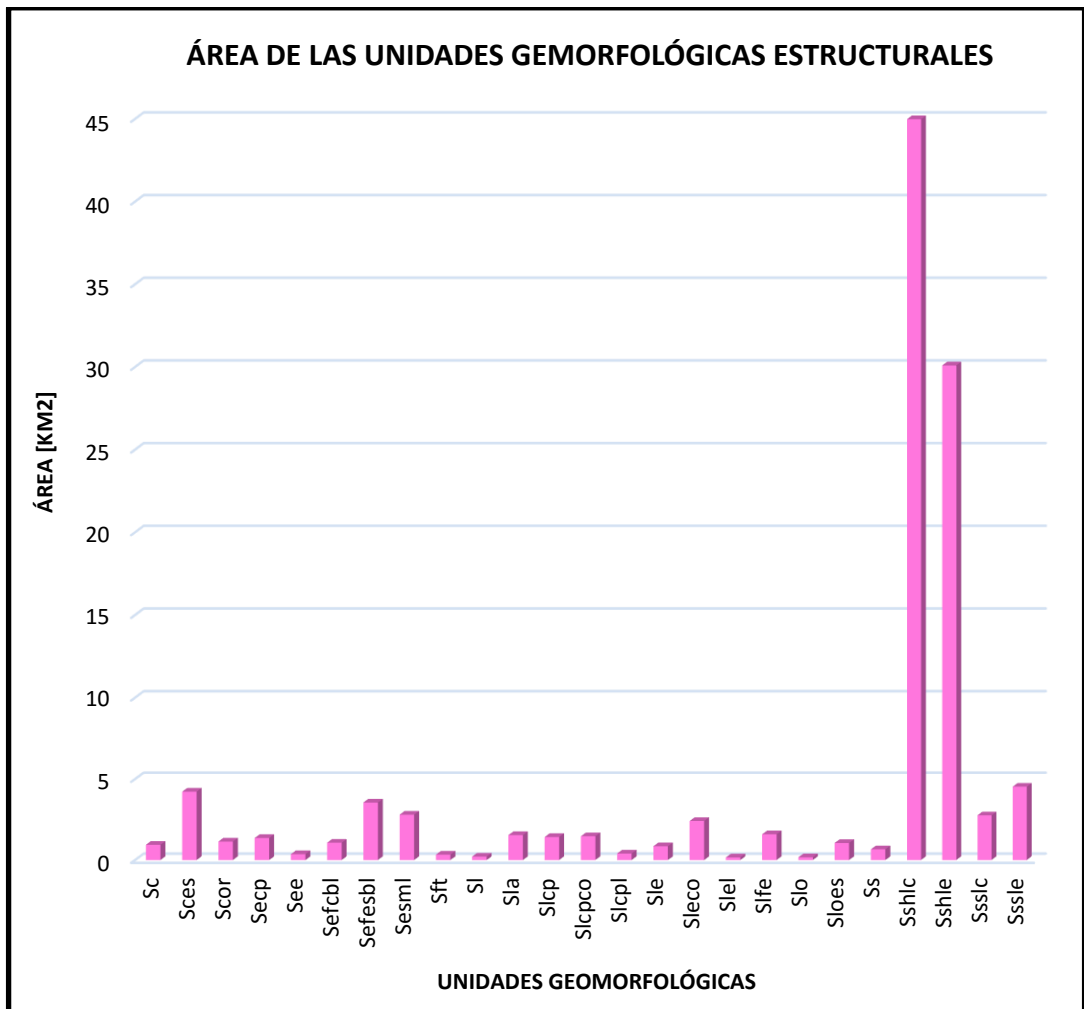
CÓDIGO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA [km ²]	FRECUENCIA RELATIVA	%	N° DE GEOFORMAS
Sc	Cuesta	0,94	0,85	0,63	2
Sces	Colina estructural	4,22	3,83	2,81	3
Scor	Cornisa estructural	1,14	1,04	0,76	17
Secp	Escarpe de contrapendiente	1,36	1,24	0,91	9
See	Escarpe estructural	0,36	0,33	0,24	2
Sefcbl	Espolón facetado bajo de longitud larga	1,07	0,97	0,71	1
Sefesbl	Espolón festoneado bajo de longitud larga	3,55	3,23	2,37	4
Sesml	Espolón moderado de longitud larga	2,8	2,54	1,87	1
Sft	Faceta triangular	0,33	0,3	0,22	1
Sl	Lomo	0,21	0,19	0,14	1
Sla	Loma anticlinal	1,54	1,40	1,03	3
Slcp	Ladera de contrapendiente	1,42	1,29	0,95	2
Slcpco	Ladera de contrapendiente de colina	1,47	1,34	0,98	2

Slcpl	Ladera de contrapendiente de loma	0,4	0,36	0,27	1
Sle	Ladera estructural	0,85	0,77	0,57	3
Sleco	Ladera estructural de colina	2,41	2,19	1,61	2
Slel	Ladera estructural de loma	0,16	0,15	0,11	1
Sife	Escarpe de línea de falla	1,59	1,44	1,06	7
Slo	Lomo de obturación	0,17	0,15	0,11	1
Sloes	Lomo estructural	1,05	0,95	0,7	3
Ss	Sierra	0,66	0,6	0,44	1
Sshlc	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	44,98	40,87	30	16
Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal	30,09	27,34	20,1	10
Ssslc	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	2,76	2,51	1,84	1
Sssle	Ladera estructural de sierra sinclinal	4,53	4,12	3,02	2
TOTAL		110,1	100	73,4	96

*La columna “%” indica el porcentaje del área de la unidad geomorfológica, con respecto al área total de la plancha 136-II-C.

La tabla anterior indica que las unidades Sshlc y Sshle son las geoformas estructurales de mayor extensión en la zona de estudio, mientras que las geoformas Slel y Slo son las de menor; esto se representa mejor en la **Figura 48**, cabe resaltar que las unidades Sshlc y Sshle son además las unidades geomorfológicas de mayor área en toda la plancha. Por otro lado, las geoformas Scor y Sshlc son las geoformas estructurales más frecuentes, mientras que nueve geoformas sólo se presentan una vez en la zona de estudio. A continuación se realiza una descripción de cada una de las unidades geomorfológicas originadas en este ambiente.

Figura 48. Área de influencia de las unidades geomorfológicas estructurales de la plancha 136-II-C.



➤ **Cuesta (Sc).** Sierra asimétrica elongada y amplia de morfología colinada a alomada definida por el basculamiento suave de las capas o estratos de unidades resistentes y blandas. Su origen se debe a la incisión o fallamiento perpendicular al buzamiento de los estratos sedimentarios suavemente plegados o basculados (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se observan 2 cuestras en el municipio de Carcasí, una se localiza al Noreste de la plancha en la vereda Babega, al Occidente de la Quebrada El Bejuco como se muestra en la **Figura 49**, con un área de 0,247 km² y dirección NW – Este. La segunda se localiza al Sureste de la plancha

en la vereda Ropejo, al Occidente y paralela a la Quebrada El Colmillo, con un área de 0,696 km² y dirección NW – SE.

Figura 49. Panorámica del sector sur de la vereda Babega en el municipio de Carcasí. Aquí vierten sus aguas la Quebrada El Bejuco y desemboca al río Tunebo alto.



Morfométricamente se observa un índice de relieve relativo bajo con un promedio de 150 metros de altura y pendientes que van desde laderas muy inclinadas a abruptas (10° - 30°), con longitudes moderadamente largas, entre 400 y 500 metros. Además presentan una rugosidad nula a baja, con una caracterización de acuenca principalmente de esorrentía lenta y en menor proporción algunos flujos acumulados, donde la curvatura es muy variada, con sectores cóncavos, planos y convexos.

Las cuestas presentan principalmente vegetación herbácea y se encuentran asociadas a suelo residual de rocas de fábrica clástica consolidada con resistencia moderadamente dura como la Formación Colón - Mito Juan (Kscm) y la Unidad Paleozoico del Río Nevado (Pcrn). No se encuentran asociadas a movimientos en

masa identificados en la fase de campo ni en la plataforma SIMMA, debido a sus bajas pendientes y rugosidad.

➤ **Colina estructural (Sces).** Prominencia topográfica con una altura entre 200 y 400 metros sobre su nivel base local, que presenta una cima aguda a redondeada, con un alto grado de disección de los drenajes y desarrollo de valles en V. Su origen está relacionado con la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y períodos de meteorización y denudación en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se identificaron 3 colinas estructurales distribuidas en diferentes sectores de la plancha las cuales cubren un área total de 4,22 km². Se observan como prominencias topográficas con una altura promedio de 300 metros sobre su nivel base local, definida morfométricamente por un índice de relieve relativo moderado, presentando una cima redondeada limitada por laderas con pendientes que van desde muy abruptas a escarpadas (> 30°), con longitudes largas a muy largas, entre 500 y 1200 metros.

Además, presenta una rugosidad que varía desde muy baja a media principalmente, y en algunos sectores presenta rugosidad alta. La acuenca está definida por su respectiva divisoria de aguas, laderas con escorrentía lenta en mayor superficie y en algunos tramos flujos acumulados. La curvatura es variable. Dichas colinas presentan principalmente vegetación herbácea y matorrales, y en menor proporción bosques. Se desarrolla sobre roca sedimentaria de fábrica cristalina masiva y resistencia dura correspondiente a la Formación La Luna (Ksl) en la vereda Arenal del municipio de San Miguel como se muestra en la **Figura 50**, y en la vereda Babega en el municipio de Carcasí, donde también en la vereda Quebrada Honda se observan sobre suelo residual de rocas de las mismas características pero correspondientes a la Formación Tibú – Mercedes (Kitm) y sobre suelo residual de rocas clásticas consolidadas de resistencia moderadamente duras como la Unidad

Paleozoico del Río Nevado (Pcrn). Morfodinámicamente no se identificaron movimientos en masa asociados.

Figura 50. Colina estructural. Localizada en la Vereda Arenal del Municipio de San Miguel.



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth, 2016.

➤ **Cornisa estructural (Scor).** Saliente estructural u hombrera rocosa, tabular de morfología alomada. Se presenta a manera de repisa en laderas de contrapendiente generalmente irregulares a escalonadas. Su origen se debe a la acción conjunta de procesos estructurales y erosión diferencial en unidades duras y blandas (Carvajal et al., 2012).

En la zona de estudio se identificaron un total de 17 cornisas estructurales, las cuales se encuentran distribuidas heterogéneamente, principalmente sobre laderas de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), en los municipios de Enciso y Carcasí, y cubren una superficie de 1,14 km², con áreas que van desde los 0,02 km²

hasta los 0,3 km², resaltando la cornisa localizada en la vereda San Jacinto en el municipio de Carcasí, siendo la de mayor tamaño con 0,307 km² y utilizada actualmente con fines agrícolas. Morfométricamente presentan un índice de relieve muy bajo, con pendientes suaves a muy inclinadas (< 20°) y longitudes variables que van desde los 200 metros hasta 1 kilómetro. Además, presentan una rugosidad muy baja a nula, con una caracterización de acuenca principalmente de escorrentía lenta y en menor proporción algunos flujos acumulados, donde la curvatura es muy variada, generalmente plana al centro y cóncava – convexa a los bordes. Asociadas litológicamente a rocas de fábrica clástica cementada y resistencia dura como la Formación Aguardiente (Kia), a rocas de textura cristalina masiva de resistencia dura como la Formación Tibú Mercedes (Kitm) y a rocas clásticas consolidadas de resistencia moderadamente dura como la Formación Colón - Mito Juan (Kscm) y la Unidad Paleozoico del Río Nevado (Pcrn). Las cornisas están cubiertas principalmente por vegetación herbácea, pastos, matorrales y cultivos (Ver **Figura 61**) y morfodinámicamente se encuentra asociado a un movimiento en masa de tipo deslizamiento rotacional en la vereda San Jacinto.

➤ **Escarpe de contrapendiente (Secp).** Superficies o planos en declive, verticales a subverticales, a lo largo de planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. En la zona de estudio se identificaron 9 escarpes de contrapendiente, los cuales se encuentran heterogéneamente distribuidos a lo largo de toda la plancha 136-II-C y cubren un área de 1,4 km², dispuestos únicamente sobre laderas en contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc).

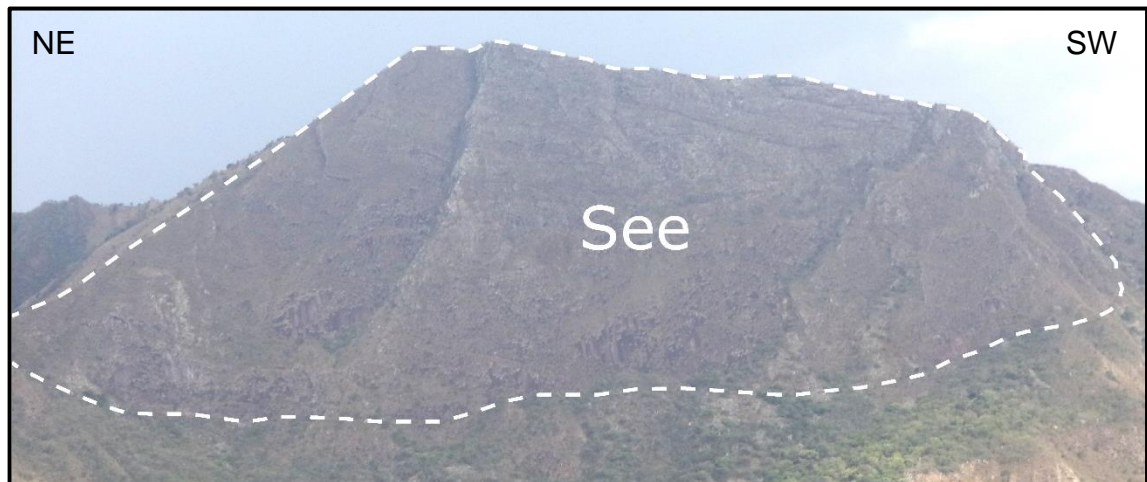
Morfométricamente presentan alturas variables, generalmente entre 100 y 200 metros de alto, eventualmente de larga longitud, entre 500 metros y 1 kilómetro, con pendientes que van desde muy abruptas a muy escarpadas (>40°). La rugosidad presente en los escarpes de San José de Miranda al Oeste de la plancha varía de

muy baja a media principalmente, al igual que al Norte de la plancha en el municipio de Enciso, mientras que, al centro y al Este del municipio de Enciso, y los escarpes en el municipio de Carcasí varían de una rugosidad media a alta, y en menor proporción a muy alta. El parámetro de acuena está definido por esorrentía lenta principalmente, y en mejor proporción flujos acumulados. La curvatura es variada, generalmente convexa a cóncava. Dichos escarpes se encuentran asociados a rocas duras en términos de resistencia, como las rocas de fábrica clástica cementada de la Formación Aguardiente (Kia), rocas texturalmente cristalinas masivas como la Formación Tibú – Mercedes (Kitm) o rocas clásticas consolidadas como la Formación Barco (Tpb) tal y como se observa en la **Figura 49** al sur de la vereda Babega en el municipio de Carcasí. Por lo general presentan ausencia de vegetación y no se encuentra asociados morfodinámicamente a movimientos en masa.

➤ **Escarpe estructural (See).** Superficies o planos en declive, verticales a subverticales, a lo largo de planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos paralelamente al sentido de la inclinación del terreno. Se identificaron 2 escarpes estructurales en la zona da estudio. El primero se localiza en la vereda El Juncal del municipio de Enciso como se observa en la **Figura 51**, sobre la ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle) del Valle del río Servitá, presentando una dirección Norte – Sur, con 0,25 km² de superficie, presentando morfométricamente 300 metros de altura y una longitud de 1 kilómetro aproximadamente, pendientes muy escarpadas, mayores a 40°, una rugosidad media a predominantemente alta, de curvatura convexa a cóncava, y una factor de acuena definido por esorrentías lentas y en menor proporción flujos acumulados. Litológicamente se encuentra asociado a rocas de textura clástica cementada, de resistencia dura, correspondiente a la Formación Mirador (Tem).

El segundo escarpe estructural (See) se observa al Este de la vereda Saucara en el municipio de Carcasí sobre una ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle), con una dirección NW – SE. Morfométricamente cubre un área de 0,09 km², con 160 metros de altura y 700 metros de longitud aproximadamente, con pendientes muy escarpadas, mayores a 40°. Presenta una rugosidad media a principalmente alta, una curvatura convexa a cóncava y una acuenca definida por escorrentía y flujos acumulados perpendiculares a la dirección de la geoforma. Se presenta sobre suelo orgánico y suelo residual de rocas cretácicas de resistencia moderadamente dura como las rocas de fábrica clástica consolidada de la Formación Capacho (Ksc) así como en rocas de resistencia dura con textura cristalina masiva como la Formación Tibú – Mercedes (Kitm). Por lo general estos escarpes presentan ausencia de vegetación y no tienen relación alguna con los movimientos en masa identificados en la zona.

Figura 51. Escarpe estructural (See) sobre la Formación Mirador (Tem). Presenta pendientes mayores a 40°, al Noreste de la vereda El Juncal en el municipio de Enciso.



- **Espolón faceteado bajo de longitud larga (Sefcbl).** Saliente natural que en conjunto conforma sierras colinadas que se desprenden de estructuras mayores las cuales corresponden a procesos de plegamiento, fallamiento y erosión diferencial

sobre rocas de distinta competencia. Es producto de fallamiento inverso y de rumbo. La particularidad de esta unidad radica en que el relieve relativo es menor de 250 metros y la longitud del eje principal del espolón es mayor que 1000 metros (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se observa como una saliente natural perpendicular al río Tunebo, localizada en la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel (Ver **Figura 62**), con dirección NW – SE.

La morfometría de la geoforma está definida por una forma predominantemente colinada, cubriendo un área de 1,1 km² con laderas de pendientes abruptas a escarpadas, mayores a 19°, un índice de relieve bajo con 160 metros de altura aproximadamente, y una longitud en su eje principal mayor a 1 kilómetro. Presenta una caracterización de acuenca definida primero por una divisoria de aguas donde la rugosidad es casi nula a baja y la curvatura es convexa, y en segundo lugar por escorrentía lenta y en menor proporción algunos flujos acumulados hacia los flancos, donde la curvatura es cóncava predominantemente y la rugosidad varía de media a alta. Se caracteriza por desarrollar procesos de erosión diferencial sobre rocas de textura clástica cementada de la Formación Barco (Tpb), de dura competencia, donde predominan areniscas cuarzosas blancas de grano medio. Presenta vegetación herbácea principalmente y en menor proporción matorrales. No se encuentra asociado a movimientos en masa.

➤ **Espolón festoneado bajo de longitud larga (Sefesbl).** Laderas y crestas simétricas de morfología alomada, con cimas agudas dispuestas perpendicularmente al rumbo de las estructuras geológicas y que definen salientes cortas y largas, sobre rocas de distinto origen. La particularidad de esta unidad radica en que el relieve relativo es menor que 250 metros y la longitud del eje principal del espolón es mayor que 1 kilómetro (Carvajal et al., 2012). Se identificaron 4 espolones festoneados bajos de longitud larga, 3 de ellos perpendiculares al río Tunebo y otro al río Servitá, cubriendo en total un área de 3,5

km². Su morfometría se caracteriza por presentar pendientes que varían entre abruptas a muy escarpadas, mayores a 19°, un índice de relieve relativo bajo menor a 250 metros de altura y longitudes largas en su eje principal mayor a 1 kilómetro. Presenta una caracterización de acuenca definida por una divisoria de aguas donde la rugosidad es casi nula a baja y la curvatura es convexa, además de una escorrentía lenta y en menor proporción algunos flujos acumulados hacia los flancos, donde la curvatura es cóncava predominantemente y la rugosidad varía de media a alta. En la vereda Saucara en el municipio de Carcasí, se observa una estructura de este tipo con dirección Norte – Sur, paralela a la Quebrada Buenavista, y se desarrolla sobre suelo residual de rocas de textura cristalina masiva de resistencia dura de la Formación Tibú – Mercedes (Kitm) y suelo residual de rocas con fábrica clástica consolidada y resistencia moderadamente dura como las de la unidad del Paleozoico del Río Nevado (Pcrn). En la vereda Carbonera del municipio de San José de Miranda se desarrolla sobre de textura clástica consolidada y resistencia moderadamente dura, correspondientes a la Formación Colón - Mito Juan, la cual está suprayaciendo a rocas de textura clástica cementada, de resistencia dura, de la Formación Barco (Tpb) (Ver **Figura 52**). En la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel esta unidad se encuentra asociada morfodinámicamente a caídas de roca (Cr) y a un deslizamiento traslacional planar (Dtp), sobre rocas clásticas consolidadas de la Formación Los Cuervos (Tplc).

➤ **Espolón moderado de longitud larga (Sesml).** Saliente de morfología alomada localizada entre la vereda Saucara y la vereda Buenavista del municipio de Carcasí como se observa en la **Figura 75** dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región y al río Tunebo, con dirección Norte – Sur, levemente inclinado hacia el Este Generalmente se encuentra limitado por drenajes paralelos a subparalelos. La particularidad de esta unidad radica en que el índice relativo está entre 250 y 1000 metros y la longitud del eje principal del espolón es mayor que 1 kilómetro según Carvajal et al., 2012.

Figura 52. Espolón festoneado bajo de longitud larga (Sefesbl). Localizado en la vereda Carbonera sobre roca de la Formación Colón – Mito Juan (Kscm) y la Formación Barco (Tpb) al margen izquierdo de la vía que comunica el Municipio de Capitanejo con San José de Miranda, kilómetro 14+750, dispuesto perpendicularmente al río Servitá.



Morfométricamente cubre un área de 2,8 km², con una longitud de 400 metros en su ladera más corta, y mayor a 1 kilómetro en la ladera más larga, con pendientes abruptas a escarpadas (>19°), que se ven reducidas por intensos procesos denudativos, presentando un índice de relieve bajo menor a 250 metros y con una longitud en su eje principal un poco mayor a 3 kilómetros. Presenta rugosidad casi nula a baja en su flanco izquierdo, y media a alta en su flanco derecho, el factor acuenca está definido por una clara divisoria de aguas, escorrentías lentas y flujos acumulados al borde de los flancos, así como una curvatura convexa desde el parte aguas a cóncava hacia los flancos.

Se desarrolla sobre rocas sedimentarias cretácicas correspondientes a la Unidad Paleozoica del río Nevado (Pcn) caracterizada por limolitas grises bandeadas y

rojizas, de textura clástica consolidada y resistencia moderadamente dura, y a la Formación Tibú - Mercedes (Kitm), donde predominan calizas grises oscuras, compactas y fosilíferas, de textura cristalina masiva y resistencia dura. Presenta cobertura de pastos principalmente, y en menor proporción vegetación herbácea y matorrales. Se encuentra morfodinámicamente asociado a un deslizamiento traslacional planar (Dtp).

➤ **Faceta triangular (Sft).** Plano vertical a subvertical abrupto, recto con una geometría en planta triangular a trapezoidal (base amplia y techo angosto). Su origen se relaciona al truncamiento y desplazamiento de relieves estructurales o de interfluvios, por procesos de fallamiento y posterior erosión diferencial (Carvajal et al., 2012). Se identificó una sola faceta triangular localizada en la vereda Sirguaza del municipio de Carcasí, exactamente en la unión de las aguas del río Petaquera con el río Tunebo.

Su morfometría está definida por un área de 0,33 km², con pendientes abruptas a escarpadas, mayores a 19°, presentando un índice de relieve moderado con una altura de 400 metros y una longitud cercana a los 800 metros. Presentan una rugosidad predominantemente media a alta, con una caracterización de acuenca relacionada a esorrentía lenta y a flujos acumulados en inclinaciones de máxima pendiente, donde la curvatura varía de convexa a cóncava.

Litológicamente se encuentra sobre rocas sedimentarias cretácicas correspondientes a la Unidad Paleozoica del río Nevado (Pcrn), caracterizada por limolitas grises bandeadas y rojizas, de textura clástica consolidada y resistencia moderadamente dura y Formación Aguardiente (Kia), donde predominan areniscas blancas cuarcíticas, compactas, de grano fino a grueso, con textura clástica cementada y resistencia dura. No presenta vegetación ni movimientos en masa asociados.

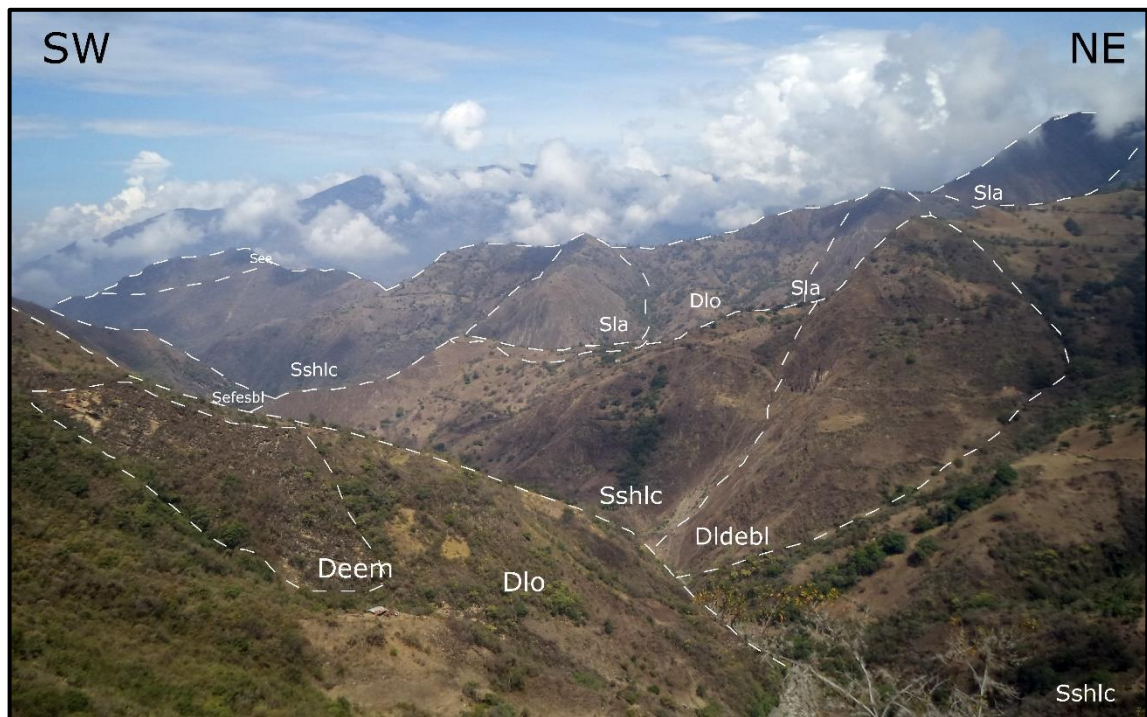
➤ **Lomos (SI).** Prominencias topográficas cuyo origen está relacionado con la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Se caracteriza por ser un sistema con cimas alargadas, de topes agudos a redondeados que siguen la tendencia estructural regional (Carvajal et al., 2012).

La única unidad de este tipo que fue identificada, se encuentra localizada al Norte de la plancha 136-II-C, exactamente en la vereda Victarigua del municipio de Carcasí. Morfométricamente cubre una extensión de 0,21 km² y se caracteriza por ser un sistema con índice de relieve bajo, laderas cortas a moderadamente largas, de forma cóncava a rectas y pendientes inclinadas a abruptas. Presenta una rugosidad baja a casi nula, un factor de acuenca determinado principalmente por escorrentía lenta y quebradas en menor proporción, con una curvatura que varía de cóncavo a convexo.

Litológicamente se encuentra asociada a rocas sedimentarias cretácicas correspondientes a la Unidad Paleozoica del Río Nevado (Pcrn) y a la Formación Capacho (Ksc), de textura clástica consolidada y resistencia moderadamente dura. Presenta vegetación tipo bosque, herbácea y en menor proporción pastos y matorrales. No se identifican movimientos en masa asociados.

➤ **Loma anticlinal (Sla).** Se identificaron 3 prominencias topográficas con estructura anticlinal como se observa en la parte superior de la **Figura 53**, con dirección preferencial NW – SE sobre las veredas de Puertas, Carrizal y Robles correspondientes al municipio de Enciso, cada una de ellas con su respectiva estructura.

Figura 53. Panorámica del Valle del río Tunebo, donde se observan procesos denudacionales sobre una Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc).



Morfométricamente cubren un área de 1,5 km², con una altura promedio de 200 metros sobre su nivel base local, morfología alomada y elongada, con laderas cortas a muy cortas, de forma convexa y pendientes muy abruptas a escarpadas debido principalmente por tectonismo y la acción de esfuerzos compresivos, así como la acción de procesos de erosión y meteorización que modelan la estructura original. Presenta rugosidad casi nula a baja en su flanco izquierdo, y media a alta en su flanco derecho, el factor acuenca está definido por una clara divisoria de aguas, escorrentías lentas y flujos acumulados al borde de los flancos, así como una curvatura convexa desde el parte aguas a cóncava hacia los flancos.

Litológicamente se encuentran principalmente asociadas a rocas clásticas cementadas, de resistencia dura, correspondientes a la Formación Aguardiente (Kia), donde predominan areniscas cuarcíticas, compactas, de grano fino a grueso,

y se caracterizan por presentar ausencia de vegetación. No se identifican movimientos en masa asociados.

➤ **Ladera de contrapendiente (Slcp).** Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. En la zona de estudio se identificaron 2 laderas de contrapendiente (Slcp) las cuales cubren un área de 1,4 km², una de ellas se identifica en el municipio de Málaga, en la esquina superior izquierda, al Noroccidente de la zona de estudio, con un índice de relieve alto y pendientes inclinadas a muy abruptas, con una longitud de ladera muy larga, unos 1200 metros aproximadamente, la cual se encuentra asociada litológicamente a rocas de resistencia moderadamente dura y textura clástica consolidada de la Formación Carbonera (Tec).

La otra ladera se localiza al Noreste de las inmediaciones del casco urbano del municipio de Carcasí, sobre rocas de la Unidad Paleozoico del Río Nevado (Pcrn), de textura clástica consolidada y resistencia moderadamente dura, presentando un índice de relieve bajo con una altura de 100 metros aproximadamente, y laderas cortas de 200 metros de largo, con pendientes abruptas a escarpadas. Las laderas presentan rugosidades casi nulas a najas, con un factor de acuenca caracterizado por una escorrentía lenta, y curvaturas variadas, cóncavas, planas y convexas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros) y no se encuentra asociada a algún tipo de movimiento en masa.

➤ **Ladera de contrapendiente de colina (Slcpco).** Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del

terreno. Se identificaron 2 superficies definidas por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, producto de la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación, localizadas al Norte de la zona de estudio en la vereda Robles del municipio de Enciso con dirección NE – SW y al sur de la plancha en la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel (Ver **Figura 54**), con dirección NW – SE.

Figura 54. Panorámica de la vereda Cenacuta donde circula la Quebrada La Miel que desemboca en el río Tunebo.



Morfométricamente cubren un área de 1,47 km² aproximadamente. Se caracterizan por presentar laderas con longitudes cortas a moderadamente largas, de forma convexa y pendientes muy inclinadas a escarpadas, con una altura entre 200 y 400 metros sobre su nivel base local. Presenta rugosidad baja a media, con factor de acuenca definido por escorrentía lenta con algunos flujos acumulados, y curvaturas que varían desde convexas, planas a cóncavas.

En la vereda de Robles se desarrolla en suelo orgánico y suelo residual de rocas de la Formación Tibú - Mercedes (Kitm), de textura cristalina masiva de resistencia dura. En Cenacuta en rocas clásticas consolidadas de resistencia moderadamente dura correspondientes a la Formación Capacho (Ksc) y la Formación Colón – Mito Juan (Kscm). Presenta vegetación herbácea, pastos y matorrales. No presentan movimientos en masa asociados.

➤ **Ladera de contrapendiente de loma (Slcpl).** Superficie vertical a subvertical, con dirección Norte – Sur, definida por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, tal y como se muestra en la **Figura 54**. Se encuentra localizada en la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel, limitada en su margen Este por la Quebrada La Miel y generada por la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación en rocas clásticas consolidadas de resistencia moderadamente dura de la Formación Capacho (Ksc).

Se desarrolla como una prominencia topográfica de morfología alomada y elongada que cubre un área de 0,4 km², presentando un índice de relieve bajo con una altura de 120 metros aproximadamente, presentando una longitud de la ladera moderadamente larga con 300 metros de largo aproximadamente, con forma convexa y pendientes inclinadas a muy abruptas. Presenta rugosidades medias a altas hacia el parte aguas, y bajas a nulas al pie de la ladera. La curvatura varía de convexa, cóncava a plana. La acuenca está definida por escorrentía lenta y flujos acumulados en la dirección preferencial de la geoforma. No presenta movimientos en masa asociados.

➤ **Ladera estructural (Sle).** Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. En la zona de estudio se

identificaron 3 laderas estructurales (Sle) las cuales cubren un área de 0,85 km², una de ellas es el par de la ladera en contrapendiente localizada al Noreste de las inmediaciones del casco urbano del municipio de Carcasí, sobre rocas de la Unidad Paleozoico del río Nevado (Pcrn), con dirección preferencial NE – SW, presentando un índice de relieve bajo con una altura de 100 metros aproximadamente, y longitud de la ladera moderadamente larga con 350 metros, con pendientes abruptas a escarpadas.

La segunda ladera se sitúa en la vereda de Robles en el municipio de Enciso sobre rocas clásticas cementadas de la Formación Aguardiente (Kia), y presenta una dirección preferencial NW – SE, morfométricamente presenta también un índice de relieve relativo bajo con una altura de 100 metros aproximadamente, pero la longitud de la ladera es corta, con 170 metros de largo.

La tercera ladera estructural se localiza en la vereda Pamplonita en el municipio de San Miguel, con una dirección preferencial Norte – Sur, perpendicular al río Tunebo. Se encuentra asociada a rocas consolidadas de la Formación Capacho (Ksc), y morfométricamente presenta un índice de relieve bajo con 80 metros de altura, y una longitud de ladera corta con 200 metros de largo aproximadamente. Las laderas presentan rugosidad nula a baja en Carcasí y San Miguel, y media alta en Enciso, con escorrentía lenta para el factor acuenca y curvatura variable, desde cóncava, convexa a recta. En esta geofomas los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros) ni presentan ocurrencia de movimiento en masa asociados.

➤ **Ladera estructural de colina (Sleco).** Se identificaron 2 superficies subverticales, definidas por estratos inclinados a favor de la pendiente del terreno, localizadas al Norte de la zona de estudio en la vereda Montonera del municipio de Carcasí en

rocas de la Formación Tibú - Mercedes (Kitm) con dirección NE – SW y al sur en la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel en rocas clásticas consolidadas, correspondientes a la Formación Capacho (Ksc) y la Formación Colón – Mito Juan (Kscm) con dirección NW – SE (Ver **Figura 66**), siendo el par de las laderas de contrapendiente de colina (Sleco) anteriormente descritas, que de igual forma son el producto de la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación.

Morfométricamente cubren un área de 2,4 km² y cuentan con el mismo índice de relieve relativo, con una altura entre 200 y 400 metros sobre su nivel base local, pero se diferencian en la longitud de la ladera, ya que las laderas estructurales presentan longitudes largas aproximadamente de 1 kilómetro, en comparación con las laderas cortas en contrapendiente. Éstas laderas evidentemente más largas presentan pendientes que varían desde inclinadas a abruptas (11° a 40°). Generalmente presentan vegetación herbácea, pastos y matorrales. No presentan movimientos en masa asociados.

➤ **Ladera estructural de loma (Slel).** Superficie vertical a subvertical, con dirección Norte – Sur, definida por estratos dispuestos a favor de la pendiente del terreno, localizada en la vereda Cenacuta del municipio de San Miguel, producto de la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación en rocas clásticas consolidadas de la Formación Capacho (Ksc). Se desarrolla como una prominencia topográfica de morfología alomada y elongada que cubre un área de 0,16 km², presentando un índice de relieve bajo, con una altura entre 50 y 200 metros, de morfometría corta a muy corta, con forma convexa y pendientes inclinadas a muy abruptas. No presenta movimientos en masa asociados.

➤ **Escarpe de línea de falla (Slfe).** Plano vertical a subvertical corto a muy corto, cóncavo a convexo de pendiente abrupta. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se presentan como planos verticales a subverticales, elongados, de longitudes y alturas variables, con pendientes escarpadas mayores a 40°, distribuidos en diferentes sectores de la plancha, cubriendo un área de 1,6 km², en rocas sedimentarias de competencia dura como la Formación Aguardiente, tal y como se muestra en la **Figura 55**. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada y el fuerte control estructural por fallamiento.

Lomo de obturación (Slo). Prominencia topográfica de morfología alomada que ha sido desplazada lateralmente por fallamiento de rumbo y ocasiona un bloqueo parcial o total de una corriente de agua (Carvajal et al., 2012), ocasionando que cambie en la zona de estudio la dirección de flujo del río Tunebo y la Quebrada Suparí bruscamente. La geoforma se localiza en la vereda Saucara del municipio de Carcasí como se observa en la **Figura 56**, donde confluyen las aguas del río Tunebo bajo y la Quebrada Suparí, con un área de 0,17 km², con pendientes abruptas a escarpadas, con un índice de relieve bajo con 200 metros de altura, con una longitud de 500 metros. Presenta rugosidad baja a media principalmente, y en menor proporción alta. El factor acuena está definido por escorrentía lenta, limitada al este por una zona donde predominan los flujos acumulados. Se desarrolla sobre suelo orgánico y roca de textura clástica cementada con resistencia dura correspondiente a la Formación Aguardiente (Kia), donde predominan areniscas cuarcíticas. Presenta vegetación tipo bosque en un sector y en otros sectores prima su ausencia, por lo general en las zonas de máxima pendiente. No se encontró asociación a ningún movimiento en masa.

Figura 55. Escarpe de línea de falla (Slfe) sobre la Formación Aguardiente (Kia) en la vereda Robles del municipio de Enciso. Las líneas punteadas de color rojo permiten observar el trazo de la falla Robles con dirección NW – SE y la falla Quebrada Ínsula con dirección NE – SW; las cuales ejercen un fuerte control estructural sobre las geoformas.



Figura 56. Lomo de obturación (Slo). Localizado en la Vereda Arenal del Municipio de San Miguel.



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth, 2016.

➤ **Lomo estructural (Sloes).** Prominencia topográfica de morfología alomada, con laderas cortas, de forma convexa y pendiente abrupta a escarpada. Se identificaron 3 lomos estructurales (Sloes) en la zona de estudio, en rocas de competencia moderadamente dura a dura, que van desde rocas clásticas consolidadas como la Unidad Paleozoica del río Nevado (Pcrn) y la Formación Capacho (Ksc) en el municipio de San Miguel a rocas clásticas cementadas como la Formación Barco (Tpb) en la vereda Quebrada de Vera en el municipio de Enciso, tal y como se muestra en la **Figura 57**.

Figura 57. Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle) sobre la Formación Los Cuervos (Tpic) y Lomo estructural (Sloes) sobre la Formación Barco (Tpb). Al margen izquierdo de la vía Málaga – Capitanejo en la vereda Quebrada de Vera, municipio de Enciso, Santander.



Morfométricamente cubren un área de 1,05 km² aproximadamente y presentan un índice de relieve bajo, entre 100 y 200 metros de altura. Su origen está relacionado

con la acción conjunta de procesos tectónicos como fallamientos moderados. No presentan movimientos en masa asociados.

➤ **Sierra (Ss).** Prominencia topográfica de morfología montañosa, localizada en la esquina inferior derecha de la plancha 136-II-C, al Sureste de la zona de estudio, exactamente en la vereda El Ropejo del municipio de Carcasí, dispuesta paralelamente a la Quebrada El Colmillo, la cual tiene una superficie de 0,66 km², con un índice de relieve relativo mayor a 400 metros de alto, de laderas largas a extremadamente largas, de 500 a 1500 metros, cóncavas, convexas y rectas, con pendientes muy inclinadas a escarpadas.

Su origen está relacionado con procesos de fallamiento intenso en rocas duras como clásticas cementadas de la Formación Aguardiente (Kia). Presenta vegetación tipo bosque principalmente y en menor proporción pastos. En esta geoforma la ausencia de datos estructurales no permite establecer una asociación con alguna estructura (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros). No presenta movimientos en masa asociados.

➤ **Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc).** Superficie vertical a subvertical moderada a larga, de forma cóncava, escalonada, festoneada a irregular, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, relacionada a una estructura homoclinal (Carvajal et al., 2012).

En la zona de estudio se caracterizaron superficies verticales a subverticales, largas a muy largas, de forma cóncava, escalonada, festoneada a irregular, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, relacionada a una estructura homoclinal (Ver **Figura 49**). Se

identificaron un total de 16 laderas de éste tipo en la zona de estudio, siendo la geoforma con mayor cobertura en la plancha 136-II-C, ocupando una superficie de 45 km² aproximadamente, modelando regionalmente el sistema montañoso dispuesto con una dirección preferencial NE - SW.

Morfométricamente presentan un índice de relieve muy alto, con alturas desde los 500 metros hasta los 1500 metros sobre su nivel base local, con laderas que van desde los 600 metros hasta los 4 kilómetros. Litológicamente se encuentran asociadas a todas las litologías presentes, correspondientes a rocas sedimentarias cretácicas, terciarias y cuaternarias aflorantes en el área de trabajo. Se encuentra asociado a varios eventos morfodinámicos, como deslizamientos traslacionales (Dt), traslacionales planares (Dtp), traslacionales en cuña (Dtc) y rotacionales (Dr), así como Flujos de lodo (Fl), tierra (Ft) y detritos (Fd).

➤ **Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle).** Superficie definida por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente, de longitud corta a moderada larga, formas rectas a convexas y pendientes escarpadas a muy escarpadas, relacionada a una estructura homoclinal (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se presentan como superficies definidas por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente, de longitud larga a muy larga, de formas rectas a convexas y pendientes escarpadas a muy escarpadas, relacionada a una estructura homoclinal como se observa en la **Figura 49**.

Se identificaron un total de 10 laderas de éste tipo en la zona de estudio, siendo la segunda geoforma con mayor cobertura en la plancha 136-II-C, ocupando una superficie de 31 km² aproximadamente, modelando regionalmente el sistema montañoso dispuesto con una dirección preferencial NE - SW. Morfométricamente presentan un índice de relieve muy alto, con alturas desde los 500 metros hasta los 1500 metros sobre su nivel base local, con laderas que van desde los 500 metros

hasta los 2 kilómetros. Litológicamente se encuentran asociadas a todas las litologías presentes, correspondientes a rocas sedimentarias cretácicas, terciarias y cuaternarias aflorantes en el área de trabajo. Se encuentra asociado a varios eventos morfológicos, como deslizamientos traslacionales (Dt) principalmente, y rotacionales (Dr) en menor proporción.

➤ **Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).** Superficie vertical a subvertical corta a moderadamente larga, de forma convexa a irregular escalonada, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, relacionada al flanco de una estructura sinclinal (SGC, 2012).

En la plancha se presenta como una superficie vertical a subvertical, con un área de 2,76 km², moderadamente larga con una longitud de 750 metros y una altura de 600 metros aproximadamente, con dirección NE – SW, de forma convexa a irregular escalonada, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, relacionada al flanco occidental del sinclinal del valle del río Servitá, localizada sobre la vereda Agua Sucia del municipio de Enciso, sobre rocas de edad Paleógena, como la Formación Mirador (Tem), Formación Los Cuervos (Tplc) y Formación Barco (Tpb). No se encuentra asociada a movimientos en masa, con escasa vegetación, de tipo herbácea y matorrales.

➤ **Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle).** Superficie vertical a subvertical, definida por estratos inclinados a favor de la pendiente del terreno, relacionada al flanco occidental del sinclinal del valle del río Servitá, localizada sobre la vereda El Juncal del municipio de Enciso, evidenciada en el tramo final que comunica el municipio de San José de Miranda con el municipio de Capitanejo, al Suroccidente de la plancha 136-II-C como se observa en la **Figura 57**.

Morfométricamente presente un área de 4,53 km², de longitud muy larga de 1,6 kilómetros y una altura de 600 metros aproximadamente, evidenciando un índice de relieve alto, con 700 metros de altura aproximadamente, con dirección NE – SW, de forma convexa a recta, con pendientes inclinadas a escarpadas. El factor de acuenca está definido por una escorrentía lenta a lo largo de toda la ladera, además de una gran cantidad de flujos acumulados los cuales están dispuestos perpendicularmente a la dirección preferencial de la ladera. La rugosidad está dada entre media y alta cerca al parte aguas, y baja a casi nula al pie de la ladera. La curvatura varía de convexa, cóncava a plana a favor de la pendiente.

Se desarrolla sobre rocas sedimentarias de edad Terciaria, como la Formación Mirador (Tem), Formación Los Cuervos (Tplc), Formación Carbonera (Tec) y Formación Barco (Tpb). Se encuentra asociada morfodinámicamente a deslizamientos de tipo traslacional planar, traslacional y rotacional, con escasa vegetación, de tipo herbácea y matorrales.

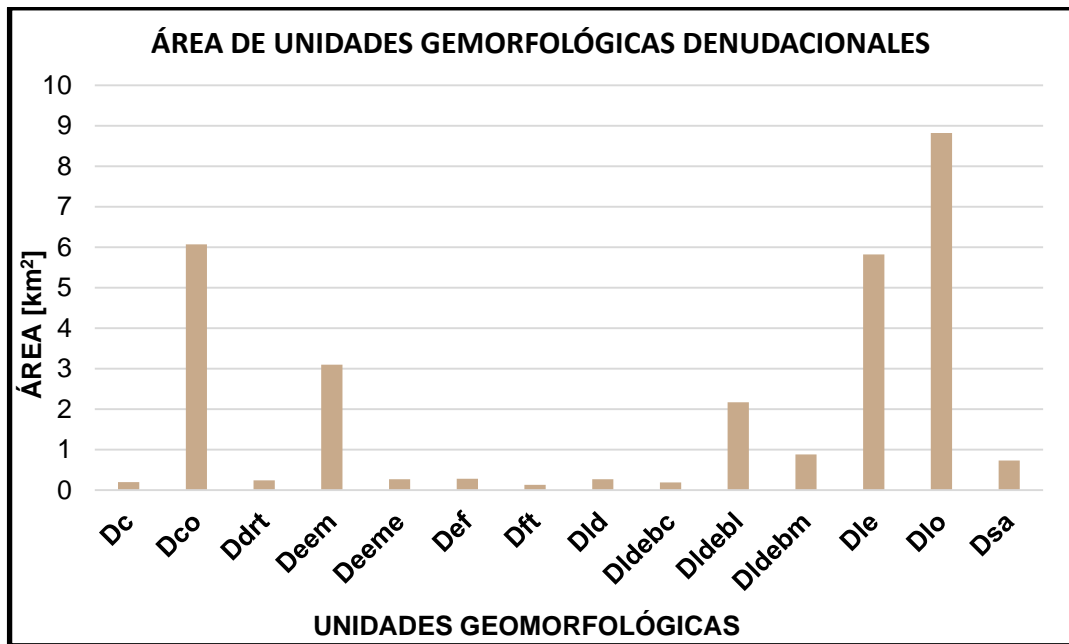
9.3.2. Ambiente Denudacional. Las geoformas denudacionales son generadas por los procesos exógenos de la tierra correspondientes a la agradación y degradación del relieve. En la zona de estudio cada uno de estos procesos se ve reflejado en la meteorización, erosión y transporte, ya sea de origen gravitacional o pluvial, los cuales dan lugar a las geoformas actuales. Según su área de influencia, estas geoformas corresponden al segundo ambiente morfogenético, cubriendo un área aproximada de 29,17 km² (19,45% del área de la plancha). Se identificaron un total de 127 geoformas denudacionales, asociadas a 14 tipos de unidades geomorfológicas, como se muestra en la **Tabla 20**; siendo este el ambiente morfogenético con mayor cantidad de geoformas presentes. Las geoformas denudacionales se localizan principalmente hacia el sur de la plancha, en el municipio de San Miguel y Capitanejo, y en menor medida en Enciso.

Tabla 20. Unidades geomorfológicas de origen *denudacional*.

CÓDIGO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA [km²]	FRECUENCIA RELATIVA	%	N° DE GEOFORMAS
Dc	Cima	0,2	0,69	0,13	7
Dco	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	6,07	20,81	4,05	43
Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	0,24	0,82	0,16	1
Deem	Escarpe de erosión mayor	3,1	10,63	2,07	40
Deeme	Escarpe de erosión menor	0,27	0,93	0,18	8
Def	Escarpe facetado	0,28	0,96	0,19	2
Dft	Cono o lóbulo de flujo indiferencia	0,13	0,45	0,09	1
Dld	Loma denudada	0,27	0,93	0,18	1
Dldebc	Lomo denudado bajo de longitud corta	0,19	0,65	0,13	1
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	2,17	7,44	1,45	3
Dldebm	Lomo denudado bajo de longitud media	0,88	3,02	0,59	4
Dle	Ladera erosiva	5,82	19,95	3,88	3
Dlo	Ladera ondulada	8,82	30,24	5,88	9
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	0,73	2,5	0,49	4
TOTAL		29,17	100	19,5	127

La tabla anterior demuestra que Dlo, Dco y Dle son las geoformas denudacionales de mayor extensión en la zona de estudio, mientras que las geoformas Dft y Dldebm son las de menor; esto se representa mejor en la **Figura 58**. Por otro lado, las geoformas Dco y Deem son las geoformas denudacionales que más se presentan en la plancha, mientras que las geoformas Ddrt, Dft, Dld y Dldebc sólo se presentan una vez en la zona de estudio. A continuación, se realiza una descripción de cada una de las unidades geomorfológicas originadas en este ambiente.

Figura 58. Área de influencia de las unidades geomorfológicas denudacionales de la plancha 136-II-C.

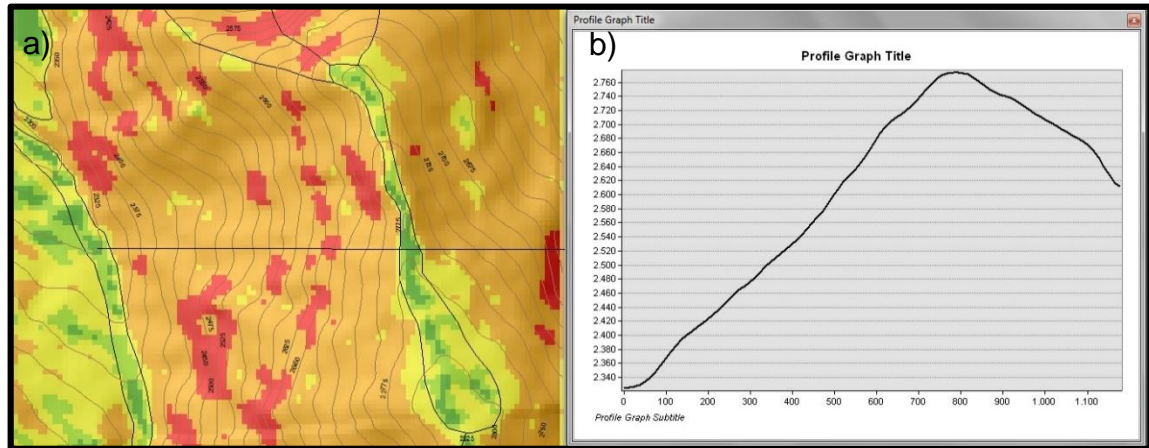


➤ **Cima (Dc).** Superficies planas a suavemente inclinadas, convexas y rugosidad muy baja, dispuestas en franjas alargadas estrechas sobre divisorias de aguas de geoformas estructurales; su origen se debe a los procesos intensos de meteorización y erosión, acompañados en algunos casos por actividades antrópicas (Ver **Figura 59**). En la zona de estudio se identificaron un total de 7 geoformas distribuidas únicamente sobre sierras estructurales, localizadas en las veredas Babega, Sirguaza, Ropejo Bajo y Alto, San José y Saucara del Municipio de Carcasí, y en las veredas Robles y El Juncal del Municipio de Enciso, las cuales ocupan un área de 0,2 Km².

Estas geoformas pueden alcanzar longitudes entre 320 y 1000 metros, y anchos entre 25 y 200 metros, limitados por laderas de pendientes escarpadas a abruptas, compuestas principalmente materiales consolidados de resistencia dura, correspondientes a las calizas y areniscas de la Formación La Luna, Aguardiente y

Tibú-Mercedes; por lo general presentan vegetación tipo bosque, herbácea y pastos. Las cimas ubicadas en las veredas Saucara y Sirguaza del Municipio de Carcasí, son utilizadas para asentamientos y agricultura.

Figura 59. Cima (Dc). a) Localizada en la Sierra de las Veredas Ropejo Bajo y Ropejo presentando una dirección SE-NW, Alto. b) Perfil transversal.



Fuente: Tomado y modificado de ArcGIS 10.1.

➤ **Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).** Estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja relacionada a procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas, así como de antiguos movimientos en masa por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados (Carvajael et al. 2012).

En la zona de estudio se identificaron un total de 43 depósitos coluviales de extensiones variables, pendientes planas a suavemente inclinadas y rugosidades muy bajas, los cuales ocupan una superficie de 6,07 km², distribuidas a lo largo de toda la plancha 136-II-C, principalmente sobre el Municipio de Enciso. Dichos depósitos están constituidos por bloques angulares heterométricos, matriz soportados, principalmente arcillo-limoso a limo-arenoso, de rocas preexistentes,

localizados por lo general en el pie de escarpes de roca muy fracturada y en zonas de topografía montañosa de media a alta pendiente. Entre la vereda Loma El Negro y la vereda El Juncal del municipio de Enciso, se identificó claramente un Cono Coluvial (Dco) producto de un antiguo movimiento en masa asociado a un deslizamiento de tipo rotacional tal y como se muestra en la **Figura 60**, cuya afectación ocasionó graves daños de infraestructura en el sector conocido como Agua Sucia. Cabe destacar que esta geoforma es la de mayor frecuencia en la plancha 136-II-C.

Figura 60. Panorámica de las veredas Loma El Negro y El Juncal del municipio de Enciso desde la vereda Salado Bravo en San José de Miranda. Se observa un gran depósito coluvial (Dco) limitado por laderas de sierra estructural (Ssle), una de ellas sinclinal, sobre la cual se está realizando minería a cielo abierto en 2 canteras (Ac) de forma artesanal.



➤ **Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt).** Estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja, localizado en la Vereda El Juncal del Municipio de Enciso, tal y como se observa en la **Figura 61**, cubriendo un área de 0,24 km² y 800 metros de longitud aproximadamente, con morfología irregular y lobulada en su parte distal, curvatura cóncava y pendientes muy inclinadas a abruptas.

Figura 61. Panorámica del flanco oriental del sinclinal del valle del Río Servitá. Se evidencia inversión tectónica en la secuencia sedimentaria de las rocas terciarias. Se observa también un deslizamiento rotacional (Ddrt) de gran magnitud que afectó gravemente la Vereda Agua Sucia del Municipio de Enciso.



Se encuentra asociado a depósitos de detritos (Qco) provenientes de las rocas clásticas consolidadas (lodolitas grisáceas) de la Formación Colón – Mito Juan (Kscm) y a un deslizamiento de tipo rotacional (Dr) que afectó gravemente la Vereda

Loma El Negro. Debido a sus características y al en sí una geoforma productor de un movimiento en masa, se le asignó una calificación de susceptibilidad alta.

➤ **Escarpe de erosión mayor (Deem).** Ladera abrupta o a desplome de altura variable que puede formarse por distintos factores como el tectonismo a través de levantamiento de bloques por fallamiento y por la abrasión causada por la erosión fluvial y socavación lateral, además de procesos gravitacionales, caracterizada por presentar un índice de relieve relativo menor que 25 metros (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio se identificaron un total de 40 escarpes de erosión mayor, siendo la segunda geoforma denudacional con mayor frecuencia, cubriendo un área aproximada de 3,1 km², distribuidos en toda la plancha de forma heterogénea, en diferentes direcciones y formados sobre material inconsolidado, asociados a los depósitos coluviales; o sobre material consolidado, asociado calizas, areniscas y lodolitas compactas, de diferentes formaciones.

Eventualmente presentan un índice de relieve bajo, con alturas entre 40 y 80 metros de alto, de longitud larga a muy larga, entre 600 y 1500 metros, de forma cóncava a recta, con pendientes abruptas a escarpadas, mayores a 40°, rugosidades bajas a medias y ausencia de vegetación. Se encuentra asociado morfodinámicamente en la Vereda Cenacuta del Municipio de San Miguel a un deslizamiento traslacional, al margen del río Tunebo, tal y como se observa en la **Figura 62**.

➤ **Escarpe de erosión menor (Deeme).** Ladera abrupta o a desplome, de altura corta y longitud larga, de forma cóncava, convexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa a lo largo de un drenaje, caracterizada por presentar un índice de relieve relativo mayor que 25 metros (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio se identificaron un total de 8 escarpes de erosión

menor, ocupando una superficie de 0,27 km² en total, distribuidos principalmente a lo largo de los Ríos Servitá y Tunebo, en el municipio de Enciso, la Vereda Carrizal de Capitanejo y la Vereda Carbonera de San José de Miranda. Sus dimensiones van desde los 10 hasta los 25 metros de alto, con longitudes de 300 metros a 650 metros de largo y rugosidades bajas a medias.

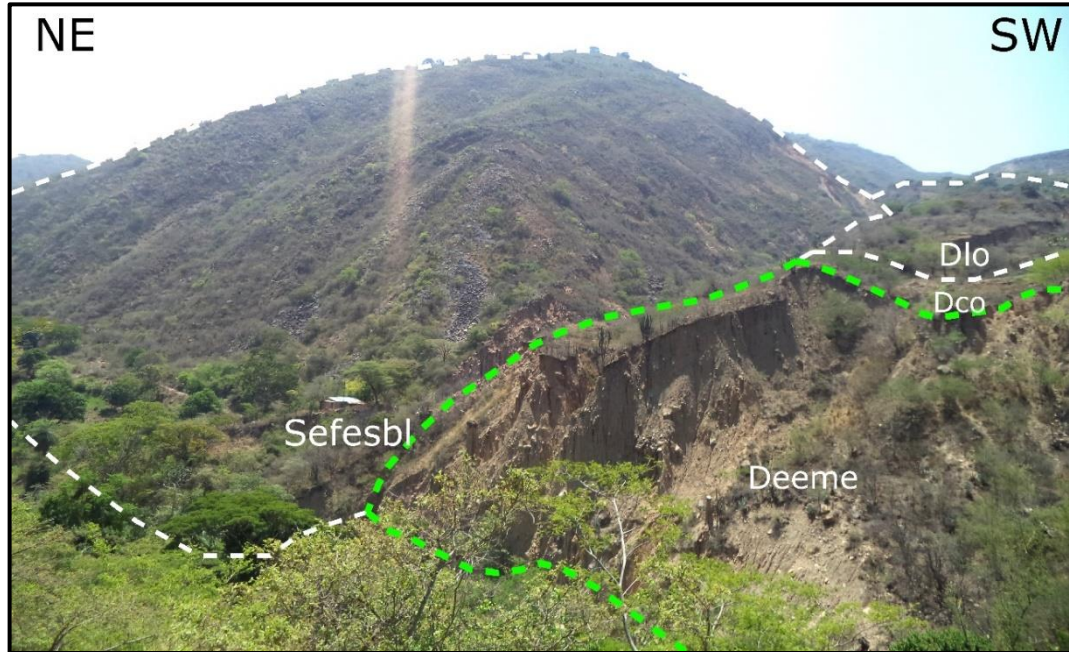
Figura 62. Escarpe de erosión mayor (Deem). La línea verde punteada representa dicha geoforma producto de la socavación lateral del Río Tunebo, en la Vereda Cenacuta de San Miguel. Dentro del escarpe se observa un deslizamiento rotacional.



Se encuentran asociados principalmente a depósitos coluviales (Qc) de edad Cuaternaria y a la Formación Carbonera (Tec) en límites con el municipio de Málaga al Noroccidente de la plancha 136-II-C. La vegetación es prácticamente ausente. A pesar de su calificación de susceptibilidad alta dada en base a sus características

morfométricas y composición principalmente de rocas inconsolidadas, no se identificaron movimientos en masa en esta geoforma (Ver **Figura 63**).

Figura 63. Escarpe de erosión menor (Deeme). La línea verde delimita dicho escarpe producto de la socavación lateral del Río Tunebo, en la Vereda Carrizal de Capitanejo. Dentro del escarpe se observa un deslizamiento rotacional.



➤ **Escarpe faceteado (Def).** Superficie triangular o trapezoidal, de base amplia y tope angosto, con ladera de morfología alomada. Su origen está relacionado a procesos de erosión, incisión y movimientos en masa en laderas relictas que aparecen en torno a relieves estructurales constituidos por materiales fracturados (Carvajal et al. 2012).

En la zona de estudio se identificaron 2 geoformas de este tipo, las cuales se encuentran localizadas en la Vereda Villeta al SE del casco urbano del Municipio de Enciso (Ver **Figura 64**) y en la Vereda Saucara del Municipio del Municipio de Carcasí, exactamente en la unión de la Quebrada Suparí con el Río Tunebo; cubriendo un área aproximada de 0,14 km². Morfométricamente presentan un ancho

de 750 metros en la base y una altura aproximada entre 250 y 300 metros, con pendientes escarpadas a muy escarpadas, mayores a 40°, rugosidades medias a muy altas, curvaturas convexas a cóncavas y están asociadas a rocas clásticas cementadas, de resistencia dura pertenecientes a la Formación Aguardiente (Kia). Cabe destacar que la disposición de estas geofomas se da en sitios cercanos a fallas geológicas, como la Falla de la Quebrada Suparí y la Falla Villetas.

Figura 64. Escarpe faceteado (Def). Localizado en la Vereda Villeta del Municipio de Enciso, en su base se presenta un depósito coluvial producto de la caída de roca (Cr) de material clástico cementado correspondiente a la Formación Aguardiente.



➤ **Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft).** Estructura en forma de lóbulo o abanico de morfología alomada convexa. Esta geofoma se presenta únicamente en La vereda Loma El Negro del Municipio de Enciso cubriendo un área de 0,13 km², sus características morfométricas son índice de relieve relativo bajo con una

altura de 250 metros aproximadamente desde su nivel base local “Quebrada Las Puertas”, longitud larga de 500 metros aproximadamente, pendientes que van desde abrupta a escarpada, rugosidades medias a altas con curvaturas rectas en su parte más alta y rugosidades bajas con curvaturas cóncavas y convexas en su base, y ausencia de vegetación.

Su origen está relacionado a un evento morfodinámico donde se desarrolló principalmente un flujo de lodo gris calcáreo asociado a lluvias torrenciales sobre rocas de la Formación La Luna (Ksl). En la FIGURA 64 se observa parte de la geoforma y el Depósito Coluvial producto de la mezcla entre el flujo anteriormente nombrado y el deslizamiento rotacional de la Vereda Loma Del Negro.

➤ **Loma desnuda (Dld).** Prominencia topográfica, caracterizada por presentar una altura menor de 200 metros sobre su nivel de base local (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio la única geoforma de este tipo se encuentra ubicada en la Vereda Mosgua al Norte del casco urbano del Municipio de Enciso se observa en la **Figura 65**, y cubre un área aproximada de 0,27 Km².

Esta geoforma presenta una morfología alomada, convexa a recta y elongada, altura de 80 metros sobre su nivel base local, longitud de 2,2 kilómetros extendiéndose hacia el Este, pendientes muy inclinadas a muy abruptas y rugosidades muy bajas a medias, sobre la cual crece principalmente vegetación herbácea y pastos. Su origen está relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial sobre unidades sedimentarias cretácicas correspondientes a las rocas clásticas cementadas de la Formación Aguardiente (Kia) principalmente y en menor proporción a rocas clásticas consolidadas de la Formación Capacho (Ksc) y la Formación Colón – Mito Juan (Kscm). A pesar de que las lomas desnudas se caracterizan por presentar movimientos en masa y procesos erosivos intensos, no se identificó ningún evento morfodinámico en la zona de estudio.

Figura 65. Perfil de la loma denudada (Dld) localizada en la Vereda Mosgua del Municipio de Enciso. En la esquina inferior izquierda de la foto se observa la presencia de un montículo de dimensiones no cartografiables.



➤ **Loma denudado bajo de longitud corta (Dldebc).** Prominencia topográfica en un sistema montañoso, en forma de filo o cresta, caracterizado por presentar un índice de relieve relativo y eje principal menor a 250 metros. Morfológicamente es una geoforma alargada, donde su tope o eje principal tiende a comportarse como una divisoria de aguas, limitada por drenajes subparalelos, variando su forma dependiendo del grado de incisión de dichos drenajes (Carvajal et al. 2012).

En la zona de estudio se pudo identificar esta geoforma en la Vereda Quebrada Honda del municipio de Carcasí, cubriendo un área de 0,19 km² aproximadamente, dispuesta en dirección Noreste - Suroeste perpendicular a la Quebrada La Honda. Morfométricamente presenta pendiente abrupta a escarpada (>19°), rugosidades bajas a medias, curvaturas principalmente convexas, índice relativo de relieve bajo de 80 metros aproximadamente, laderas cortas entre 150 y 250 metros y longitud corta en su eje principal en torno a los 250 metros. Su origen se encuentra relacionado a procesos denudacionales sobre rocas clásticas consolidadas de la

Formación Paleozoico del Río Nevado. En esta geoforma se identificó un deslizamiento rotacional.

➤ **Lomo desnudo bajo de longitud larga (Dldeb1).** Prominencia topográfica en un sistema montañoso, en forma de filo o cresta, caracterizado por presentar un índice de relieve relativo menor a 250 metros y longitud del eje principal mayor a 1 kilómetro. Morfológicamente es una geoforma alargada, donde su tope o eje principal tiende a comportarse como una divisoria de aguas, limitada por drenajes subparalelos, variando su forma dependiendo del grado de incisión de dichos drenajes (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio se pudieron identificar 3 geoformas, localizadas al Suroeste del Municipio de Carcasí y al Noreste del Municipio de San Miguel, las cuales se disponen perpendiculares al Río y la Quebrada El Colmillo, cubriendo un área total de 2,17 km².

Morfométricamente presentan pendientes abruptas a escarpadas, rugosidades bajas a medias, curvaturas principalmente convexas, índice de relieve relativo bajo de aproximadamente 80 metros, con laderas cortas a moderadamente largas que van desde los 200 a los 400 metros y longitudes muy largas en su eje principal, entre 1200 y 2400 metros. Su origen se encuentra relacionado a procesos denudacionales sobre calizas, areniscas y lodolitas de resistencias duras pertenecientes a las formaciones Tibú-Mercedes, Aguardiente y Paleozoico del Río Nevado, respectivamente. Estas geoformas presentan dos movimientos en masa, el primero es un deslizamiento traslacional (Dt) localizado en la Vereda Saucara del Municipio de Carcasí y el segundo es un deslizamiento rotacional (Dr) localizado en la Vereda Pamplonita del Municipio de San Miguel.

➤ **Lomo desnudo bajo de longitud media (Dldebm).** Prominencia topográfica en un sistema montañoso, en forma de filo o cresta caracterizado por presentar un

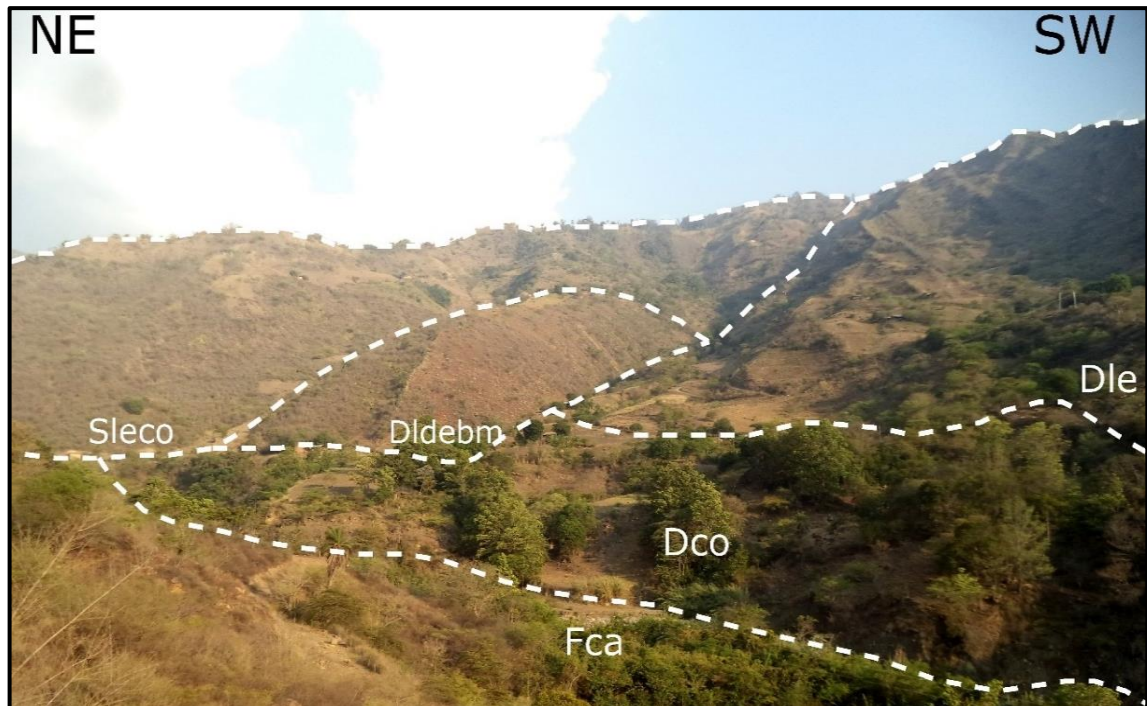
índice de relieve relativo menor que 250 metros y un eje principal con longitudes entre 250 metros y 1 kilómetro. Morfológicamente es una geoforma alargada, donde su tope o eje principal tiende a comportarse como una divisoria de aguas, limitada por drenajes subparalelos, variando su forma dependiendo del grado de incisión de dichos drenajes (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio se pudieron identificar 4 lomos denudados bajos de longitud media, localizados en los Municipios de Enciso y Carcasí, como el que se muestra en la **Figura 66** y San Miguel, los cuales presentan una dirección preferencial SW-NE cubriendo un área aproximada de 0,88 km².

Morfométricamente presentan pendientes abruptas a escarpadas, índices de relativo de relieve bajo de aproximadamente 50 metros, rugosidades bajas a medias, curvaturas principalmente convexas, con laderas cortas y longitudes largas en su eje principal, entre 600 y 800 metros aproximadamente. Su origen se encuentra relacionado a procesos denudacionales sobre rocas sedimentarias Cretácicas de competencia moderadamente dura. En una de estas geoformas se logró identificar un movimiento en masa de tipo deslizamiento traslacional, al centro de la Vereda Pamplonita del Municipio de San Miguel en límites con el Municipio de Carcasí.

➤ **Ladera erosiva (Dle).** Corresponde a geoformas de pendientes muy inclinadas a escarpadas, rugosidades muy bajas a medias, curvaturas convexas a cóncavas, longitudes moderadas a extremadamente largas, las cuales se encuentra localizadas al sur de la plancha 136-II-C, en las inmediaciones del municipio de San Miguel, cubriendo un área aproximada de 5,82 km². Estas laderas erosivas (3) presentan procesos erosivos intensos como terracetos, cárcavas, surcos y solifluxión, producto de la acción de drenajes dendrítico a subparalelo, sobre rocas sedimentarias cretácicas de la Formación Capacho (Ksc), Tibú – Mercedes (Kitm), La Luna (Ksl) y Colón – Mito Juan (Kscm).

Estas geoformas están relacionadas a susceptibilidades moderadas por movimientos en masa y en la zona de estudio no se identificaron movimientos en masa asociadas a ellas. En la **Figura 62** y en la **Figura 66** se presenta la ladera erosiva localizada en la Vereda Cenacuta del Municipio de San Miguel, allí se puede observar la alta rugosidad de la ladera, producto de los intensos procesos denudacionales sobre la Formación Colón-Mito Juan (Kscm).

Figura 66. Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm). Producto de la acción directa de la Quebrada Agua sucia, la cual aporta sus aguas al Río Tunebo; está quebrada a su vez divide la ladera erosiva (Del) de la ladera estructural de colina (Sleco).

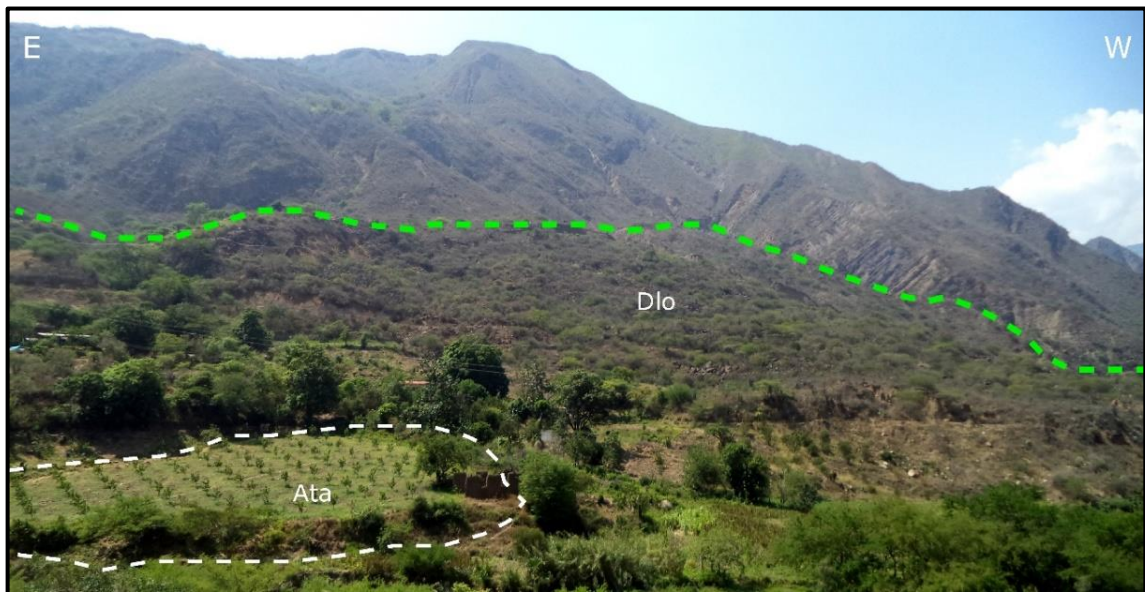


➤ **Ladera ondulada (Dlo).** Superficie en declive de morfología alomada o colinada, de área, índice de relieve y longitudes variables. Estas laderas pueden formarse en suelos residuales y depósitos coluviales controlados por procesos denudativos donde se caracterizan patrones de drenaje subdendríticos a subparalelos (Carvajal

et al. 2012). En la zona de estudio se identificaron un total de 9 laderas onduladas como la de la **Figura 67**, las cuales cubren un área aproximada de 8,82 km², siendo esta la geoforma denudacional de mayor extensión en la plancha 136-II-C.

Morfométricamente presentan pendientes que van desde inclinadas a escarpadas, rugosidades y curvaturas variables, longitudes largas a muy largas y vegetación principalmente herbácea. Su origen se encuentra relacionado a procesos denudacionales intensos sobre unidades geológicas de diferentes litologías. Estas geoformas no se encuentran asociadas a la ocurrencia de movimientos en masa.

Figura 67. Ladera ondulada Dlo). Producto de procesos denudacionales sobre el suelo residual de las formaciones Colón-Mito Juan y Aguardiente, y en menor medida pequeños depósitos coluviales. En la fotografía también se aprecia una terraza agrícola la cual no pudo ser cartografiada debido a sus dimensiones.



➤ **Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa).** Área extensa, elevada y de topografía plana horizontal que se encuentra expuesta a intensos procesos denudacionales y degradacionales (meteorización), reduciendo así su relieve y recortando las capas o basamento de las formaciones geológicas (Carvajal et al. 2012). En la zona de estudio se identificaron 4 geoformas de este tipo cubriendo un

área de 0,73 km². Una de ellas se encuentra localizada al Suroeste del casco urbano del municipio de Carcasí sobre la Formación Paleozoico del Río Nevado (Pcrn) con pendiente plana a suavemente inclinada (<7°). Las otras 3 superficies de erosión se encuentran elevadas sobre la Vereda Arenales perteneciente al Municipio de San Miguel, reposando sobre la Formación Tibú – Mercedes (Kitm) con pendientes planas a inclinadas (<15°). Presentan en general un índice de relieve muy bajo a bajo, extendiéndose en longitudes que van desde los 500 metros hasta los 900 metros. Además, están cubiertas principalmente por vegetación tipo pasto y debido a sus pendientes planas son utilizadas para asentamientos humanos y actividades agrícolas. Estas geoformas no se encuentran asociados a movimientos en masa.

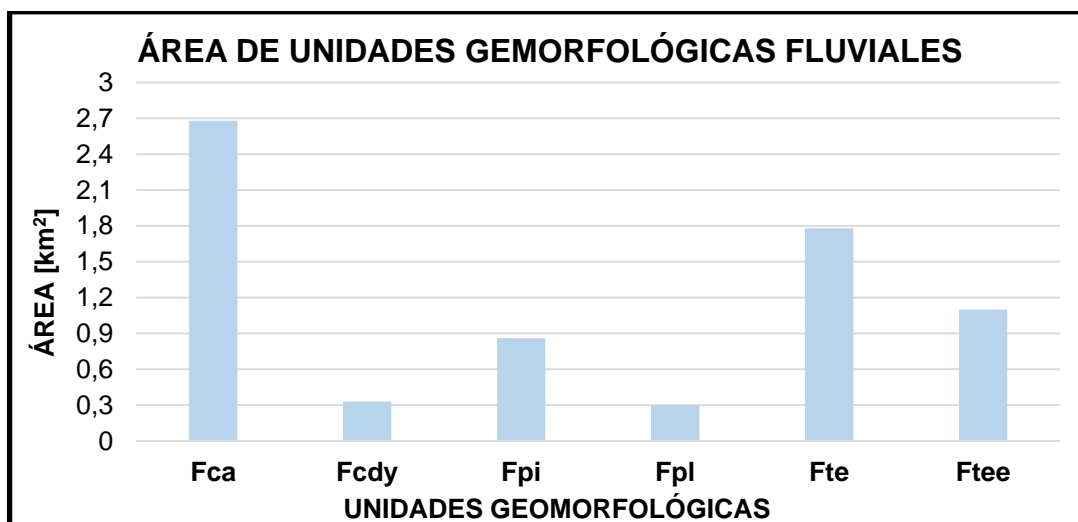
9.3.3. Ambiente Fluvial y Lagunar. Las geoformas de origen fluvial y lagunar son el producto de procesos erosivos por la acción de las corrientes de los drenajes, acompañados de procesos de transporte y depositación de sedimentos en el fondo de los cauces o en zonas aledañas, principalmente cuando dichos drenajes pierden su capacidad de arrastre. En la zona de estudio se identificaron un total de 29 geoformas fluviales como se muestra en la **Tabla 21**, asociadas a 6 tipos de unidades geomorfológicas, las cuales cubren un área aproximada de 7,05 Km² (4,7% del área de la plancha). Estas geoformas son producto de la dinámica fluvial de los ríos Servitá, Tunebo y Petaquera, así como de sus principales afluentes, Quebrada Ínsula, Quebrada El Salado, Quebrada La Miel, Quebrada El Colmillo, Quebrada El Bejuco y Quebrada Janera, entre otros.

La tabla indica que las unidades Fca y Fte son las geoformas fluviales de mayor extensión en la zona de estudio, mientras que las geoformas Fpl y Fcdy corresponden a las de menor extensión; esto se representa mejor en la **Figura 68**.

Tabla 21. Unidades geomorfológicas de origen fluvial.

CÓDIGO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA [km ²]	FRECUENCIA RELATIVA	%	Nº DE GEOFORMAS
Fca	Cauce aluvial	2,68	38,01	1,79	2
Fcdy	Cono de deyección	0,33	4,68	0,22	1
Fpi	Plano o llanura de inundación	0,86	12,2	0,57	14
Fpl	Plano y artesa lagunar	0,3	4,26	0,2	1
Fte	Terraza de erosión	1,78	25,25	1,19	6
Ftee	Escarpe de terraza de erosión	1,1	15,6	0,73	5
TOTAL		29,17	100	4,7	29

Figura 68. Área de las unidades geomorfológicas fluviales de la plancha 136-II-C.



Por otro lado, la geoforma Fpi es la geoforma fluvial más frecuente, mientras que las geoformas Fpl y Fcdy sólo se presentan una vez en la zona de estudio. A continuación, se realiza una descripción de cada una de las unidades geomorfológicas originadas en este ambiente.

➤ **Cauce aluvial (Fca).** Son canales de forma irregular excavados por la erosión de drenajes perennes, los cuales forman un lecho constituido por material de arrastre como cantos y bloques rodados, heterométricos y heterogéneos, algunas veces embebidos en una matriz areno-gravosa, pero en la mayoría de los casos sueltos, y materiales inconsolidadas de composición arenosa; presentan curvatura cóncava y rugosidad muy baja a baja. Los cauces se forman sobre sedimentos aluviales de morfología baja, como es el caso del Río Servitá o entallando macizos rocosos de unidades Cretácicas y Paleógenas, como es el caso del Río Tunebo, estos ríos junto con sus quebradas afluentes cubren un área aproximada de 2,7 km², siendo la geoforma fluvial de mayor extensión en el área de estudio.

Al occidente de la plancha 136-II-C, el cauce del Río Servitá con un promedio de 50 metros de ancho, se extiende en dirección Norte – Sur a lo largo de 10 kilómetros aproximadamente sobre el trazo de la falla de su mismo nombre, con una ligera desviación hacia el SW en su tramo final, tal y como se muestra en la **Figura 69**. Su morfología es rectilínea, y en algunos tramos anastomosada con canales entrecruzados, formando barras de tipo longitudinal, con pendientes principalmente planas a suavemente inclinadas (<7°). Dentro de sus afluentes principales se encuentran en dirección Este – Oeste la Quebrada Ínsula y la Quebrada Las Puertas mientras que desde el flanco occidental del valle provienen en dirección Oeste – Este la Quebrada El Espinal, la Quebrada El Tambor y la Quebrada El Salado.

En la zona central de la plancha, el cauce del Río Tunebo está condicionado igualmente por el trazo de la falla de su mismo nombre a lo largo de 14 kilómetros aproximadamente, el cual atraviesa la zona en dirección Este – Oeste, con una ligera desviación hacia el SW en su tramo final. Su morfología es rectilínea, restringido por un valle estrecho en forma de V, debido al fuerte control estructural que ejerce la falla, con pendientes suavemente inclinadas a muy inclinadas (<20°). Dentro de sus principales afluentes se encuentran en dirección Norte – Sur la Quebrada Suparí la cual proviene del Alto del Curubito, la Quebrada El Rincón y la

Quebrada Seca, mientras que en dirección Sur – Norte aportan sus aguas la Quebrada La Miel, la Quebrada La Honda y la Quebrada El Colmillo las cuales están controladas de igual forma por fallas con sus mismos nombres respectivamente. No se presentan movimientos en masa asociados, pero es posible que se generen problemas de estabilidad sobre las geofomas adyacentes a los cauces debido a la socavación lateral generada por dichas corrientes.

Figura 69. Panorámica del Valle del río Servitá. Desde la vereda Loma El Negro, al margen derecho de la vía Enciso - Carcasí. Se observan las geofomas producto de la dinámica del Río Servitá, el cual sigue el trazo su falla homónima, en dirección Norte – Sur, para unirse más adelante, en el Municipio de Capitanejo, con el Río Chicamocha.



➤ **Cono de deyección (Fcdy).** Superficie en forma de cono localizadas en zonas donde los drenajes llegan a valles amplios, generalmente su depósito está constituido por materiales inconsolidados, con espesores más gruesos hacia el ápice y más finos en la zona distal (Carvajal et al., 2012). El único cono de deyección que se identificó en la zona de estudio se localiza a la Noreste derecha de la

plancha, exactamente al Norte del Corregimiento El Tobal, en la vereda Agua Tendida, como se puede observar en la **Figura 49**. Comprende un área de 0,33 km² con una extensión en dirección Norte – Sur de 1,8 kilómetros aproximadamente, presenta pendientes suavemente inclinadas a muy inclinadas (5° - 20°), rugosidades muy bajas y curvatura cóncava a recta. Sus depósitos están asociados a la dinámica fluvial de la Quebrada El Bejuco, constituyéndose principalmente de materiales no consolidados heterométricos y heterogéneos (arcillas, limos y arenas); hacia su parte más baja, se encuentra también algunos cantos y bloques rodados. La cobertura del suelo está constituida principalmente por vegetación herbácea y pastos, y a su vez es aprovechada para actividades agrícolas y ganaderas.

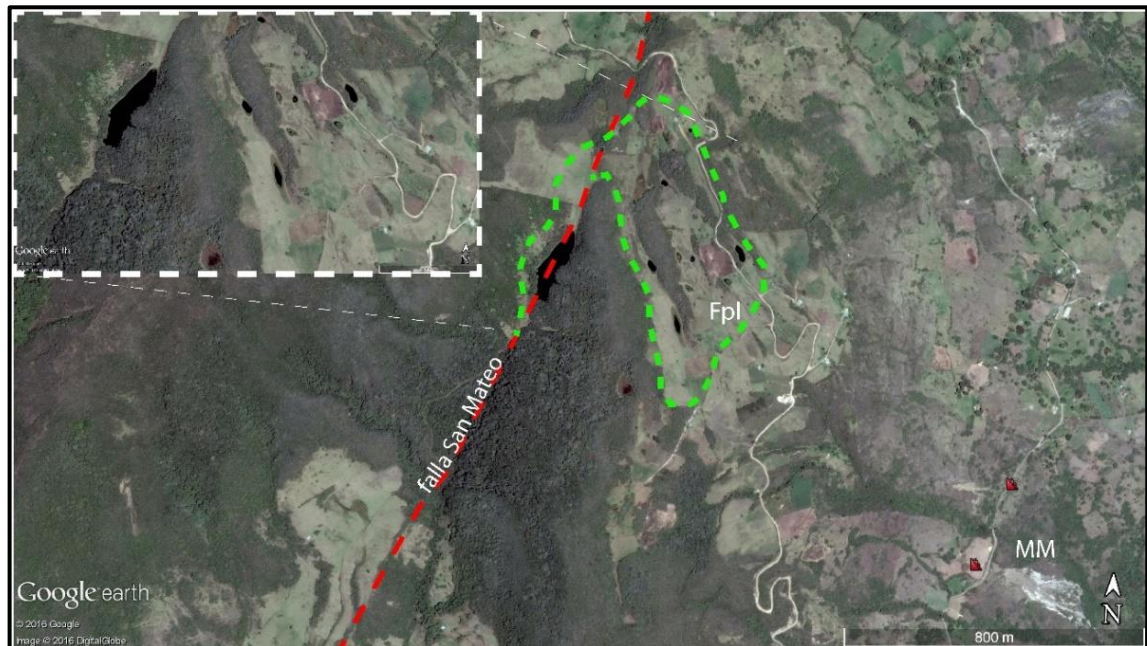
➤ **Planos o llanuras de inundación (Fpi)**. Superficies de morfología plana, baja a ondulada, menor a 7°, curvatura cóncava y rugosidad muy baja, eventualmente inundable. Se localizan bordeando el cauce fluvial del Río Servitá (Ver la **Figura 69** y la **Figura 71**), cubriendo un área de 0,86 km². El Río Servitá al estar encajado entre escarpes de terrazas, escarpes de erosión y laderas de sierras disectadas por drenajes subparalelos afluentes a este, presenta llanuras de inundación disectadas, con morfología estrecha y alargada en la dirección del río. Sus depósitos (Qal1) están constituidos principalmente por sedimentos no consolidados de partículas de arena media a gruesa y presencia heterogénea de cantos rodados hacia sus zonas más distales al cauce. Algunos sectores de las llanuras presentan vegetación herbácea y algunos suelos suelen ser de uso agrícola. No se presentan movimientos en masa asociados a esta geoforma, principalmente por su relieve relativo bajo.

➤ **Plano y artesa lagunar (Fpl)**. Cuerpo natural de agua de aspecto pantanoso, irregular y de poca profundidad, acumulado en artesas de origen tectónico o

estructural. Se presenta como planos de material lacustrino fino, localmente colmatados por agua de origen pluvial (Carvajal et al., 2012).

En la zona de estudio sólo se logró identificar una geoforma de este tipo, esta se localiza en la vereda Victarigua y Cruz Grande y Garbanzal del municipio de Carcasí, en el sitio conocido como Sartaneja a una altura de 3100 m.s.n.m. Se extiende a lo largo de 2 Km aproximadamente en dirección Norte – Sur, paralelas al trazo de la Falla San Mateo, cubriendo un área de 0,3 km² (Ver **Figura 70**), con pendientes que van desde planas, suavemente inclinadas a inclinadas (<10°), curvaturas ligeramente cóncavas a rectas y rugosidades bajas a muy bajas. Esta geoforma no exhibe movimientos en masa, probablemente por presentar una morfología aplanada.

Figura 70. Plano y artesa lagunar (Fpl). Localizado en las Veredas Victarigua y Cruz Grande y Garbanzal del Municipio de Carcasí. Se evidencia el fuerte control estructural de la Falla San Mateo, lo que produce el alargamiento de las lagunas en esa dirección.



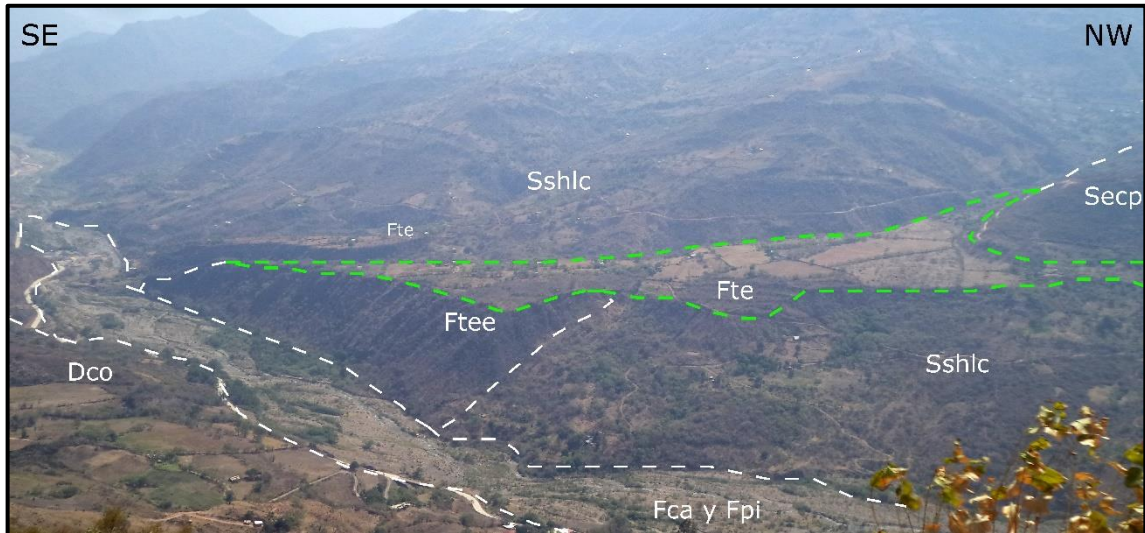
Fuente: Tomado y modificado de Google Earth, 2016.

➤ **Terraza de erosión (Fte).** Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, limitada por escarpes de diferente altura, que se presenta en forma alterna no pareada, a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión aluvial lateral y procesos de levantamiento tectónico que afectan el sustrato rocoso. Generalmente contiene una delgada capa de grava que cubre la superficie plana Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio se identificaron 6 terrazas de erosión a lo largo del Río Servitá, 4 en el municipio de Enciso en las veredas Mosgua, Ínsula, Loma Del Negro y El Juncal respectivamente, y 2 terrazas, conocidas como Mesa Grande y Mesa Chiquita, localizadas en la Vereda Salado Bravo del Municipio de San José de Miranda, asociadas a la interacción del Río Servitá y la Quebrada El salado.

Estas terrazas cubren un área aproximada de 1,78 Km², siendo principalmente utilizadas para asentamientos humanos, agricultura y ganadería. Se encuentra limitadas, por lo menos en uno de sus márgenes, por escarpes de terraza de erosión (Ftee) los cuales presentan alturas que varían entre los 20 y 120 metros. La terraza más larga se encuentra ubicada en el Municipio de Enciso en la vereda de Mosgua, abarcando una longitud de 2,7 Km aproximadamente, mientras que la terraza “Mesa Grande” en la **Figura 71** y “Mesa Chiquita”, tienen una longitud de 1,1 kilómetro y 500 metros de largo, respectivamente.

En general, este tipo de geoformas presentan pendientes planas a suavemente inclinadas ($< 7^\circ$), curvatura recta y rugosidades muy bajas o nulas. Compuesta principalmente material no consolidado de gravas y cantos polimícticos, de forma subredondeada, inmersos en una matriz areno-arcillosa, y arenas y gravas. La cobertura presente corresponde principalmente a vegetación herbácea, y en menor proporción a pastos y matorrales. Morfodinámicamente no presenta movimientos en masa, debido principalmente a sus características morfométricas.

Figura 71. Terrazas (Fte) y escarpes de terraza de erosión (Ftee). Producto de la acción conjunta del Río Servitá y la Quebrada El Salado. Estas terrazas se encuentran ubicadas en la Vereda Salado Bravo del Municipio de San José de Miranda. También se aprecia el cauce activo y el plano de llanura de inundación.



➤ **Escarpes de terraza de erosión (Ftee).** Plano vertical a subvertical, escalonado, que bordea a las terrazas aluviales de erosión. Su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce sobre el estrato rocoso (Carvajal et al., 2012). Se identificaron 5 escarpes de terraza de erosión los cuáles se localizan en los márgenes del Río Servitá y la Quebrada el Salado, los cuales limitan las terrazas de erosión descritas anteriormente. Dichos escarpes cubren un área de 1,1 km² con alturas entre 20 y 120 metros, y extensiones entre los 350 hasta los 2700 metros.

Los escarpes de terraza tienen la misma génesis de las terrazas de erosión, su diferencia radica en sus características morfométricas, las cuales son pendientes abruptas a escarpadas, en promedio de 40° de inclinación, curvaturas rectas, y rugosidades medias a altas. La vegetación presente en estas geoformas es escasa, normalmente de tipo matorral. El escarpe de la terraza del Municipio de Enciso, al oeste de su cabecera municipal, tiene una altura promedio de 30 metros; mientras

que la terraza del Municipio de San José de Miranda “Mesa Grande” es de 100 metros (Ver **Figura 71**); estos escarpes presentan erosión en surcos y cárcavas.

A pesar de su cercanía a la Falla del Río Servitá, su composición litológica de materiales inconsolidados y sus características morfométricas que indican alta susceptibilidad por movimientos en masa, esta geoforma carece de ellos. Esto puede deberse a sus condiciones de escorrentía lenta y curvatura recta; por lo que se hace importante incluir estas variables en estudios de susceptibilidad por movimientos en masa.

9.3.4. Ambiente Antropogénico. Las geoformas antropogénicas son el resultado de la intervención directa del hombre sobre el relieve, en la mayoría de los casos de manera inadecuada, acelerando en algunas ocasiones la ocurrencia de movimientos en masa. En la zona de estudio se encontraron un total de 17 geoformas antropogénicas, evidenciadas en la **Tabla 22**, las cuales están asociadas a 3 tipos de unidades geomorfológicas, de la siguiente manera: 2 canteras, 4 superficies de explanación y 11 terrazas agrícolas.

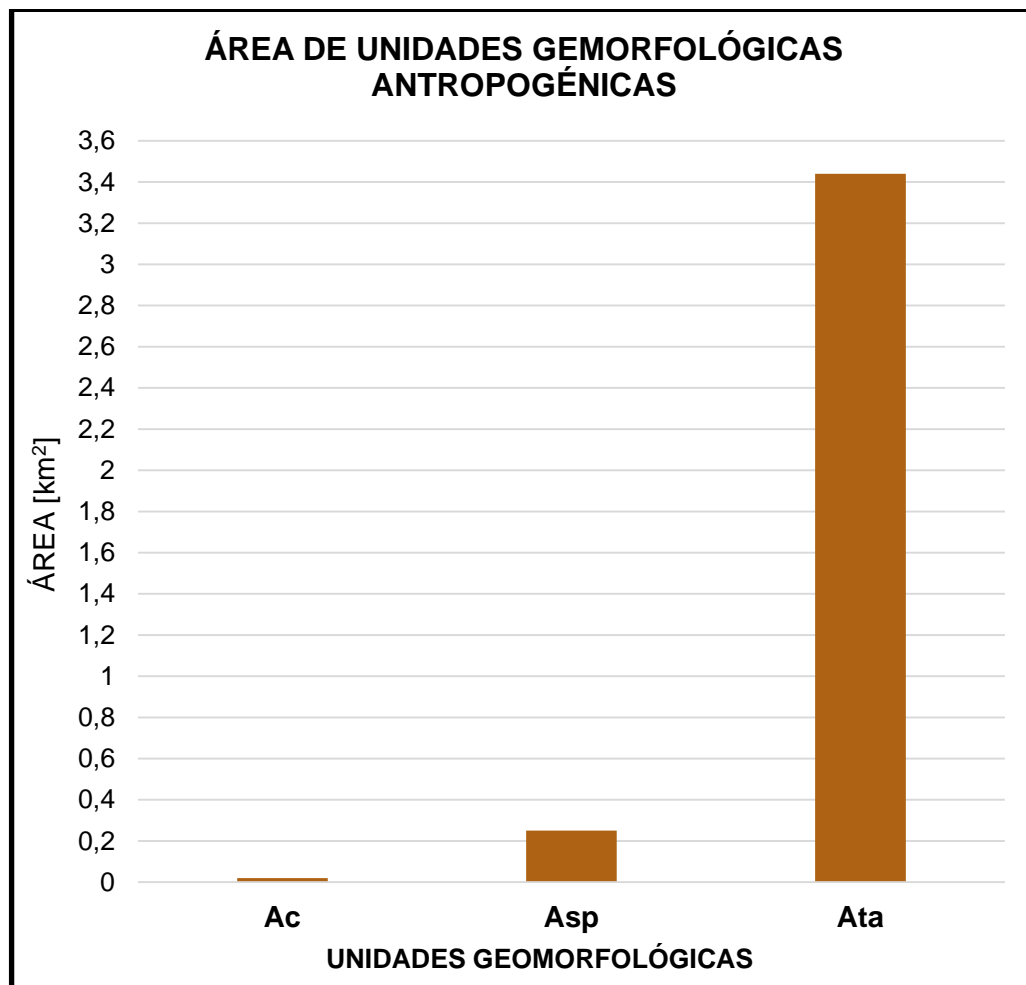
Estas geoformas cubren un área aproximada de 3,71 Km² (2,5% del área de la plancha), localizándose principalmente en los alrededores de las Caberas Municipales de Carcasí, Enciso y San José de Miranda.

Tabla 22. Unidades geomorfológicas de origen antropogénico.

CÓDIGO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA [km ²]	FRECUENCIA RELATIVA	%	N° DE GEOFORMAS
Ac	Cantera	0,02	0,54	0,01	2
Asp	Superficie de explanación	0,25	6,74	0,17	4
Ata	Terraza agrícola	3,44	92,72	2,29	11
TOTAL		3,71	100	2,47	17

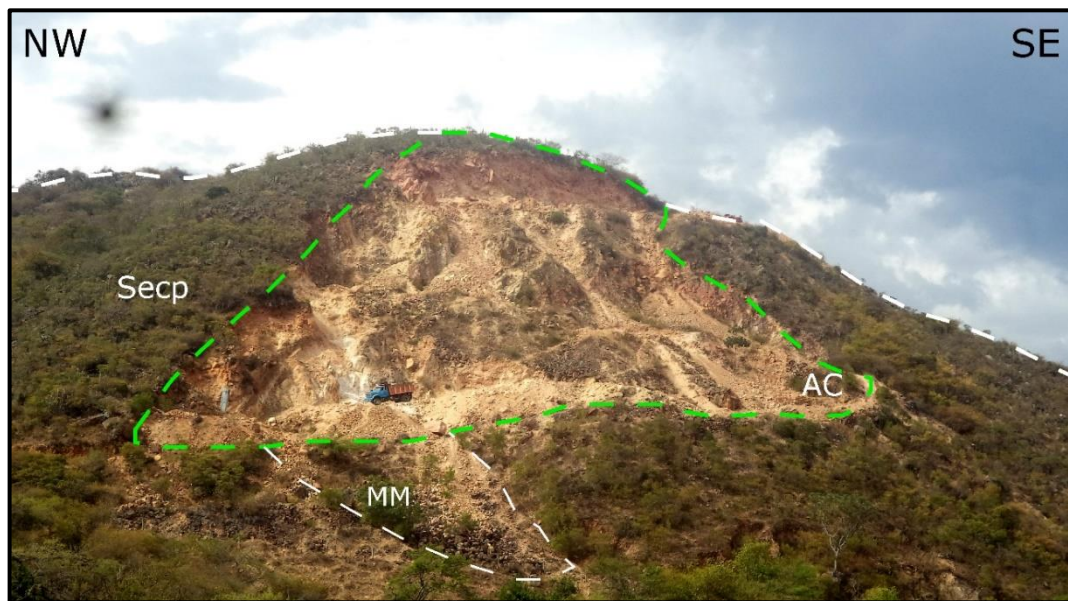
La tabla anterior indica que las terrazas agrícolas (Ata) son las geoformas antropogénicas de mayor extensión en la zona de estudio, mientras que las canteras (Ac) son las de menor extensión; esto se representa mejor en la **Figura 72**. Esto también es correlacionable con la cantidad de geoformas presentes en la zona de estudio, siendo las terrazas agrícolas las de mayor cantidad y las canteras las de menor cantidad. A continuación, se realiza una descripción de cada una de las unidades geomorfológicas originadas en este ambiente.

Figura 72. Área de influencia de las unidades geomorfológicas antropogénicas de la plancha 136-II-C.



➤ **Cantera (Ac).** En la zona de estudio no existe una explotación minera activa a gran escala, por lo que las dos canteras identificadas corresponden a extracción minera ilegal a pequeña escala realizada por métodos artesanales. Estas canteras se localizan en la Vereda El Juncal del Municipio de Enciso y en la Vereda Salado Bravo del Municipio de San José de Miranda, esta última se encuentra asociada morfológicamente a un deslizamiento de tipo traslacional como se puede observar en la **Figura 73**.

Figura 73. Cantera (Ac) de la vereda Salado Bravo. Margen Norte de la Quebrada El Salado. Se observa la cantera para la extracción de areniscas de la Formación Los Cuervos dentro de un escarpe en contra pendiente; alrededor se observan las unidades fluviales (Ftee y Fte), denudaciones (Deem) y Estructurales (Sshlc).



Dichas canteras corresponden a excavaciones escarpadas (<math><40^\circ</math>) con una altura promedio de 50 metros, de formas irregulares y dispuestas en terracedos hechos en laderas para la extracción de rocas clásticas consolidadas de edad Terciaria asociadas a la Formación Carbonera (Tec) en la vereda El Juncal y a la Formación Los Cuervos (Tplc) en la vereda Salado Bravo, las cuales tienen en común bancos

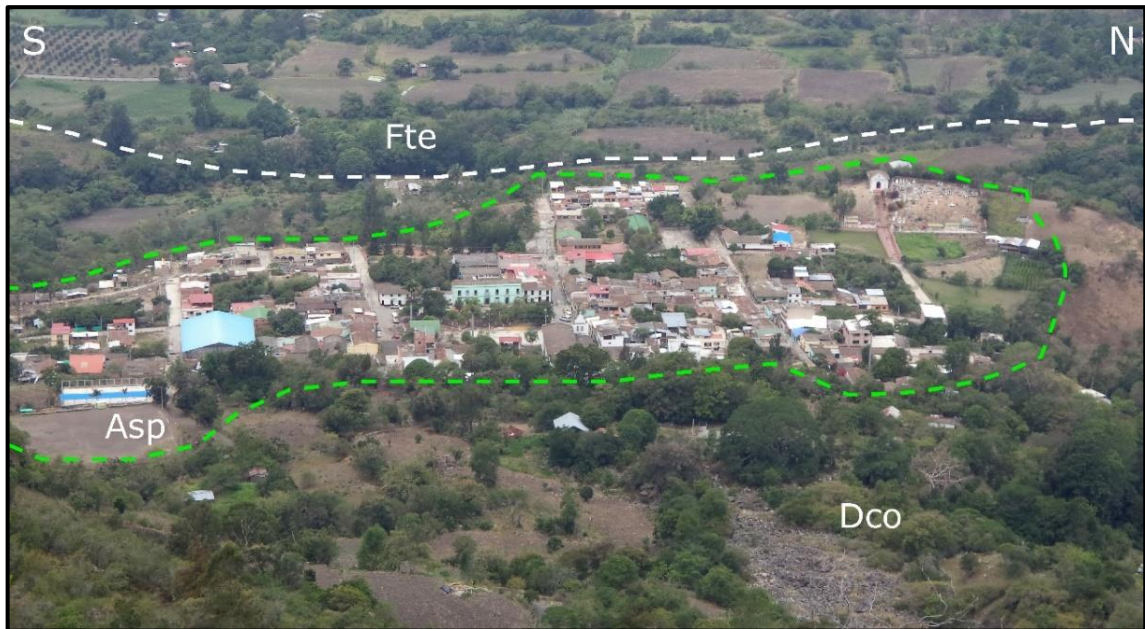
de areniscas de grano fino, destinados para la construcción y recebo vial. No presentan vegetación.

Cabe resaltar que cerca de la cantera de la Vereda El Juncal, Vereda Agua Sucia y en otras veredas del Municipio de Enciso, se observaron canteras destinadas principalmente a la explotación de carbón; sin embargo, estas geoformas no fueron cartografiadas debido a que no cumplían con el área mínima para la escala de este trabajo.

➤ **Superficies de explanación (Asp).** Planos de allanamiento realizados en laderas de sustrato rocoso y/o materiales inconsolidados, con el fin de adecuar el terreno para la construcción de asentamientos humanos o con fines de estabilización de laderas, mediante la explanación o terraceos que disminuyen la pendiente del terreno (Carvajal et al., 2012). En la zona de estudio las superficies de explanación corresponden únicamente al área comprendida por los cascos urbanos y corregimientos de los municipios; dicho lo anterior, se identificaron cuatro superficies de explanación, las cuales reposaban sobre sustratos de rocas clásticas consolidadas moderadamente duras de la Formación Colón – Mito Juan, como es el caso del Corregimiento El Tobal; sustratos rocosos de rocas clásticas consolidadas moderadamente duras de la Formación Paleozoico del Río Nevado, como es el caso de la Cabecera Municipal de Carcasí, materiales inconsolidados de origen coluvial, como es el caso del casco urbano del Municipio de Enciso cuya panorámica se puede observar en la **Figura 74**, y materiales inconsolidados de origen aluvial, como es el caso del Corregimiento de Peña Colorada. Dichos asentamientos presentan principalmente pendientes planas menores a 7°, sin embargo, en algunos sectores alcanzan a tener 20° de inclinación; además, las cabeceras municipales de los municipios cubren aproximadamente 0,1 km² de área, con longitudes promedio de 300 metros; mientras que los corregimientos cubren tan sólo 0,02 km², con longitudes promedio de 180 metros. Estas geoformas no se

encuentran asociados a movimientos en masa; esto puede deberse a su bajo grado de rugosidad y pendiente acompañados de una resistencia alta del material.

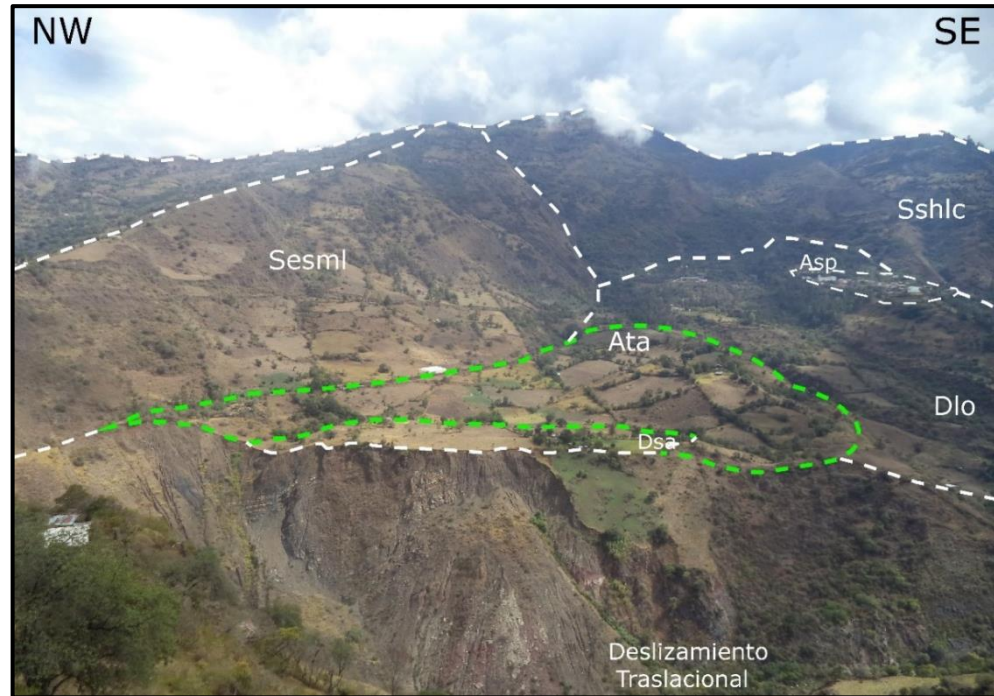
Figura 74. Panorámica de la superficie de explanación (Asp) correspondiente la Cabecera Municipal de Enciso. Se observa el Casco Urbano del Municipio de Enciso, dispuesto sobre depósitos coluviales; al fondo de la foto se observa la terraza de erosión (Fte).



➤ **Terrazas Agrícolas (Ata).** Son escalones contruidos por el hombre usando la misma tierra del lugar “in situ” con el fin de realizar sus actividades agrícolas. Las terrazas son hechas con el objeto de que los suelos inclinados puedan usarse con cultivos agrícolas o plantaciones forestales, sin que la tierra sea arrastrada por el agua (Carvajal et al., 2012). Se identificaron un total de 11 terrazas agrícolas cartografiables, cubriendo un total de 0,4 Km² aproximadamente; estas terrazas están localizadas en los municipios de San José de Miranda, Enciso y en las veredas Saucara, Buenavista y Centro de Carcasí como se observa en la **Figura 75**. Dichas terrazas yacen sobre laderas de sierras homoclinales, principalmente en laderas cuya estratificación iba a favor de la pendiente. Las terrazas se encuentran asociadas a diferentes litologías y presentan pendientes muy inclinadas a abruptas,

entre 10° y 40°, con escasos sectores planos, lo cual dificulta el desarrollo de dichas actividades y aumenta la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Figura 75. Panorámica de las Veredas Saucara, Buenavista y Centro del Municipio de Carcasí. Se observa una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc) sobre la cual se desprende perpendicularmente un espolón moderado de longitud larga (Sesml) y una ladera ondulada (Dlo), sobre esta última se encuentran las terrazas agrícolas (Ata).



9.4. MORFODINÁMICA

Los procesos morfodinámicos modelan la superficie terrestre a través de los diferentes agentes morfogenéticos (precipitación, temperatura, viento, agua y acción antrópica), los cuales están asociados a procesos como la meteorización y erosión de las rocas, el transporte de los materiales removidos y la sedimentación de dichos materiales. En consecuencia, la denudación, se considera un proceso morfodinámico externo, que al implicar los agentes morfogenéticos previamente

descritos, se encuentra fuertemente relacionado a la ocurrencia de movimientos en masa.

El análisis morfodinámico de la plancha 136-II-C se realizó según la metodología y los lineamientos propuestos en el “Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas” y el “Grupo de Estándares para Movimientos en Masa”, PMA – GEMMA (2007), información reflejada en los formatos modificados para inventario (Ver **Anexo B**) y catálogo de movimientos en masa (Ver **Anexo C**)

La caracterización realizada durante la fase de campo del proyecto, permitió identificar un total de 28 movimientos en masa, de los cuales 10 movimientos fueron registrados como inventario en la **Tabla 23** y 18 movimientos como catálogo en la **Tabla 24**. Dichos movimientos, sumados a los 29 movimientos en masa registrados en la base de datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) para la zona de estudio (Ver **Anexo H**), consolidaron los 57 MM representados en el mapa de movimientos en masa de la plancha 136-II-C como se observa en la **Figura 76**. Cabe resaltar que los movimientos en masa identificados en campo serán registrados en la plataforma SIMMA del Servicio Geológico Colombiano (SGC), contribuyendo de tal forma con la ampliación de la base de datos del SIMMA, aportando información útil y de calidad, para futuros proyectos de amenaza y gestión del riesgo y esquemas de ordenamiento de los municipios involucrados.

Tabla 23. Inventario de MM de la plancha 136-II-C identificados en campo.

MM	TIPO DE MOVIMIENTO	X	Y	VEREDA	MUNICIPIO
JR-I1	Deslizamiento traslacional planar	1'150.945 E	1'221.992 N	El Juncal	Enciso
JR-I2	Deslizamiento traslacional	1'150.400 E	1'224.988 N	Salado Bravo	San José de Miranda
JR-I3	Flujo de lodo	1'153.368 E	1'225.111 N	Loma El Negro	Enciso

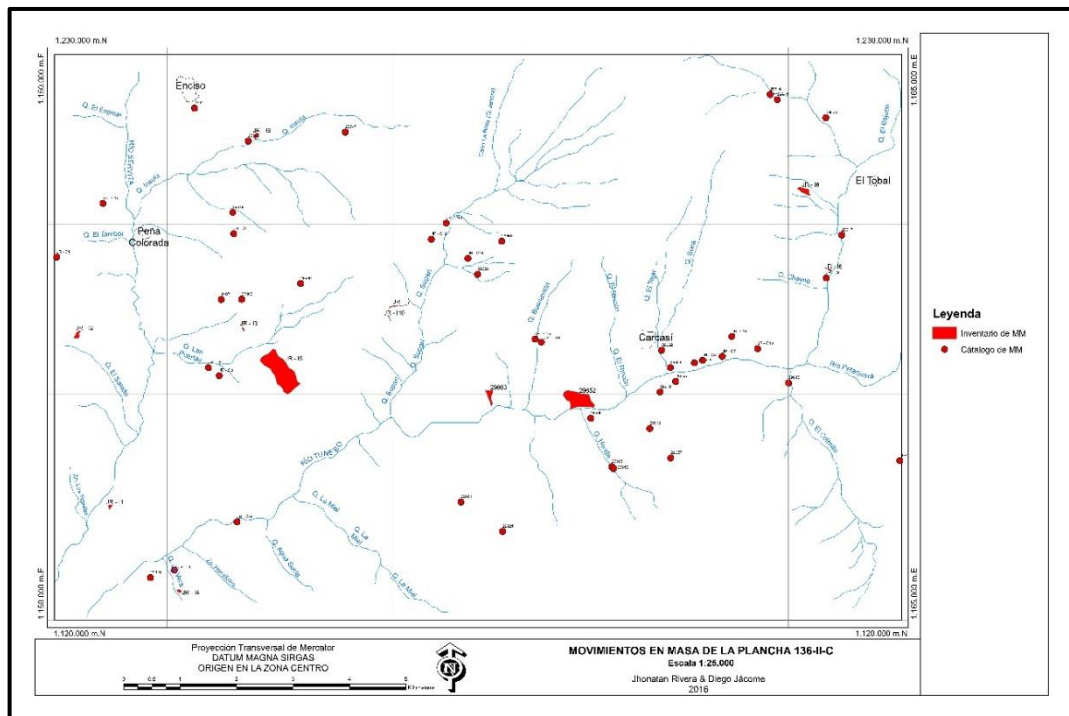
JR-I4	Deslizamiento traslacional planar	1'152.186 E	1'220.515 N	Cenacuta	San Miguel
JR-I5	Deslizamiento rotacional	1'153.695 E	1'224.715 N	Loma El Negro	Enciso
JR-I6	Deslizamiento rotacional	1'163.728 E	1'226.181 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-I7	Deslizamiento traslacional	1'155.927 E	1'225.526 N	Puertas	Enciso
JR-I8	Deslizamiento traslacional	1'164.508 E	1'226.753 N	Victarigua	Carcasí
JR-I9	Deslizamiento traslacional	1'153.583 E	1'228.568 N	Villeta	Enciso
JR-I10	Deslizamiento traslacional en cuña	1'155.937 E	1'225.345 N	Puertas	Enciso

Tabla 24. Catálogo de MM de la plancha 136-II-C identificados en campo.

MM	TIPO DE MOVIMIENTO	X	Y	VEREDA	MUNICIPIO
JR-C1	Deslizamiento traslacional	1'150.047 E	1'226.420 N	Salado Bravo	San José de Miranda
JR-C2	Deslizamiento traslacional	1'152.732 E	1'224.466 N	Loma El Negro	Enciso
JR-C3	Deslizamiento rotacional	1'152.925 E	1'224.325 N	Loma El Negro	Enciso
JR-C4	Deslizamiento traslacional	1'153.180 E	1'226.835 N	Carrizal	Enciso
JR-C5	Caída de roca	1'152.130 E	1'220.885 N	Cenacuta	San Miguel
JR-C6	Deslizamiento traslacional	1'163.673 E	1'226.051 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-C7	Deslizamiento traslacional	1'161.831 E	1'224.664 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-C8	Deslizamiento traslacional	1'161.484 E	1'224.594 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-C9	Deslizamiento trasl. planar	1'161.339 E	1'224.551 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-C10	Deslizamiento trasl. en cuña	1'162.457 E	1'224.802 N	Cruz G. y Garbanzal	Carcasí
JR-C11	Deslizamiento traslacional	1'162.000 E	1'225.017 N	Victarigua	Carcasí
JR-C12	Deslizamiento rotacional	1'156.678 E	1'226.737 N	Puertas	Enciso

JR-C13	Deslizamiento rotacional	1'156.944 E	1'227.023 N	Robles	Enciso
JR-C14	Deslizamiento traslacional	1'157.327 E	1'226.398 N	Saucara	Carcasí
JR-C15	Deslizamiento traslacional	1'158.515 E	1'224.971 N	Saucara	Carcasí
JR-C16	Deslizamiento traslacional planar	1'158.627 E	1'224.918 N	Saucara	Carcasí
JR-C17	Deslizamiento traslacional	1'150.865 E	1'227.370 N	Espinal	San José de Miranda
JR-C18	Deslizamiento traslacional	1'153.238 E	1'221.740 N	Cenacuta	San Miguel

Figura 76. Movimientos en masa de la plancha 136-II-C.



A continuación se presentan las fotografías de los MM de mayor importancia en la zona de estudio, correspondientes a la **Figura 77**, la **Figura 78** y la **Figura 79**.

Figura 77. Flujo de lodo (DI). (JR-13). Asociado a la la Formación La Luna (Ksl) localizado en la Vereda Loma El Negro del municipio de Enciso.



Figura 78. Deslizamiento traslacional de detritos (Dtd) y Flujo de detritos (FI). (JR-17). Asociado a la Formación Aguardiente (Kia) localizado en la Vereda Puertas del Municipio de Enciso. El movimiento afectó parte de la vía que comunica el Municipio de Enciso con Carcasí.



Figura 79. Deslizamiento traslacional en cuña (Dtc). (JR-I10). Producto del alto buzamiento y fracturamiento de las rocas de la Formación Aguardiente (Kia) localizado en la Vereda Puertas del Municipio de Enciso.



9.4.1. Análisis Estadístico. Con el fin de conocer las principales características morfodinámicas que predominan sobre los movimientos en masa de la plancha 136-II-C, tanto de tipo inventario como de tipo catálogo, se presentan a continuación gráficos y datos estadísticos que generen una visión esquematizada y simplificada de las veredas y municipios donde se presentaron dichos eventos, así como de los parámetros que los caracterizan, como el tipo y subtipo del movimiento, el tipo de material, la actividad del movimiento (Edad, Estado, Estilo, Distribución), litologías y geoformas asociadas.

9.4.1.1. Inventario de Movimientos en Masa (IMM)

➤ **Localización del movimiento.** Los 10 movimientos registrados en calidad de inventario se localizan en 4 municipios como muestra la **Figura 80**; siendo el Municipio de Enciso el que más presenta, con 6 registros distribuidos en las veredas

Villetas, Puertas, Loma Del Negro y El Juncal; seguido del Municipio de Carcasí con 2 registros distribuidos en las veredas Victarigua y Cruz Grande y Garbanza (Ver **Figura 81**), mientras que los municipios de San Miguel y San José de Miranda tan sólo presentan un MM cada uno.

Figura 80. Densidad del IMM dela plancha 136-II-C por municipios.

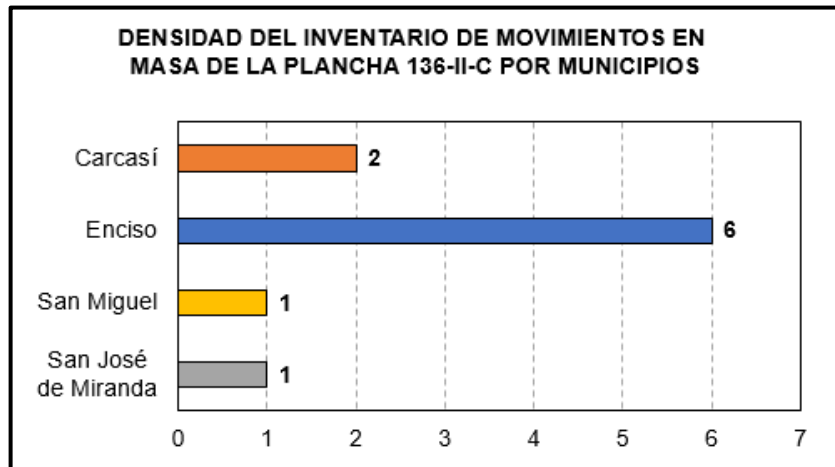
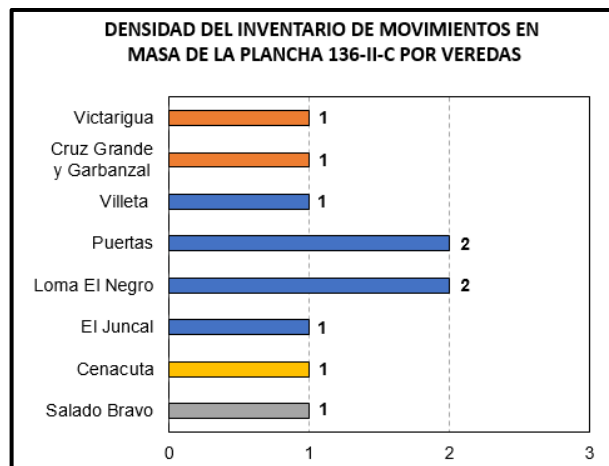


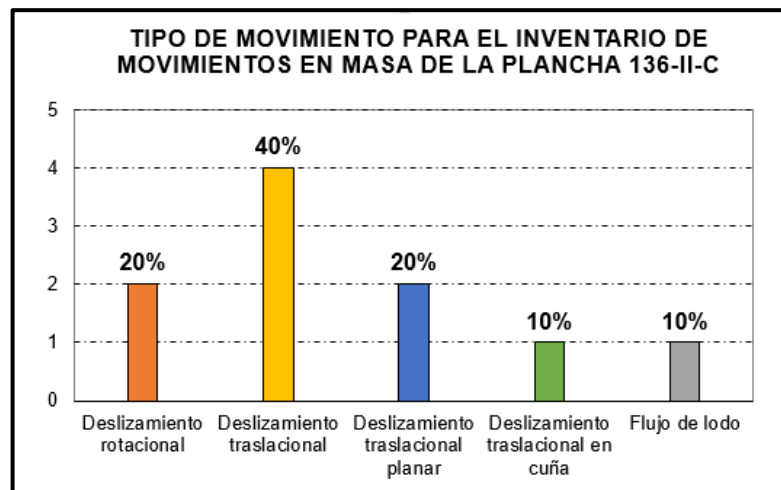
Figura 81. Densidad del IMM de la plancha 136-II-C por veredas.



➤ **Tipo de movimiento.** Los deslizamientos traslacionales se presentan como el tipo de movimiento en masa predominante en la zona de estudio, con una frecuencia

de 4 eventos, los cuales equivalen al 40% de los movimientos de inventario de la plancha; los deslizamientos rotacionales y traslacionales planares representan el segundo tipo de movimiento con mayor frecuencia dentro de la zona de estudio con 2 eventos cada uno, que equivalen al 20%; mientras que el tipo de deslizamiento traslacional en cuña (6%) y caída de roca (6%) tan solo se presentan una vez (Figura 82).

Figura 82. Tipo de movimiento para el IMM de la plancha 136-II-C.



➤ **Actividad del movimiento.** Está definida por las características de Estado, Estilo y Distribución. Dentro de los movimientos en calidad de inventario predominan aquellos que presentan un estado latente con un 40%, seguido del estado activo (30%), suspendido (20%), y en menor proporción el estado abandonado con un 11% (Figura 83).

Por otro lado, el estilo compuesto es el más frecuente en la zona de estudio, con una frecuencia de 4 movimientos (40%); los estilos múltiples y únicos, con una frecuencia de 2 cada uno (20%), representan los segundos estilos de mayor frecuencia; mientras que los estilos sucesivos y complejos tan solo se presentan una vez cada uno (10%) (Figura 84).

Con respecto a la distribución, la distribución ensanchada es la más frecuente (40%) de la zona de estudio, en segundo lugar, se encuentran las distribuciones retrogresivas y confinadas (20%), mientras que las distribuciones decreciente y móvil tan solo la presentan el 10% de los movimientos de inventario (**Figura 85**).

Figura 83. Estado de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.

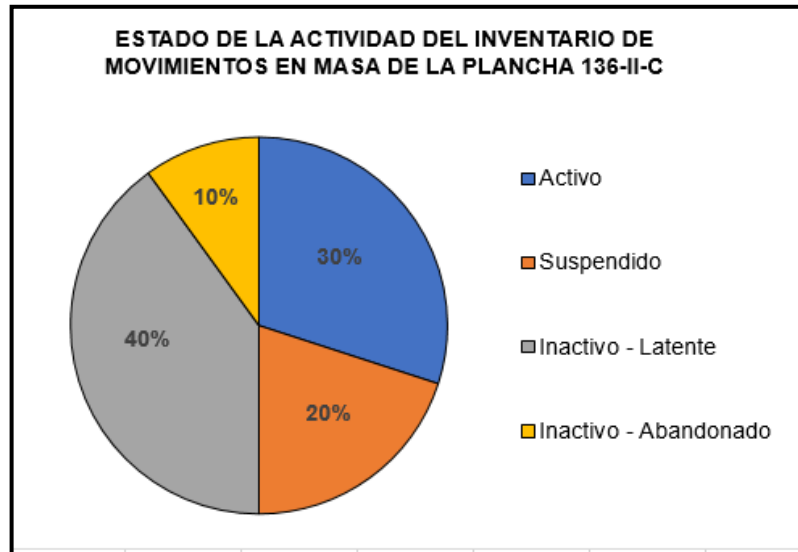


Figura 84. Estilo de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.

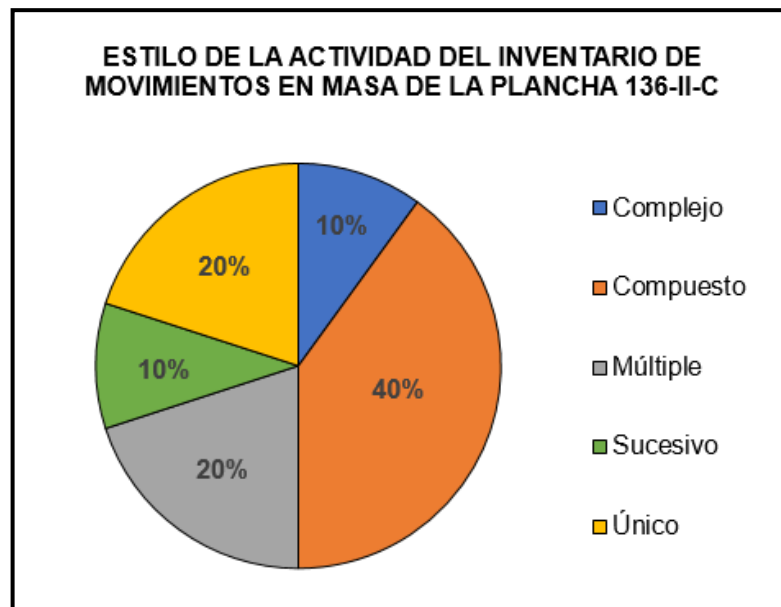
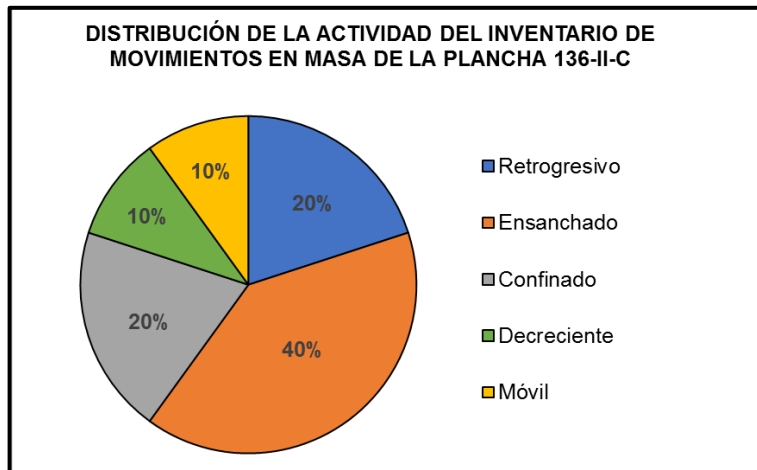


Figura 85. Distribución de la actividad del IMM de la plancha 136-II-C.



➤ **Tipo de material y erosión asociada.** El material constituyente desplazado ladera abajo que predomina en los movimientos en masa de tipo inventario son los materiales de detritos con un 80% de ocurrencia; mientras que los materiales de roca y tierra tan sólo se presentan una vez con una frecuencia relativa de 10% cada uno (**Figura 86**). Por otra parte, dentro del tipo de erosión (**Figura 87**), se destaca la erosión laminar con un 50%, seguida de surcos y cárcavas (40%) y en menor proporción hondonadas y tierras malas (10%).

Figura 86. Tipo de material del IMM de la plancha 136-II-C.

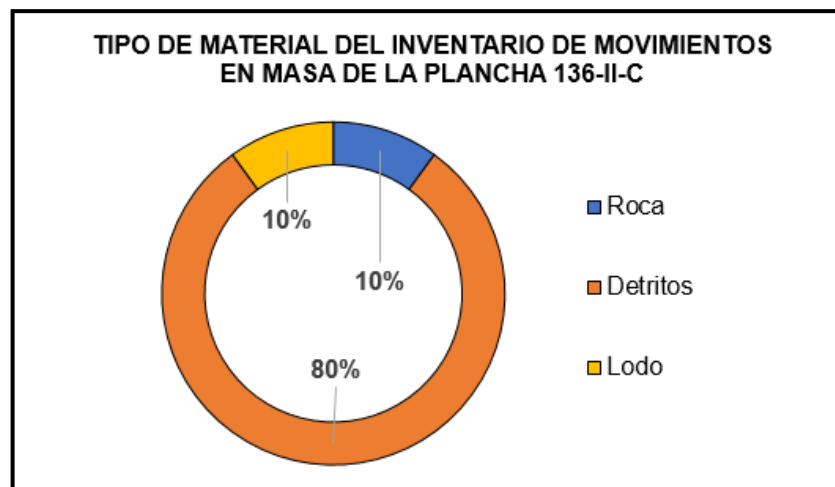
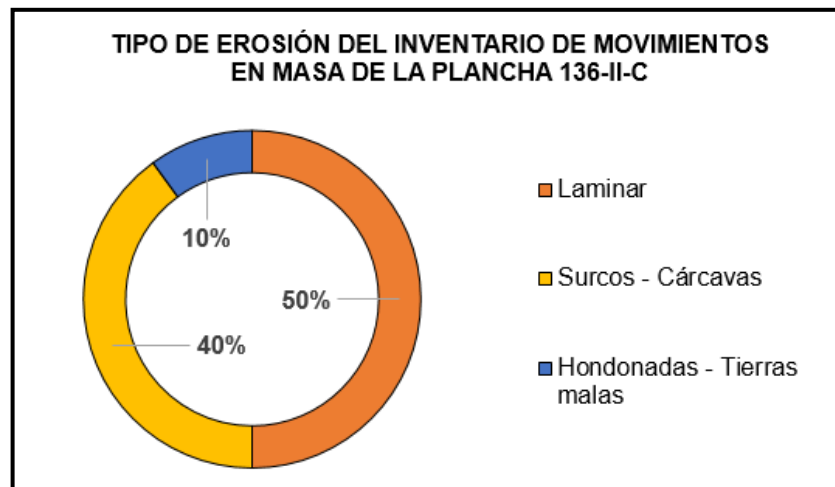


Figura 87. Tipo de erosión del IMM de la plancha 136-II-C.



➤ **Litología asociada.** Dentro de las unidades estratigráficas con mayor importancia dentro de la ocurrencia de movimientos en masa de tipo catálogo, evidenciadas en la **(Figura 88)**, se tienen rocas con resistencia dura y textura clástica cementada de la Formación Aguardiente (50%) y rocas de resistencia moderadamente dura y textura clástica consolidada de la Formación Los Cuervos (20%). En menor proporción se tienen rocas de resistencia moderadamente dura a dura y texturas cristalinas masivas y clásticas consolidadas de la Formación Colón-Mito Juan, La Luna y Capacho; donde cada una de ellas sólo se presenta en un movimiento en masa, representando así el 10%.

➤ **Unidad geomorfológica asociada del IMM de la plancha 136-II-C.** La **Figura 89** permite observar que los movimientos en masa tipo inventario de la plancha 136-II-C tienden a desarrollarse sobre laderas en contrapendiente de sierra homoclinal, con un 30% de incidencia; en segundo lugar, se desarrollan sobre lomas anticlinales (20%); mientras que en las geoformas de ladera estructural de sierra sinclinal, escarpe de contrapendiente, cono de flujo indiferenciado, espolón festoneado bajo de longitud larga y cono de deslizamiento rotacional; solo se presentan una vez en cada una de ellas (10%).

Figura 88. Litología asociada del IMM de la plancha 136-II-C.

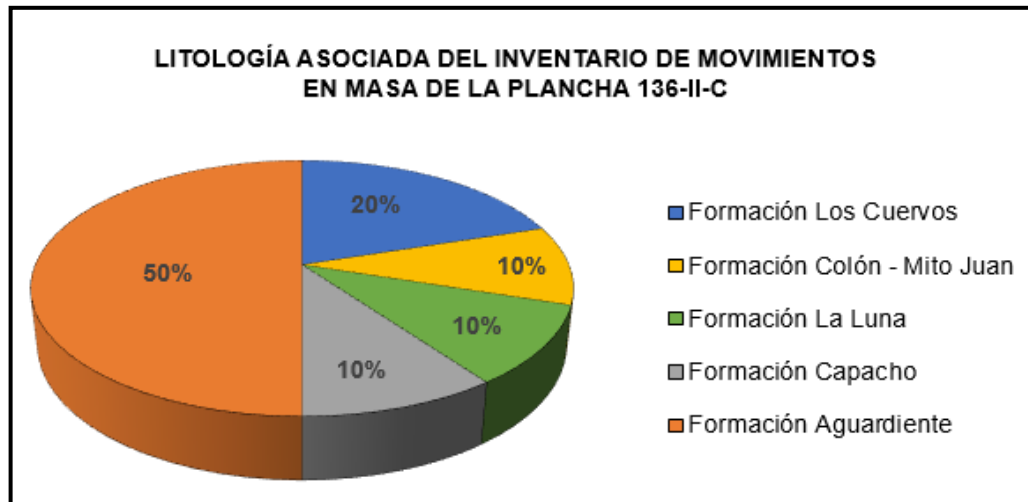
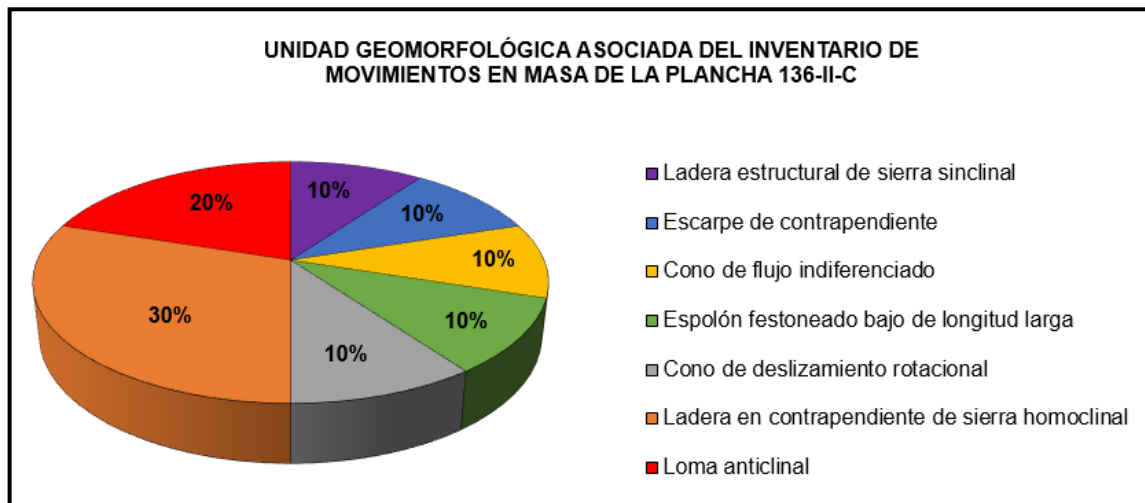


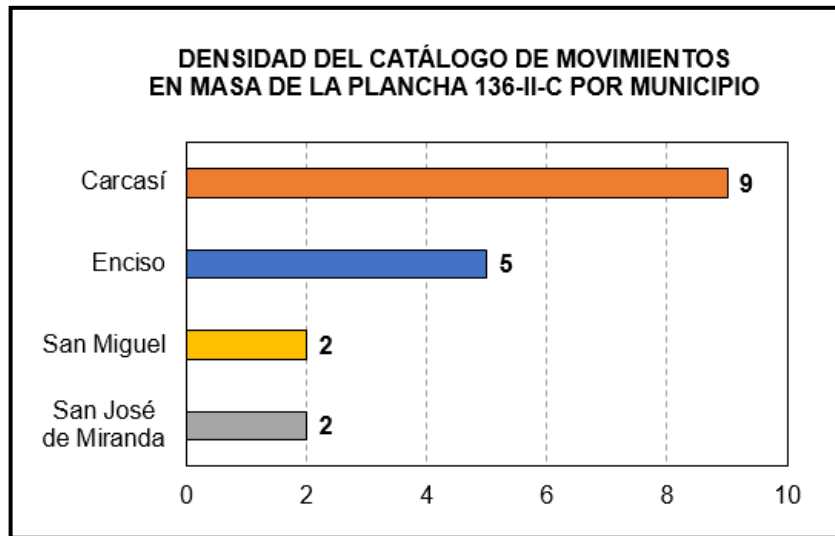
Figura 89. Unidad geomorfológica asociada del IMM de la plancha 136-II-C.



9.4.1.2. Catálogo de Movimientos en Masa (CMM)

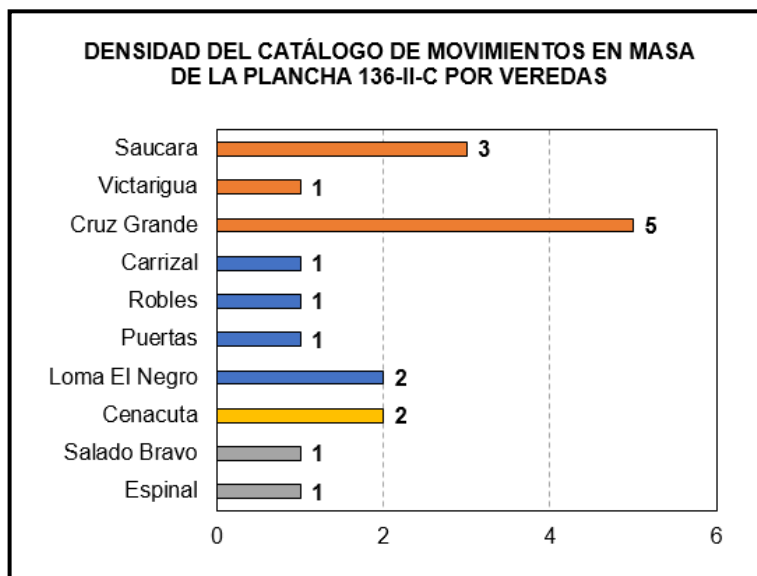
➤ **Localización del movimiento.** Los 18 movimientos registrados en calidad de catálogo se localizan en 4 municipios; siendo el Municipio de Carcasí el que más presenta este tipo de desastre natural, con 9 registros distribuidos en las veredas Saucara, Victarigua y Cruz Grande y Garbanzal.

Figura 90. Densidad del CMM de la plancha 136-II-C por municipios.



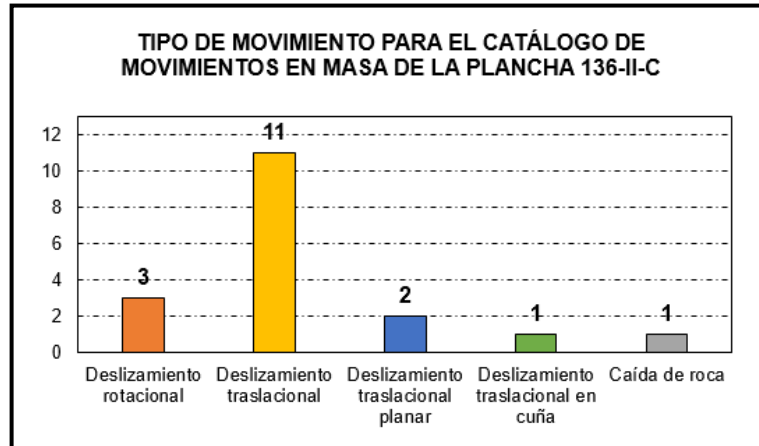
En segundo lugar el Municipio de Enciso presenta 5 registros distribuidos en las veredas Carrizal, Robles, Puertas y Loma Del Negro; mientras que los municipios de San Miguel y San José de Miranda tan sólo presentan en su jurisdicción, dos movimientos en masa cada uno (**Figura 90 y 91**).

Figura 91. Densidad del CMM de la plancha 136-II-C por veredas.



➤ **Tipo de movimiento.** Los deslizamientos traslacionales se presentan como el tipo de movimiento en masa predominante en la zona de estudio, con una frecuencia de 11 eventos, los cuales equivalen al 61% de los movimientos de catálogo de la plancha.

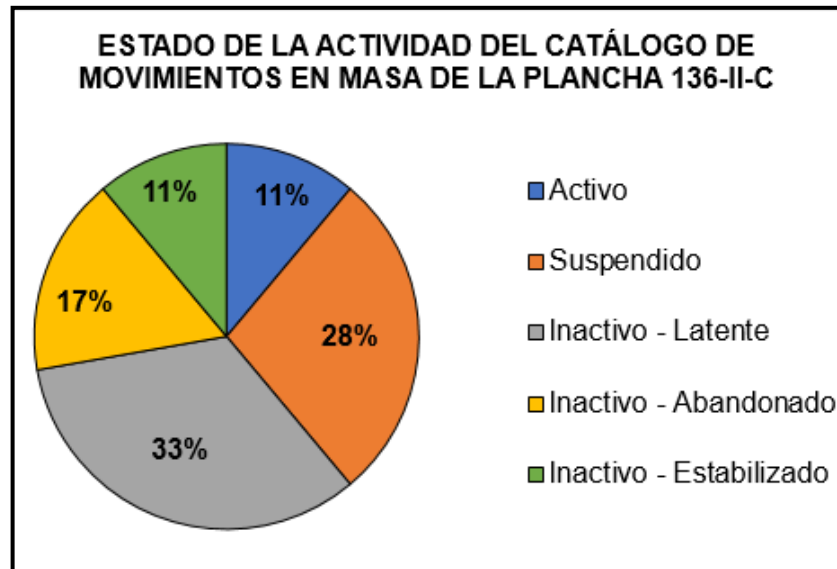
Figura 92. Tipo de movimiento para el CMM de la plancha 136-II-C.



Los deslizamientos rotacionales representan el segundo tipo movimiento con mayor frecuencia dentro de la zona de estudio con 3 eventos que equivalen al 16%, mientras que otros tipos de movimiento se presentan en menor proporción como lo son 2 deslizamientos traslacionales planares (11%), 1 deslizamiento traslacional en cuña (6%) y una caída de roca (6%) (**Figura 92**).

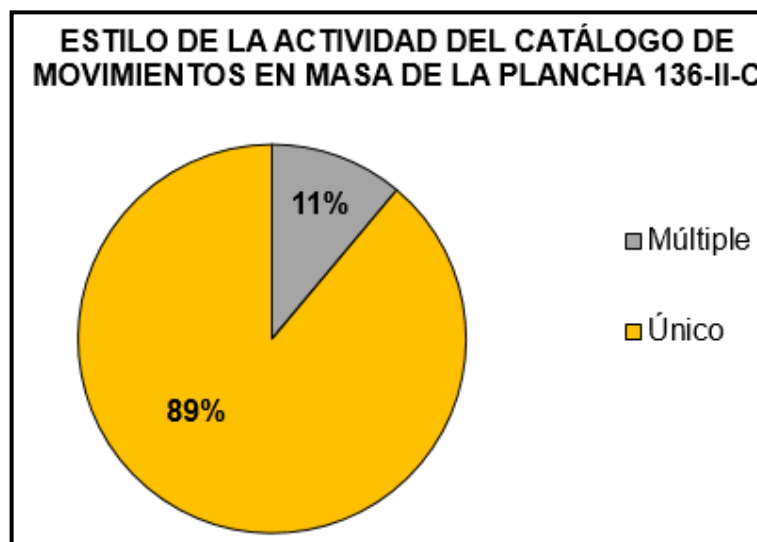
➤ **Actividad del movimiento.** Está definida por las características de Estado, Estilo y Distribución. Dentro de los movimientos en calidad de catálogo predominan aquellos que presentan un estado latente con un 33%, seguido del estado suspendido (28%), abandonado (17%), y en menor proporción los estados activo y estabilizado con un 11% cada uno (**Figura 93**).

Figura 93. Estado de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.



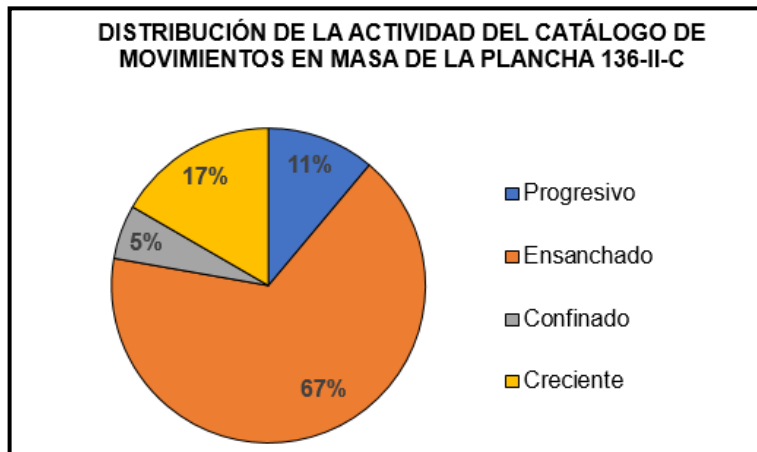
Por otro lado, sólo existe dos estilos, el estilo único lo presentan 16 movimientos (89%); mientras que el estilo múltiple lo presentan solo 2 movimientos (11%) (**Figura 94**).

Figura 94. Estilo de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.



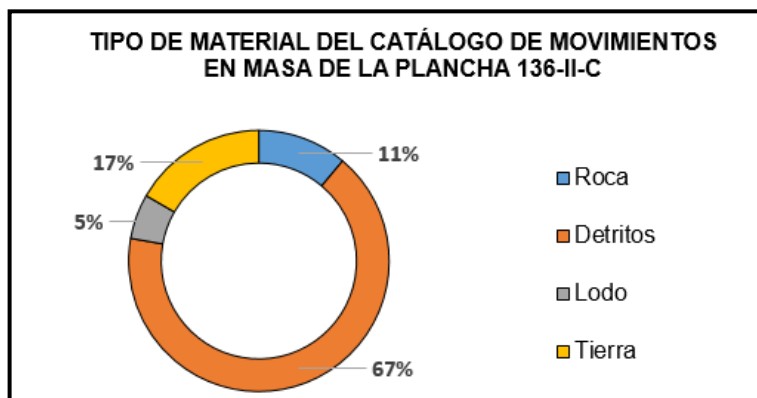
Con respecto a la distribución, la distribución ensanchada es la más frecuente (89%), seguida de la distribución creciente (17%), progresivo (11%) y confinado (5%) (**Figura 95**).

Figura 95. Distribución de la actividad del CMM de la plancha 136-II-C.



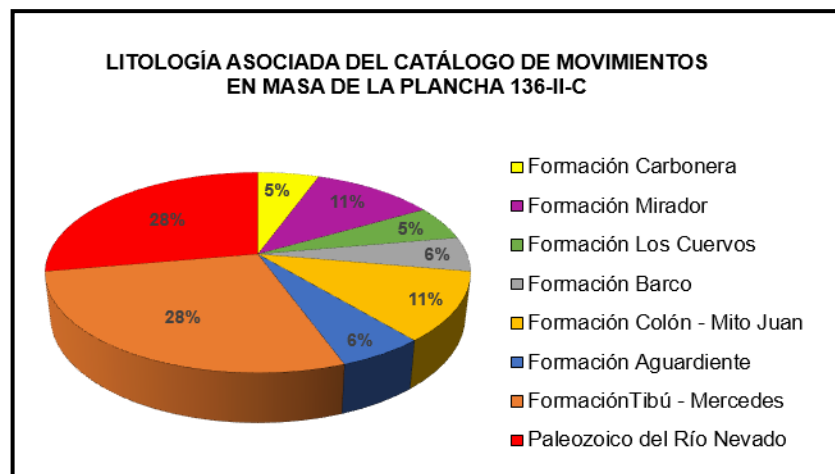
➤ **Tipo de material.** El material constituyente desplazado ladera abajo que predomina en los movimientos en masa de tipo catálogo son los detritos con un 67% de ocurrencia; el segundo con mayor relevancia consiste en material fino correspondiente a tierra con un 17%, y en menor proporción se encuentra roca (11%) y lodo (5%); como se observa en la (**Figura 96**).

Figura 96. Tipo de material del CMM de la plancha 136-II-C.



➤ **Litología asociada.** Dentro de las unidades estratigráficas con mayor importancia dentro de la ocurrencia de movimientos en masa de tipo catálogo, evidenciadas en la **(Figura 97)**, se tienen rocas con resistencia dura y textura cristalina masiva correspondientes a la Formación Tibú – Mercedes y rocas de resistencias moderadamente duras y textura clástica consolidada relacionada a la unidad del Paleozoico del Río Nevado, presentando 5 eventos cada unidad, equivalente al 28% respectivamente. En menor proporción se tienen rocas de resistencia dura y textura clástica cementada como lo son la Formación Mirador (11%), la Formación Barco (6%) y la Formación Aguardiente (6%), así como rocas con resistencia moderadamente duras como la Formación Colón – Mito Juan (11%), la Formación Los Cuervos (5%) y la Formación Carbonera (5%).

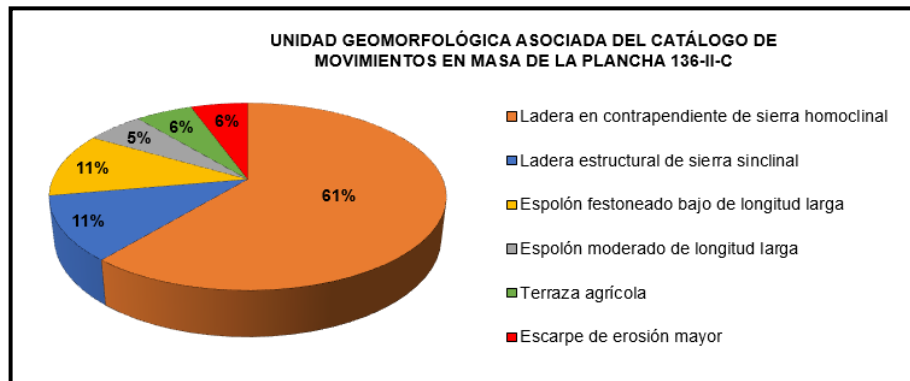
Figura 97. Litología asociada del CMM de la plancha 136-II-C.



➤ **Unidad geomorfológica asociada.** La **Figura 98** permite observar que los movimientos en masa tipo catálogo de la plancha 136-II-C tienden a desarrollarse sobre laderas en contrapendiente de sierra homoclinal, presentándose en un total de 11 eventos morfodinámicos, lo que equivale al 61% de movimientos en masa de la zona de estudio. En segunda relevancia se desarrollan sobre laderas estructurales de sierra sinclinal, correspondiente a 2 eventos morfodinámicos

(11%), al igual que sobre 2 espolones festoneados bajos de longitud larga; y en menor proporción un espolón moderado de longitud larga (5%), un escarpe de erosión mayor (6%) y una terraza agrícola (6%).

Figura 98. Unidad geomorfológica asociada del CMM de la plancha 136-II-C.



9.5. FACTORES CAUSANTES

El análisis de los factores causantes “atributos” es de vital importancia para comprender la relación entre la clase de un atributo y la ocurrencia de movimientos en masa en esta clase; cabe mencionar que esta relación varía dependiendo de la zona de estudio y, de la calidad y cantidad de información disponible en dicha zona. Los factores causantes, el número de clases y la escala a la que se capturó la información, son descritos en la **Tabla 25**. Las clases tipo “Float” de los atributos de Geología, Cobertura de la Tierra y Suelo fueron agrupados en clases enteras para un mejor análisis de los datos en la **Tabla 26**, sin embargo a la hora de ejecutar la red, fueron ingresadas la totalidad de sus “subclases”. Los mapas de atributos y movimientos en masa fueron rasterizados a 12,5 (tamaño de pixel), obteniendo así un total de 960000 pixeles para cada atributo y 3238 pixeles de movimientos en masa.

Tabla 25. Factores causantes.

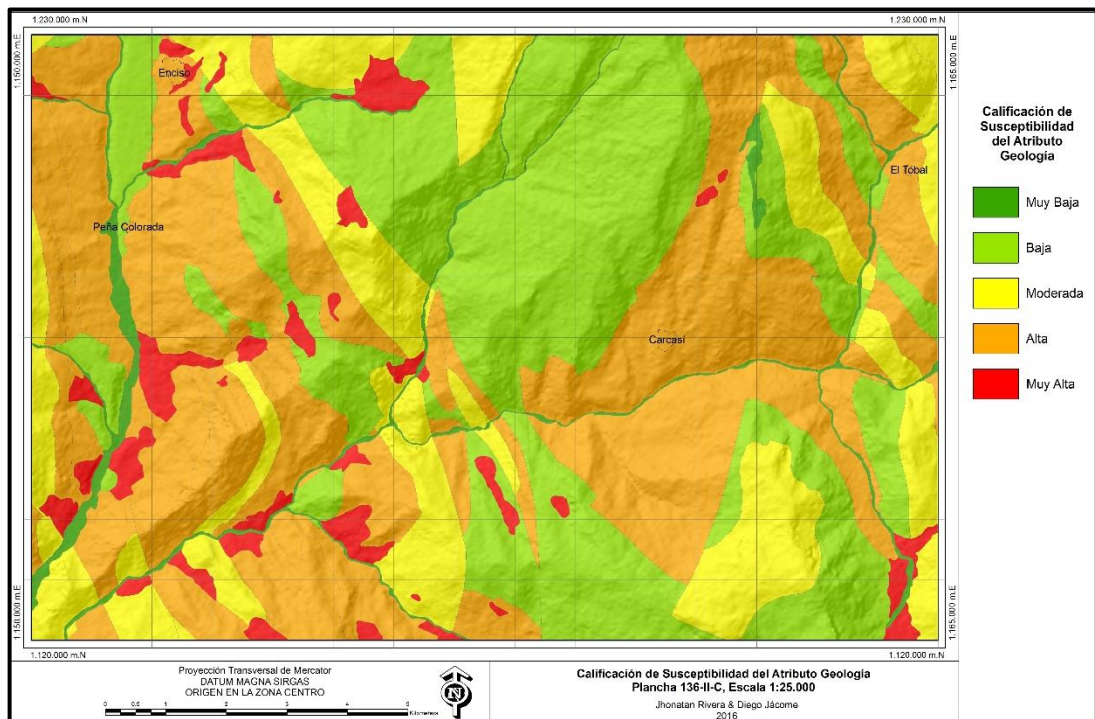
ATRIBUTO	NÚMERO DE CLASES	ESCALA
Geología	5	1:25.000
Densidad de Fracturamiento	5	1:25.000
Unidades Geológicas Superficiales	4	1:25.000
Morfogenética	4	1:25.000
Morfodinámica	5	1:25.000
Acuena	4	1:25.000
Curvatura	3	1:25.000
Pendientes	5	1:25.000
Rugosidad	5	1:25.000
Cobertura de la Tierra	4	1:100.000
Suelos	3	1:100.000

Tabla 26. Reclasificación en clases enteras de los atributos suelo, cobertura de la tierra y geología.

Factor	Clase	Subclase	Factor	Clase	Subclase	Factor	Clase	Subclase		
Suelo	2	1,93	Cobertura de la Tierra	2	2	Geología	1	1		
		2			3			2,25	2	1,45
	3	2,09		4			2,5	4		1,9
		2,36					2,75			2
		2,69			3		2,55			
		2,74			3,25		3			
		2,78			3,5		3,1			
	4	3,04		5	3,75		5	3,55		
		3,08			4			4		
		3,19			4,25			5		
		3,31								
		3,43								
		3,69								
	3,98									

9.5.1. Geología. A partir de la calificación de susceptibilidad del atributo de geología como se observa en la **Figura 99**, las zonas de muy baja susceptibilidad por geología en la plancha 136-II-C se asocian a depósitos lagunares, de cauce activo y de llanura de inundación las zonas de baja susceptibilidad incluyen depósitos de terraza aluvial y rocas (principalmente compuestas por calizas) de la Formación La Luna y Tibú-Mercedes; las zonas de susceptibilidad moderada por geología se asocian a depósitos de cono de deyección y rocas (principalmente compuestas por areniscas) de la Formación Barco, Aguardiente y Río Negro; las zonas de susceptibilidad alta incluyen depósitos de detritos producto de deslizamientos y flujos, y rocas (principalmente compuestas por lodolitas) de la Formación Carbonera, Mirador, Los Cuervos, Colón-Mito Juan, Capacho y Paleozoico del Río Nevado; Por último las zonas de susceptibilidad muy alta se asocian a depósitos coluviales.

Figura 99. Calificación de susceptibilidad del atributo Geología de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo de Geología (Ver **Tabla 27**, **Figura 100** y **Figura 101**) indican que la plancha 136-II-C presenta principalmente susceptibilidades altas (40,61%) y en segundo lugar susceptibilidades bajas (33,04%); mientras que las susceptibilidades moderadas (18,92%), muy altas (4,86%) y muy bajas (2,56%) no tienen gran influencia.

Tabla 27. Relación entre el factor causante Geología y la ocurrencia de MM.

Geología					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	24614	2,56	8	0,25	0,033
2	317190	33,04	253	7,81	0,080
3	181677	18,92	147	4,54	0,081
4	389818	40,61	2811	86,81	0,721
5	46701	4,86	19	0,59	0,041
Total	960000	100	3238	100	

Figura 100. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Geología.



Los movimientos en masa están relacionados en gran medida (86,81%) a las susceptibilidades altas; es decir, a las rocas cuya composición litológica está compuesta principalmente de lodolitas. Además, la relación entre el número de píxeles con MM en cada clase y el número de píxeles totales en cada clase “%C”

confirma que las rocas con litología predominantemente lodosa son las que más causan movimientos en masa. La elevada ocurrencia de MM en esta clase se asocia probablemente a la facilidad que presentan las lodolitas al proceso de meteorización y, a su propiedad de fisilidad (la cual se hace más notable en las arcillolitas).

Figura 101. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Geología.



9.5.2. Densidad de fracturamiento. El mapa de susceptibilidad del atributo densidad de fracturamiento (**Figura 102**), indica zonas de susceptibilidad altas y muy altas alrededor de los ejes de las fallas regionales de la plancha 136-II-C (Falla Quebrada Suparí, Falla Río Tunebo y Falla Servitá), especialmente en las zonas de intersección con fallas y pliegues locales.

La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo Densidad de Fracturamiento (Ver **Tabla 28**, **Figura 103** y **Figura 104**) indican que la plancha 136-II-C presenta principalmente susceptibilidades muy bajas (69,82%), es decir, zonas con muy baja densidad; y a medida que aumenta la densidad disminuye su porcentaje de incidencia en la plancha. Las zonas con densidad de fracturamiento bajo son las que presentan mayor cantidad de

movimientos en masa (42,90%), seguido de las densidades muy bajas (26,19%), medias (23,97%) y altas (6,95%); sin embargo, la relación entre el número de pixeles con MM en cada clase y el número de pixeles totales en cada clase “%C” indica que las densidades altas y medias son las que causan más movimientos en masa. También se observa que en la plancha no se asocian MM con zonas de densidades muy altas (susceptibilidad muy alta); esto no quiere decir que estas densidades no propicien la ocurrencia de MM, más bien, la escasa ocurrencia de MM puede deberse a la limitada cantidad de pixeles que cumplen con estas condiciones.

Figura 102. Calificación de susceptibilidad del atributo de Densidad de Fracturamiento de la plancha 136-II-C.

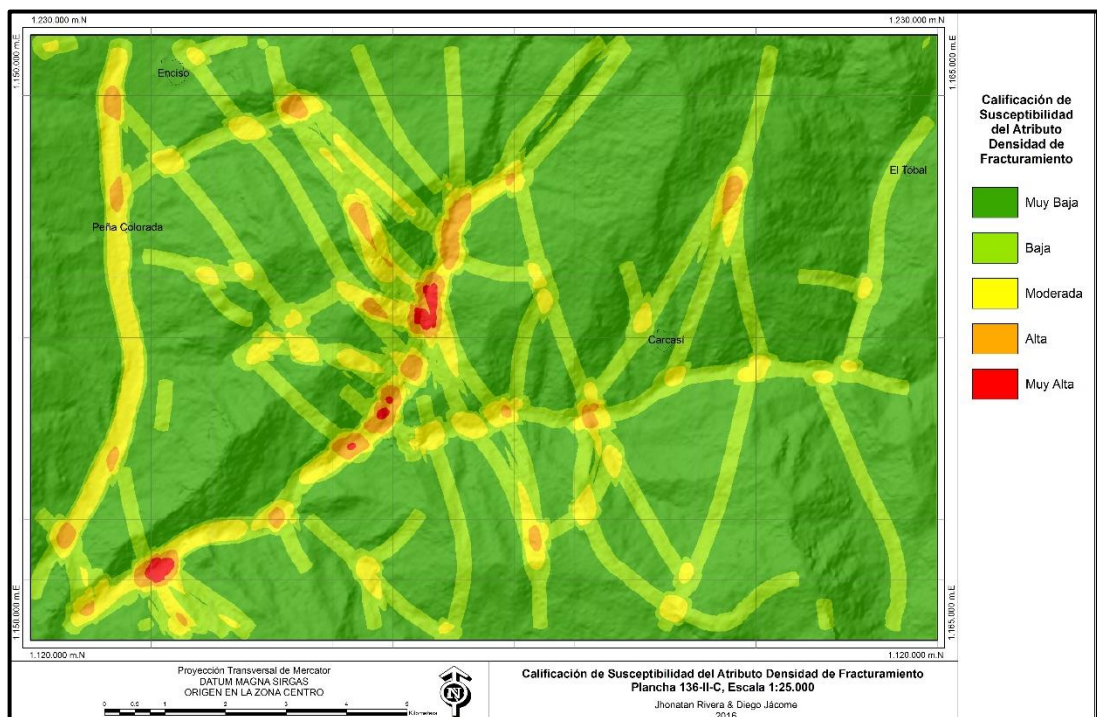


Tabla 28. Relación entre el factor causante Densidad de Fracturamiento y ocurrencia de MM.

DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	670275	69,82	848	26,19	0,13
2	200306	20,87	1389	42,90	0,69
3	70407	7,33	776	23,97	1,1
4	16537	1,72	225	6,95	1,36
5	2475	0,26	0	0	0
Total	960000	100	3238	100	

Figura 103. Relación entre el número de pixeles y las clases para el atributo de Densidad de Fracturamiento.

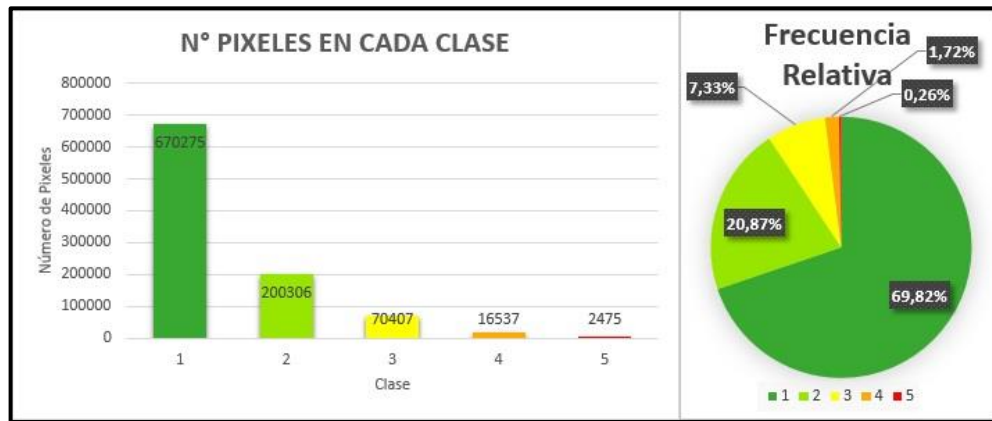
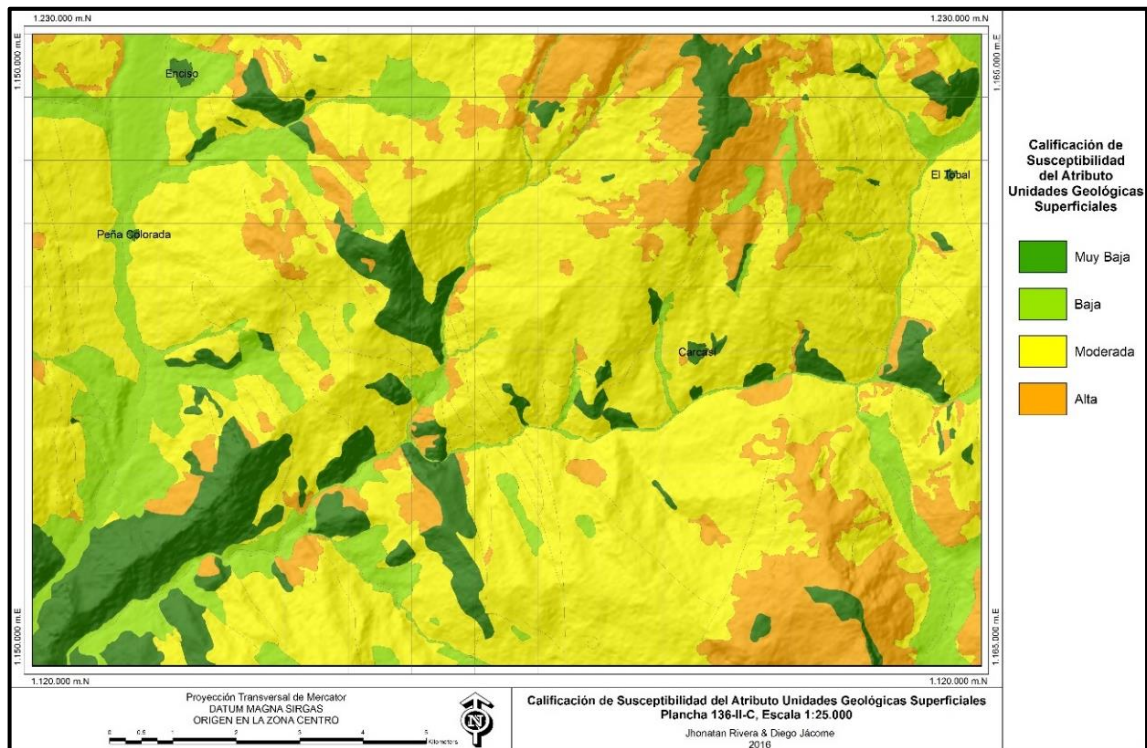


Figura 104. Relación entre el número de pixeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Densidad de Fracturamiento.



9.5.3. Unidades Geológicas Superficiales. Las UGS ofrecen información de calidad ya que permiten diferenciar entre zonas de roca expuesta y zonas donde se desarrollaron o depositaron suelos, estas zonas son importantes ya que son la base para realizar estudios de Unidades Geológicas Ingenieriles (UGI), ampliamente utilizados en la ZSMM; frecuentemente a escalas muy pequeñas. El mapa de susceptibilidad del atributo UGS (Figura 105), muestra que las susceptibilidades muy bajas, se encuentran ubicadas en las cabeceras municipales y corregimientos, así como en las rocas de las partes más elevadas de las sierras, y en menor proporción en sitios cercanos a los drenajes y las vías; donde la roca se presenta como producto de la erosión fluvial y la construcción vial respectivamente.

Figura 105. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales de la plancha 136-II-C.

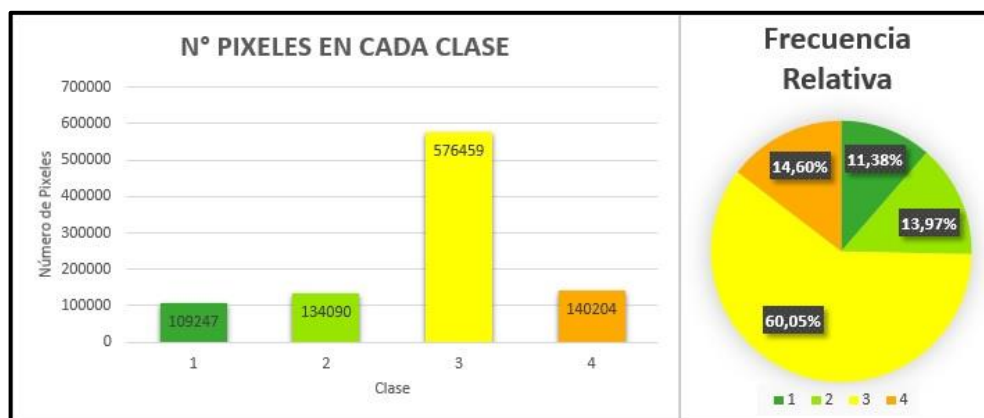


La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “UGS” (Ver **Tabla 29, Figura 106 y Figura 107**) indican que la plancha 136-II-C exhibe principalmente susceptibilidades moderadas por UGS (60,05%), o zonas con presencia de suelos residuales; seguido de suelos orgánicos (14,6%), suelos coluviales y “transportados” (13,97%) y, roca y suelos antropogénicos (11,38%).

Tabla 29. Relación entre el factor causante de UGS y la ocurrencia de MM.

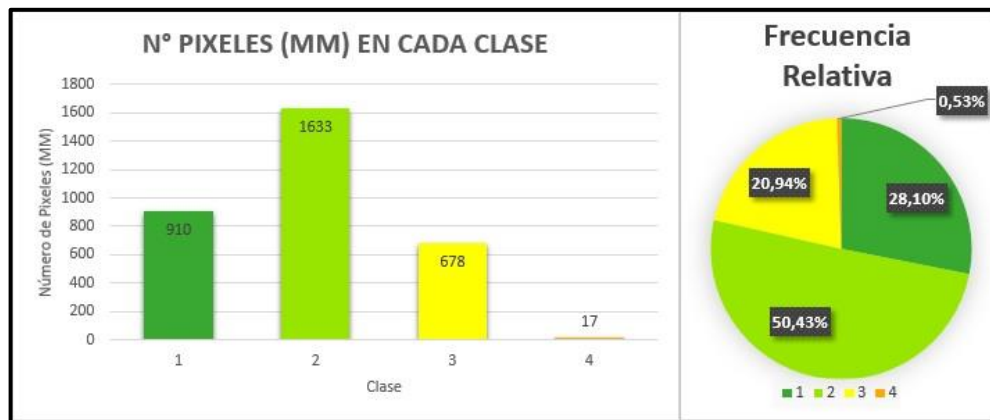
UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	109247	11,38	910	28,1	0,83
2	134090	13,97	1633	50,43	1,22
3	576459	60,05	678	20,94	0,12
4	140204	14,6	17	0,53	0,01
Total	960000	100	3238	100	

Figura 106. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales.



Las zonas que desarrollan suelos coluviales y “transportados” (susceptibilidad baja) son las que más causan MM (50,43%), esto también se comprueba al ser las zonas de mayor relación entre el número de píxeles con MM en esta clase y su número de píxeles totales (1,22%).

Figura 107. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Unidades Geológicas Superficiales.



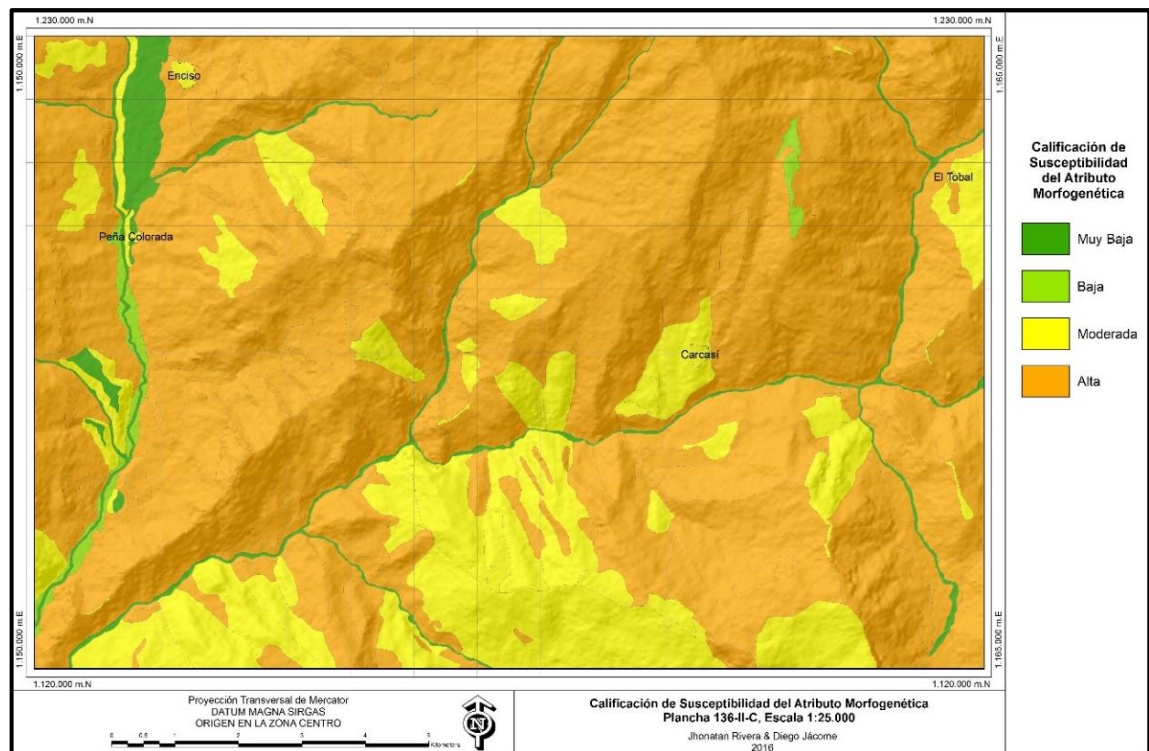
Las zonas de susceptibilidad muy baja (rocas) causan también un alto % de los MM de la plancha (28,1%); con menor influencia se encuentran los suelos residuales (20,94%), mientras que los suelos orgánicos parecen no causar movimientos en masa (0,53%), esto puede deberse a que este tipo de suelos suele desarrollar zonas de alta densidad de vegetación, lo que les permite adquirir una mayor resistencia.

Teniendo en cuenta el análisis anterior, se puede concluir que una calificación de susceptibilidad por unidades geológicas superficiales (UGS) más acertada podría ser: susceptibilidades muy bajas asociadas a suelos orgánicos, transportados y antropogénicos, susceptibilidades bajas asociadas a suelos residuales, susceptibilidades medias asociadas a rocas y susceptibilidades altas asociadas a suelos coluviales.

9.5.4. Morfogenética. El mapa de susceptibilidad del atributo morfogenética (**Figura 108**), indica que las susceptibilidades muy bajas se encuentran asociadas a geoformas relacionadas a depósitos de cauces activos y terrazas aluviales; estas últimas distribuidas principalmente a lo largo del Río Servitá. Las zonas de susceptibilidad baja se encuentran asociadas a geoformas relacionadas con depósitos fluviolagunares y de llanuras de inundación; localizadas a los márgenes del Río Servitá y en la Vereda Victarigua del Municipio de Carcasí.

Las zonas de susceptibilidad moderada se encuentran más que todo hacia el Sur de la plancha relacionadas principalmente con zonas de ambiente denudativo. Por último, las zonas de susceptibilidad alta, se relacionan directamente con ambientes estructurales y geoformas de depósitos coluviales.

Figura 108. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Morfogenética de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “morfogenética” (Ver **Tabla 30**, **Figura 109** y **Figura 110**) indican que la plancha 136-II-C exhibe mayor porcentaje de zonas con susceptibilidades altas (77,44%), esto se debe al fuerte carácter estructural de la plancha, ejercido principalmente por la Falla de Río Servitá, Tunebo y Suparí; en segundo lugar, la plancha presenta zonas de susceptibilidad media (18,81%) y con menor frecuencia susceptibilidad muy bajas (2,98%) y bajas (0,78%).

Tabla 30. Relación entre el factor causante Morfogenética y la ocurrencia de MM.

MORFOGENÉTICA					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	28576	2,98	8	0,25	0,03
2	7460	0,78	0	0	0
3	180546	18,81	202	6,24	0,11
4	743418	77,44	3028	93,51	0,41
Total	960000	100	3238	100	

Figura 109. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Morfogenética.

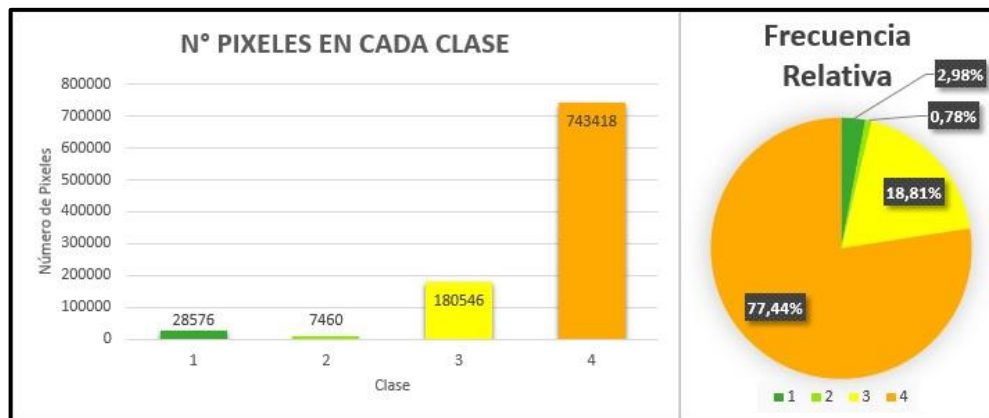
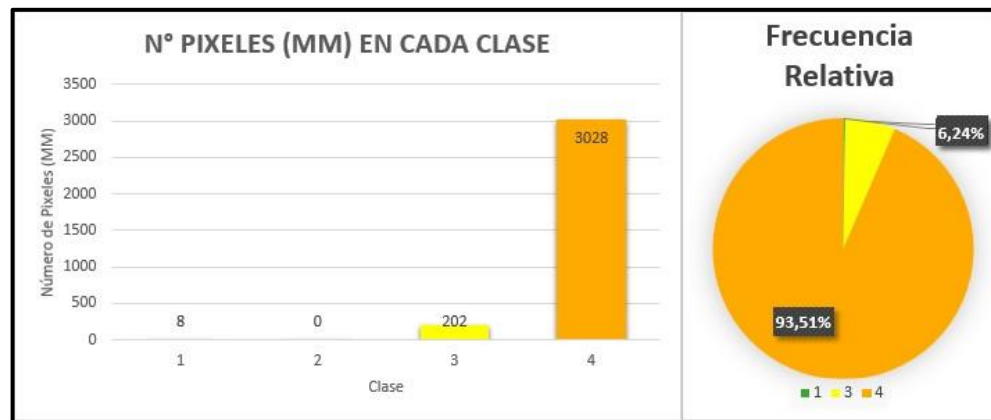


Figura 110. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo Morfo genética.



Con respecto a los MM, la susceptibilidad alta es la clase que más causa MM, ya que presenta el mayor porcentaje de píxeles con MM (93,51%) al igual que la mayor relación (0,41%) entre el número de píxeles con MM de cada clase y el número de píxeles totales en cada clase “%C”; seguida de esta se encuentran las susceptibilidades moderadas (0,11%) y muy bajas (0,03%); mientras que no en las zonas correspondientes a susceptibilidad bajas no se presentó ningún movimiento en masa.

9.5.5. Morfodinámica. En el mapa de susceptibilidad del atributo morfodinámica (**Figura 111**), se observan susceptibilidades desde muy bajas hasta muy altas; las susceptibilidades muy bajas se encuentran principalmente en zonas planas, localizadas en el Ríos Servitá, la vereda Robles de Enciso y las zonas aledañas al corregimiento de El Tobal; las susceptibilidades bajas se encuentran ubicadas principalmente al NW de la plancha; por su parte las susceptibilidades moderadas se distribuyen de manera uniforme en el área de estudio; mientras que las susceptibilidades altas y muy altas se localizan únicamente en los sitios donde ocurrieron MM y los depósitos coluviales.

La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo de Morfodinámica (Ver **Tabla 31**, **Figura 112** y **Figura 113**) indican que la plancha 136-II-C muestra mayor porcentaje de zonas con susceptibilidades moderadas (55,55%), esto se debe principalmente al fuerte relieve relativo de la zona acompañado de pendientes abruptas a muy abruptas; en segundo lugar, la plancha presenta zonas de susceptibilidad baja (34,99%) y en menor medida, zonas de susceptibilidad muy alta (4,44%), susceptibilidad muy baja (4,17%) y susceptibilidad alta (0,85%). Con respecto a los MM, la susceptibilidad muy alta es la única clase que presenta MM (100%), esto se debe a que a los movimientos en masa son considerados para el cálculo del atributo morfodinámica, y en este se le asigna un valor de 5.

Figura 111. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Morfodinámica de la plancha 136-II-C.

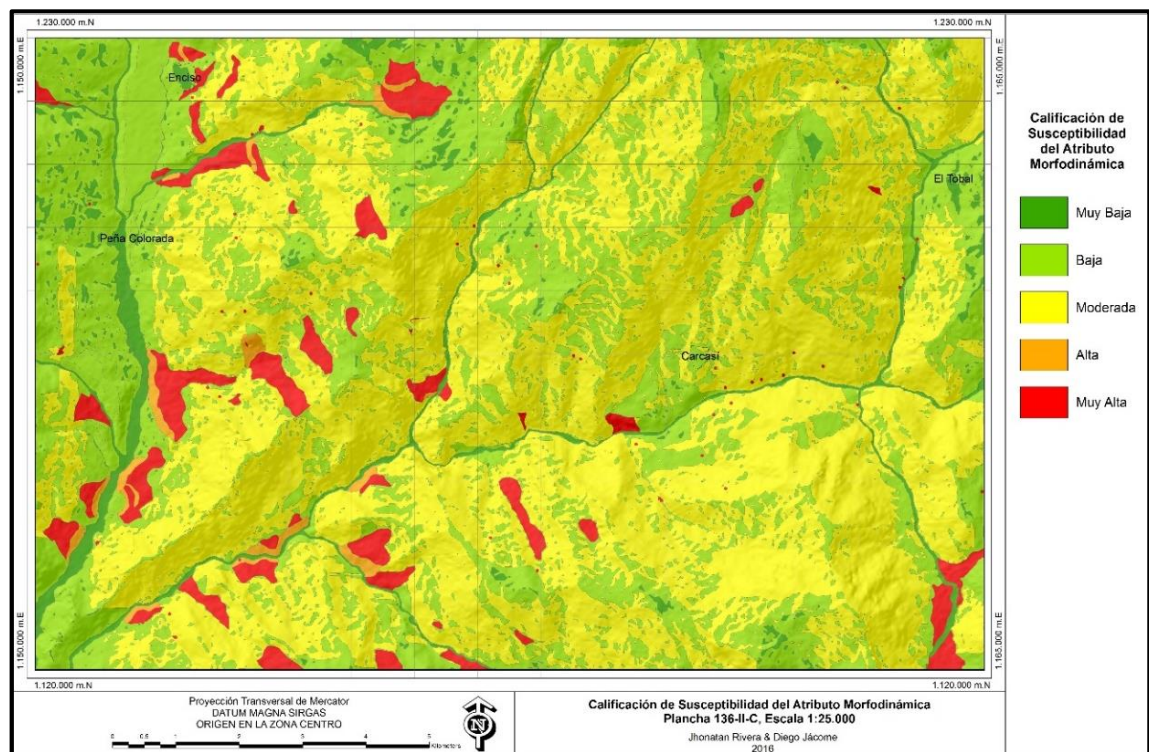


Tabla 31. Relación entre el factor causante Morfodinámica y la ocurrencia de MM.

MORFODINÁMICA					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	39991	4,17	0	0	0
2	335914	34,99	0	0	0
3	533303	55,55	0	0	0
4	8161	0,85	0	0	0
5	42631	4,44	3238	100	7,6
Total	960000	100	3238	100	

Figura 112. Relación entre el número de pixeles y las clases para el atributo de Morfodinámica.

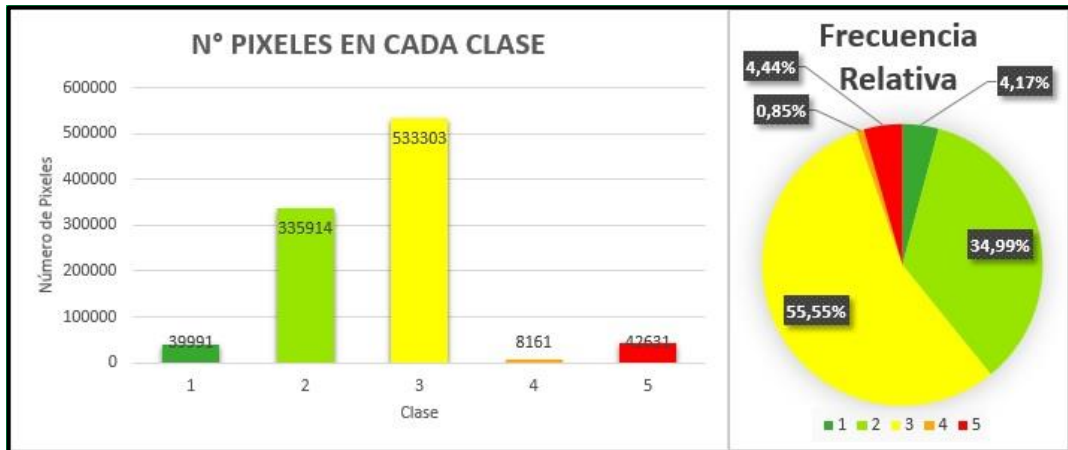
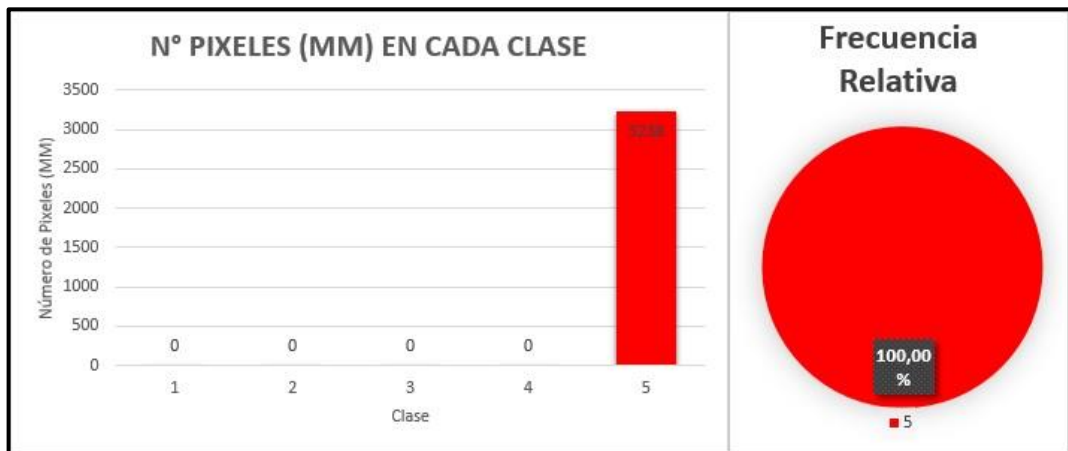


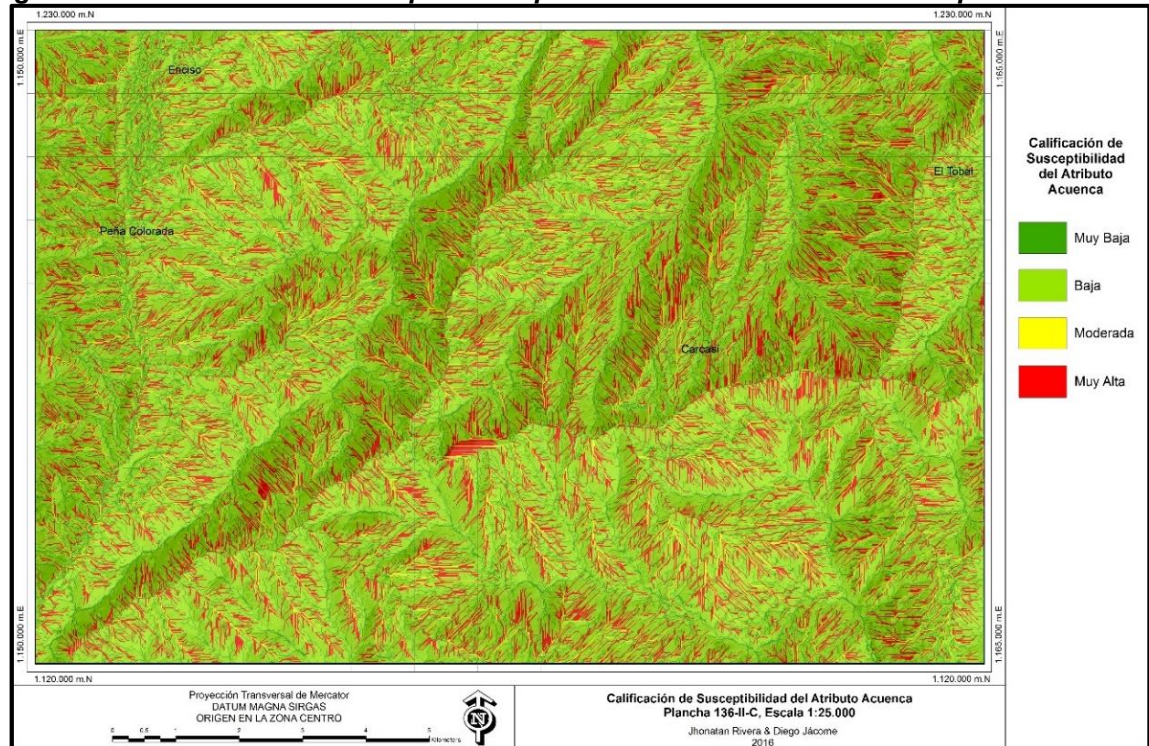
Figura 113. Relación entre el número de pixeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Morfodinámica.



9.5.6. Acuenca. El mapa de susceptibilidad del atributo acuenca (Figura 114), representa la acumulación de flujo x área; las susceptibilidades muy bajas representan zonas donde no se acumula flujo (parte aguas) o zonas donde a pesar de que todos los flujos se vierten a estas celdas (cauces de los ríos), la acumulación es débil debido a que la velocidad a la que fluye el agua en estos sitios supera su velocidad de infiltración.

Las susceptibilidades bajas, altas y moderadas representan valores ascendentes de acuenca respectivamente, siendo la clase moderada las zonas relacionadas con drenajes no permanentes. Todos estos valores se distribuyen de manera dispersa, por lo que la localización geográfica de cada clase no se puede analizar

Figura 114. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Acuenca de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “acuena” (**Ver Tabla 32, Figura 115 y Figura 116**) indican que la plancha 136-II-C exhibe mayor porcentaje de zonas con susceptibilidades bajas (66,78%), seguido de susceptibilidades altas (15,80%), susceptibilidades muy bajas (14,27%) y en menor medida susceptibilidades moderadas (3,15%). Con respecto a los MM, la susceptibilidad baja es la clase con mayor porcentaje de ocurrencia de MM (64%), en segundo lugar se encuentra la susceptibilidad alta (18,25%), seguido de susceptibilidades muy bajas (11,49%) y por último susceptibilidades moderadas (6,21%); sin embargo, la clase de susceptibilidad moderada, según su relación entre el número de píxeles de movimientos en masa por clase y el número total de píxeles por clase “%C” (0,66%), es la clase que causa mayor número de movimientos en masa en la plancha.

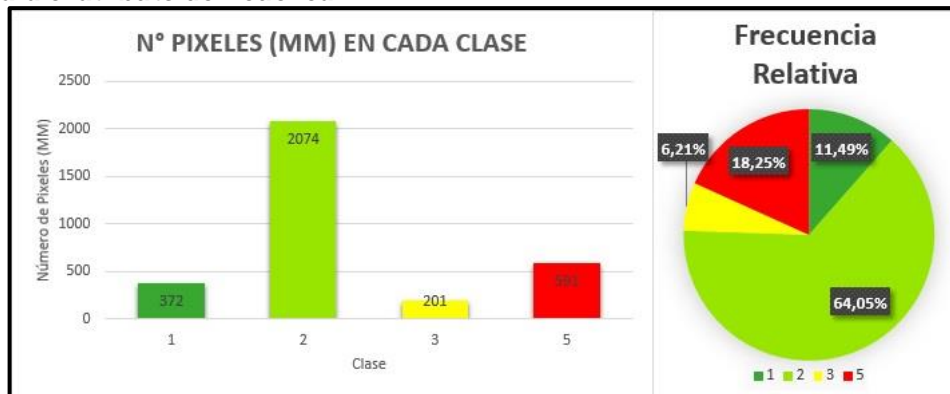
Tabla 32. Relación entre el factor causante Acuencia y la ocurrencia de MM.

Acuencia					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	137014	14,27	372	11,49	0,27
2	641061	66,78	2074	64,05	0,32
3	30260	3,15	201	6,21	0,66
5	151665	15,80	591	18,25	0,39
Total	960000	100	3238	100	

Figura 115. Relación entre el número de píxeles y las clases para el atributo de Acuencia.



Figura 116. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Acuenca.



9.5.7. Curvatura. El mapa de susceptibilidad del atributo curvatura (**Figura 117**), muestra de manera general, que las zonas de susceptibilidad baja (curvatura convexa) se encuentran ubicadas en los filos o parte aguas de las geoformas, las susceptibilidades altas (curvatura cóncava) se distribuyen principalmente a lo largo de los drenajes, mientras que las susceptibilidades moderadas se concentran principalmente en zonas de poca pendiente como en las terrazas aluviales ubicadas a lo largo del Río Servitá.

La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “curvatura” (Ver **Tabla 33**, **Figura 118** y **Figura 119**) indican que la curvatura cóncava (40,48%) y convexa (40,03%) son las que más se presentan en la plancha; mientras que la curvatura plana solo se presenta en un (19,49%). Las zonas que se asocian a curvaturas cóncavas (susceptibilidad alta) son las que causan mayor número de MM, esto se ve reflejado en su porcentaje de píxeles de MM generados por la clase y el total de píxeles de MM (46,29%) y su alto porcentaje (0,39%) entre los píxeles que presentan MM en esta clase y el número total de píxeles dentro de ella; lo cual es lógico si se tiene en cuenta que las curvaturas cóncavas aumentan la aceleración del flujo y con ello su capacidad erosiva. El porcentaje de presencia de píxeles con MM en las zonas de curvaturas convexas (34,06%) y curvaturas planas (19,64%), no indica necesariamente que las

curvaturas convexas influyen más en la ocurrencia de movimientos en masa; ya que el “%C” demuestra que las curvaturas planas (0,34%) ocasionan un mayor porcentaje de MM en relación a el total de pixeles de esta clase que el ocasionado por las curvaturas convexas (0,29%).

Figura 117. Calificación de Susceptibilidad del Atributo Curvatura de la plancha 136-II-C.

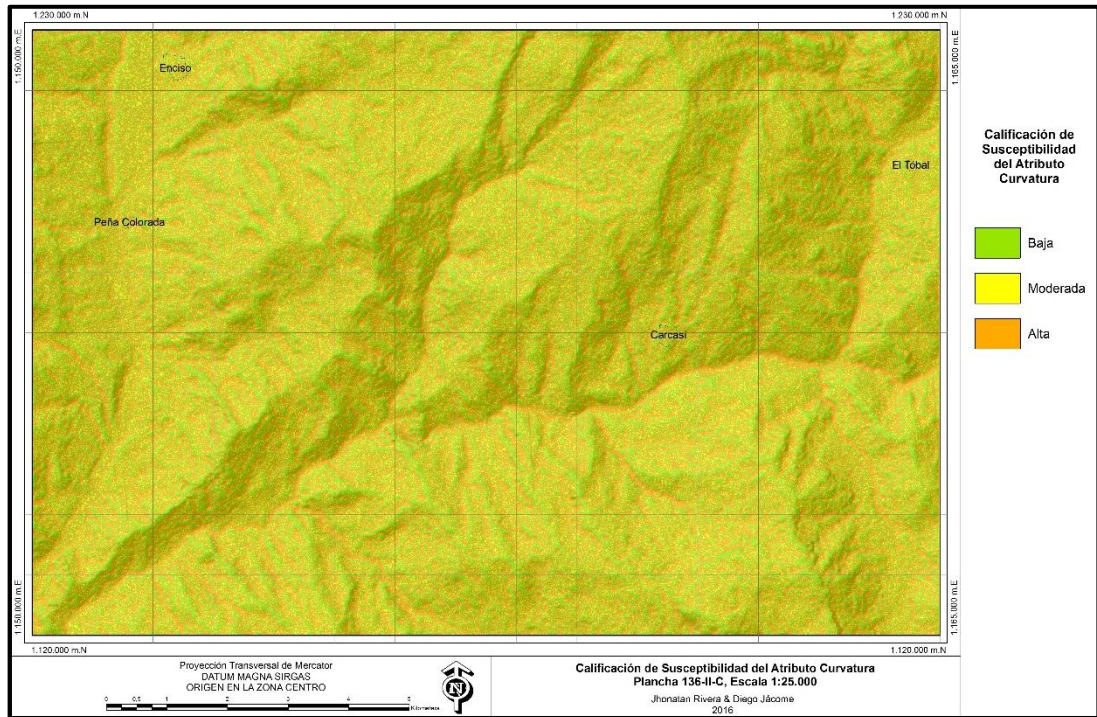


Tabla 33. Relación entre el factor causante Curvatura y la ocurrencia de MM.

CURVATURA					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
2	384268	40,03	1103	34,06	0,29
3	187129	19,49	636	19,64	0,34
4	388603	40,48	1499	46,29	0,39
Total	960000	100	3238	100	

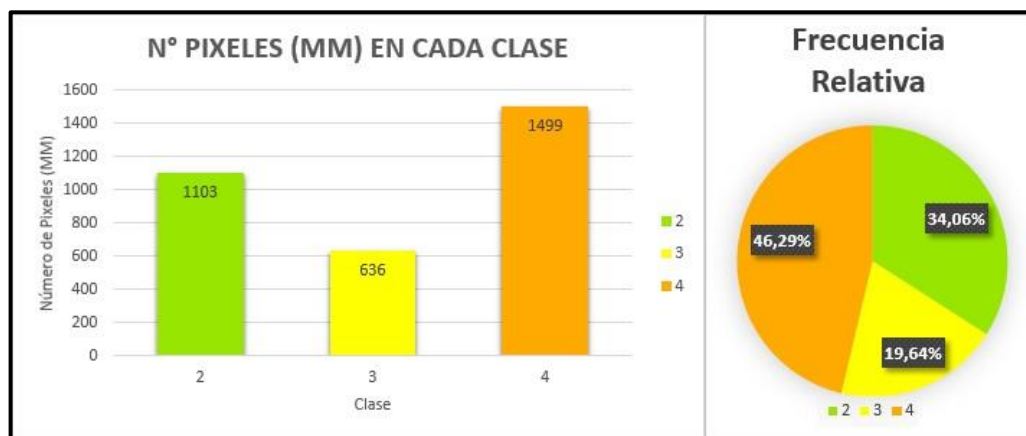
Estos porcentajes indican que la calificación que se generó para este atributo es la adecuada, ya que representa verdaderamente las susceptibilidades de la plancha;

para esta calificación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: susceptibilidad alta a las curvaturas cóncavas ya que permiten la convergencia de flujos, además de presentar una geometría (principalmente en la corona) propensa a generar MM, susceptibilidad moderada para las curvaturas planas ya que permite velocidades altas en los flujos, y se presentan más que todo en zonas llanas o escarpadas, siendo estas últimas afectadas frecuentemente por movimientos en masa; mientras que por su parte las zonas convexas se asociaron a susceptibilidades bajas teniendo en cuenta que generalmente se relacionan con parte aguas de rocas resistentes, donde las acumulaciones divergen entre sí.

Figura 118. Relación entre el número de píxeles y las clases del atributo "Curvatura".

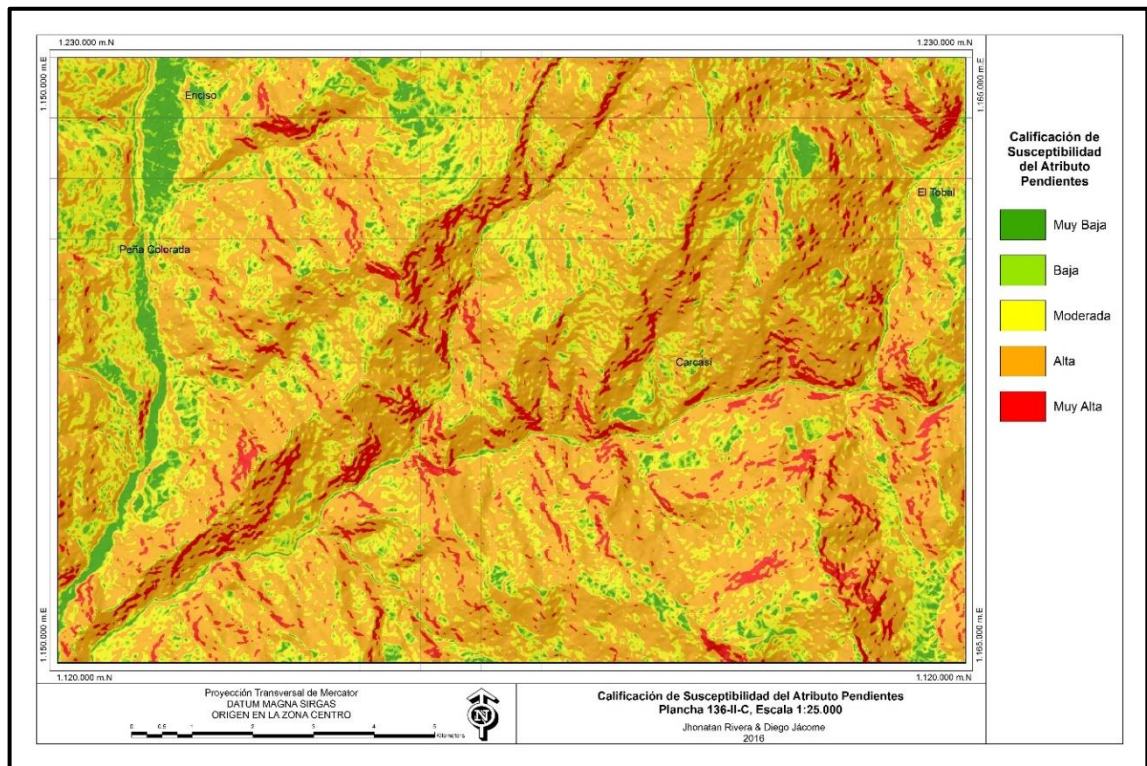


Figura 119. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo "Curvatura".



9.5.8. Pendientes. El mapa de susceptibilidad del atributo de pendientes (**Figura 120**), indica que las zonas de susceptibilidad muy alta ($>40^\circ$) se localizan principalmente paralelas al trazo de las estructuras menores y mayores, en sentido NW-SE y SW-NE respectivamente. Por su parte, las susceptibilidades altas ($19-40^\circ$) se disponen en las laderas de las geoformas estructurales; mientras que las susceptibilidades moderadas ($11-19^\circ$) lo hacen en geoformas denudacionales. Por último, la susceptibilidad baja ($7 - 11^\circ$) y muy baja ($0 - 7^\circ$) se asocian a geoformas fluviales del Río Servitá y fluviolagunares de la sierra de Carcasí, en las inmediaciones de la laguna Sartaneja.

Figura 120. Calificación de susceptibilidad del atributo de pendientes de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “pendientes” (Ver **Tabla 34 Figura 121** y

Figura 122) indican que la plancha 136-II-C presenta principalmente susceptibilidades altas (59,16%), es decir, zonas con pendiente escarpadas; seguido de susceptibilidades moderadas (23,42%) y en con menor frecuencia relativa susceptibilidades muy altas (6,81%), bajas (6%) y muy bajas (4,61%). Esto pone en evidencia que la plancha 136-II-C tiende a presentar pendientes fuertes, debido probablemente al fuerte control estructural así como a la litología presente. Las zonas con pendientes abruptas son las que presentan mayor cantidad de MM (53,15%), seguida de pendientes muy inclinadas (23,38%), escarpadas (11,03%), inclinadas (7,97%) y suavemente inclinadas (4,48%); sin embargo, la relación entre el número de pixeles con MM en cada clase y el número de pixeles totales en cada clase “%C” indica que la clase de pendientes escarpadas es la que más propicia la ocurrencia de MM con un 0,55%.

Tabla 34. Relación entre el factor causante Pendientes y la ocurrencia de MM.

PENDIENTES					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	44302	4,61	145	4,48	0,33
2	57566	6	258	7,97	0,45
3	224816	23,42	757	23,38	0,34
4	567897	59,16	1721	53,15	0,3
5	65419	6,81	357	11,03	0,55
Total	960000	100	3238	100	

Figura 121. Relación entre el número de pixeles y las clases para el atributo de Pendientes.

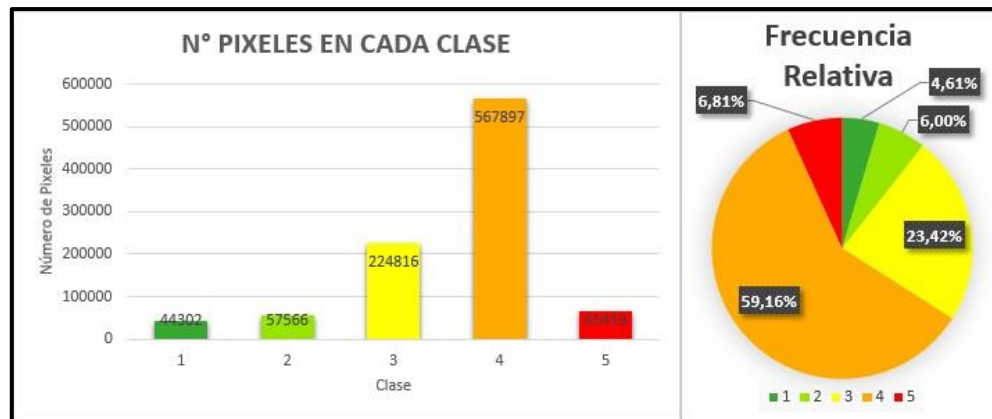
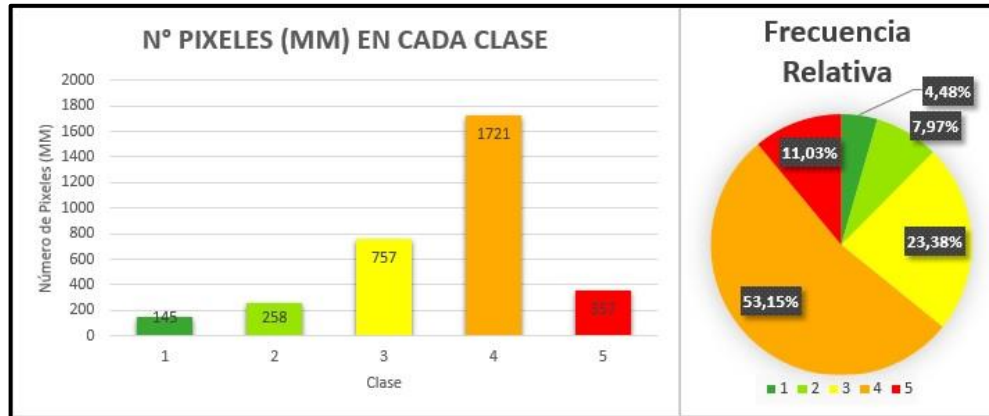


Figura 122. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Pendientes.



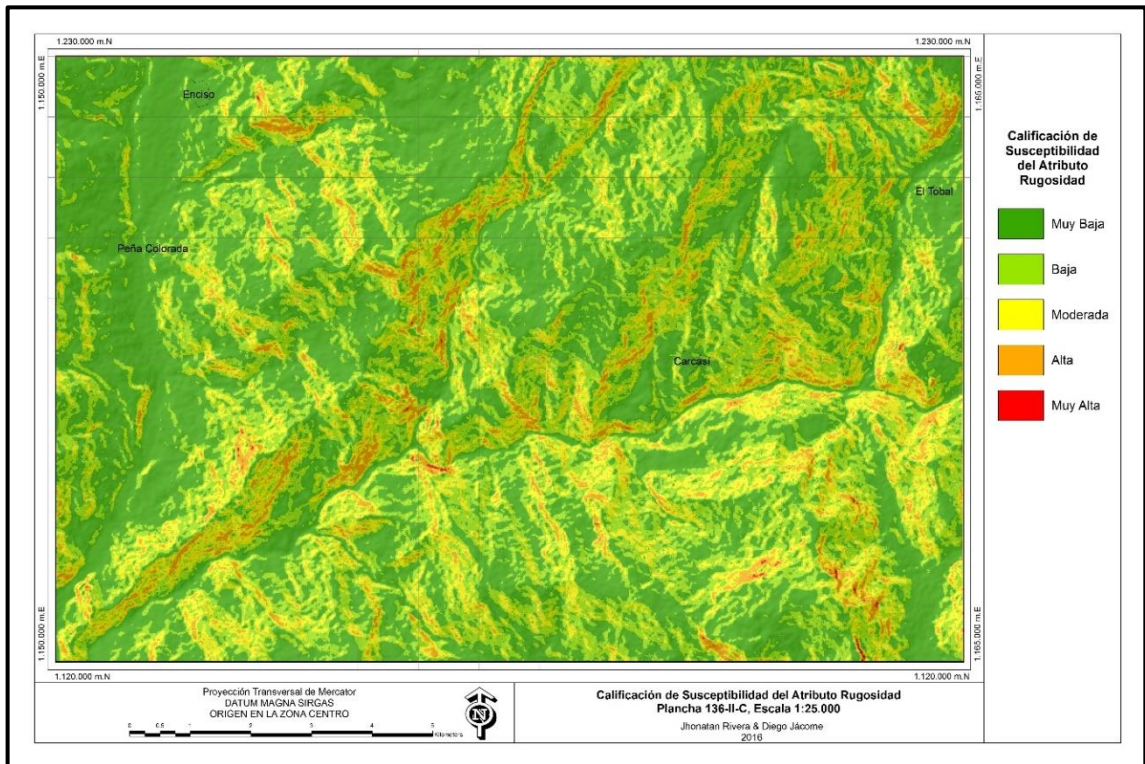
9.5.9. Rugosidad. El mapa de susceptibilidad del atributo de rugosidad (**Figura 123**), demuestra que las zonas de susceptibilidad muy alta (rugosidad muy alta) se encuentran ubicadas principalmente en las laderas contrapendiente de las geoformas estructurales; las susceptibilidades altas y moderadas se relacionan en gran medida con el trazo de las fallas y pliegues de la plancha 136-II-C; por su parte las susceptibilidades bajas suelen presentarse en laderas inclinadas de geoformas denudativas, mientras que las zonas de susceptibilidad muy baja (rugosidad muy baja) se presentan únicamente en lugares de poca pendiente (planas a suavemente inclinadas), relacionadas principalmente con depósitos coluviales, fluviales y fluviolagunares.

La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo rugosidad (Ver **Tabla 35**, **Figura 124** y **Figura 125**) indican que la susceptibilidad muy baja (45,34%) y baja (33,46%) son las de mayor frecuencia en la zona de estudio, seguidas en orden descendente por las susceptibilidades moderadas (17%), altas (4,14%) y muy altas (0,05%); por su parte, los MM se presentan en el mismo orden, susceptibilidades muy bajas (45,65%), bajas (28,97%), moderadas (17,94%), altas (7,29%) y muy altas (0,15%).

Tabla 35. Relación entre el factor causante Rugosidad y la ocurrencia de MM.

RUGOSIDAD					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
1	435298	45,34	1478	45,65	0,34
2	321245	33,46	938	28,97	0,29
3	163166	17	581	17,94	0,36
4	39776	4,14	236	7,29	0,59
5	515	0,05	5	0,15	0,97
Total	960000	100	3238	100	

Figura 123. Calificación de susceptibilidad del atributo de Rugosidad de la plancha 136-II-C.



Sin embargo la relación entre el número de pixeles con MM en cada clase y el número de pixeles totales en cada clase “%C” indican que las rugosidades altas y muy altas, son las que más propician la ocurrencia de movimientos en masa, con

frecuencias relativas de 0,97% y 0,59% respectivamente. Esto es lógico si se considera que las rugosidades altas y muy altas son más propensas a presentar movimientos en masa debido los cambios sucesivos de pendientes favorece la infiltración de agua en el terreno y con ello la inestabilidad del mismo

Figura 124. Relación entre el número de pixeles y las clases para el atributo de Rugosidad.

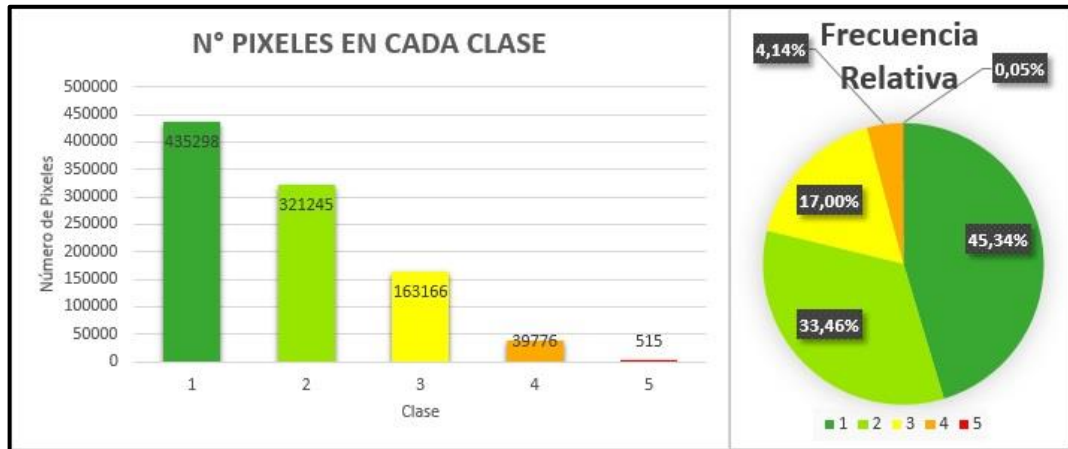
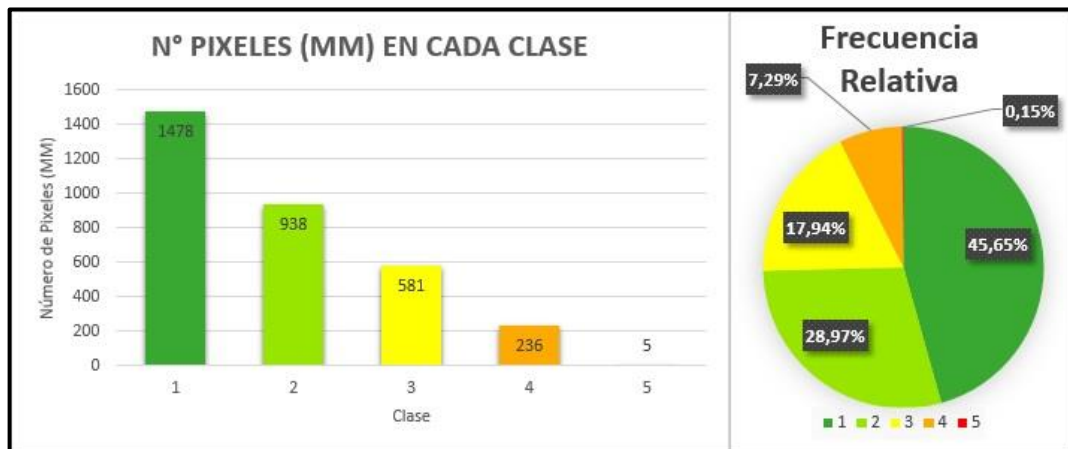
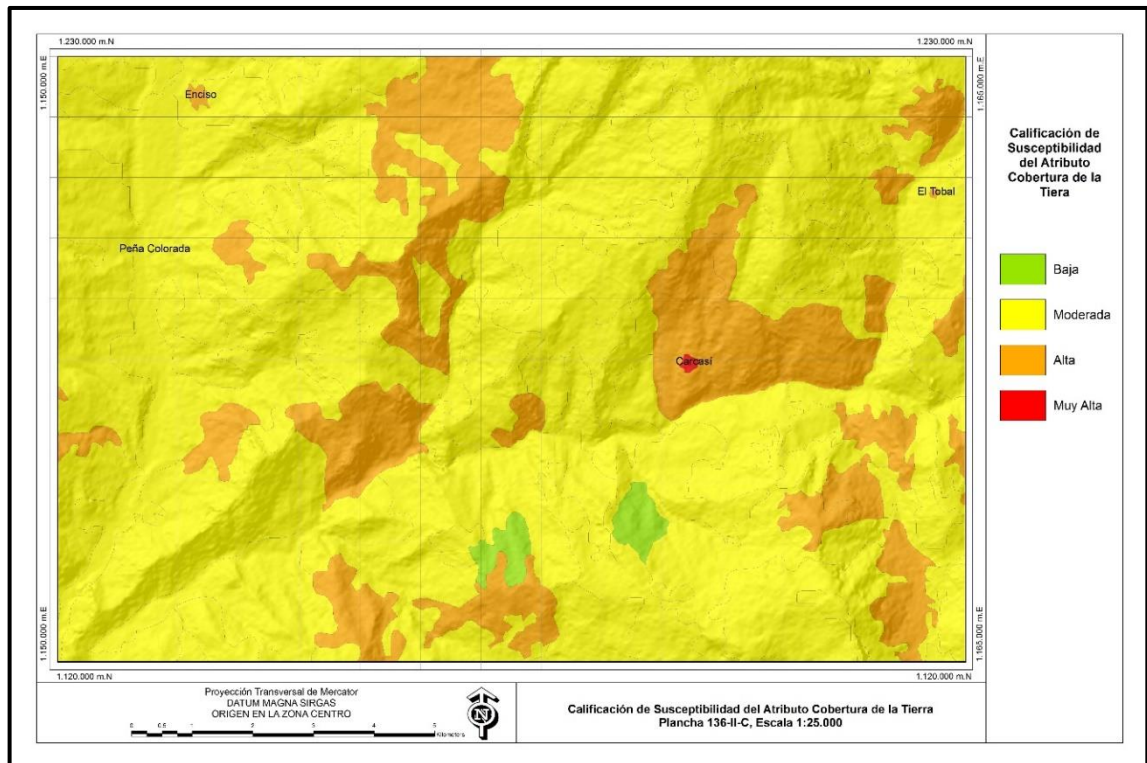


Figura 125. Relación entre el número de pixeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Rugosidad.



9.5.10. Cobertura de la Tierra. El mapa de susceptibilidad del atributo cobertura de la tierra (**Figura 126**), indica que la plancha 136 presenta susceptibilidades que van desde bajas hasta muy altas; las susceptibilidades bajas se relacionan con mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales; esta clase se presenta únicamente en la vereda Quebrada Honda del Municipio de Carcasí y Pamplonita de la Vereda de San Miguel, las susceptibilidad moderadas (mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, bosques, pastos enmalezados y áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva) y altas (pastos limpios) se distribuyen homogéneamente en toda la plancha 136-II-C, mientras que la susceptibilidad alta (tejido urbano discontinuo) se presenta únicamente en el área urbana del municipio de Carcasí.

Figura 126. Calificación de susceptibilidad para el atributo de Cobertura de la Tierra de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “cobertura de la tierra” (Ver **Tabla 36**, **Figura 127** y **Figura 128**) indica que la plancha 136-II-C exhibe mayor porcentaje de zonas con susceptibilidades moderadas (81,02%), en segundo lugar, se encuentran las susceptibilidades altas (18,01%) y en menor porcentaje, las susceptibilidad bajas (0,94%) y muy altas (0,04%). Con respecto a la presencia de MM, se mantiene el mismo orden, susceptibilidad moderada (77,08%), alta (25,58%), y baja (0,34%), en la susceptibilidad muy alta no se presenta registro de movimientos en masa, esto puede deberse a que, aunque no existe cobertura vegetal en estas zonas, la susceptibilidad se ve compensada con el material cementado que cubre la tierra. Nuevamente, la relación entre el número de píxeles con MM de cada clase y el número de píxeles totales en cada clase “%C”, se utilizó para determinar la clase que causa más MM, de esta manera, los pastos limpios representan una mayor relación (0,42%), la poca cobertura vegetal de esta clase en terrenos con inclinación, propician la ocurrencia de movimientos en masa. Las zonas de susceptibilidad moderada y baja, son las clases que siguen en orden descendente con 0,32% y 0,12% de “%C” respectivamente.

Tabla 36. Relación entre el factor causante Cobertura de la Tierra y la ocurrencia de MM.

COBERTURA DE LA TIERRA					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
2	8987	0,94	11	0,34	0,12
3	777745	81,02	2496	77,08	0,32
4	172850	18,01	731	25,58	0,42
5	418	0,04	0	0	0
Total	960000	100	3238	100	

Figura 127. Relación entre el número de pixeles y las clases para el atributo de Cobertura de la Tierra.

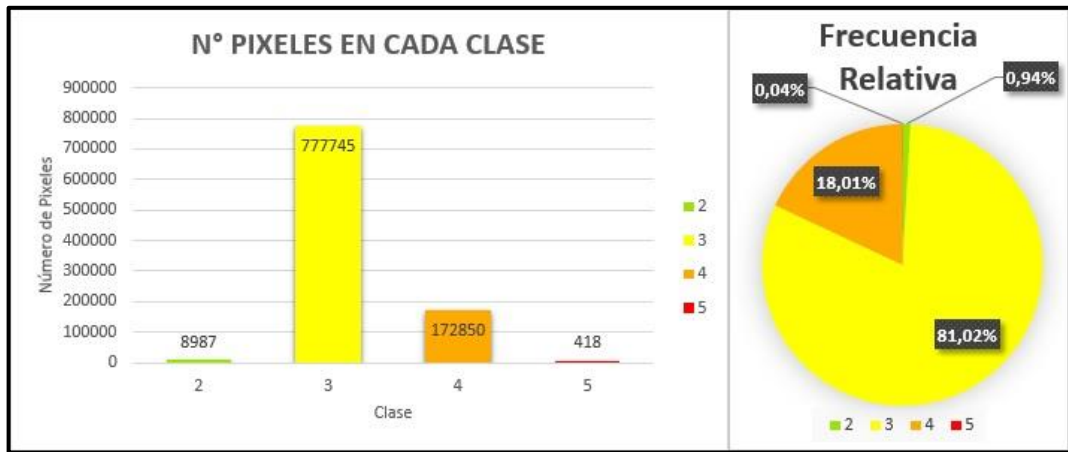
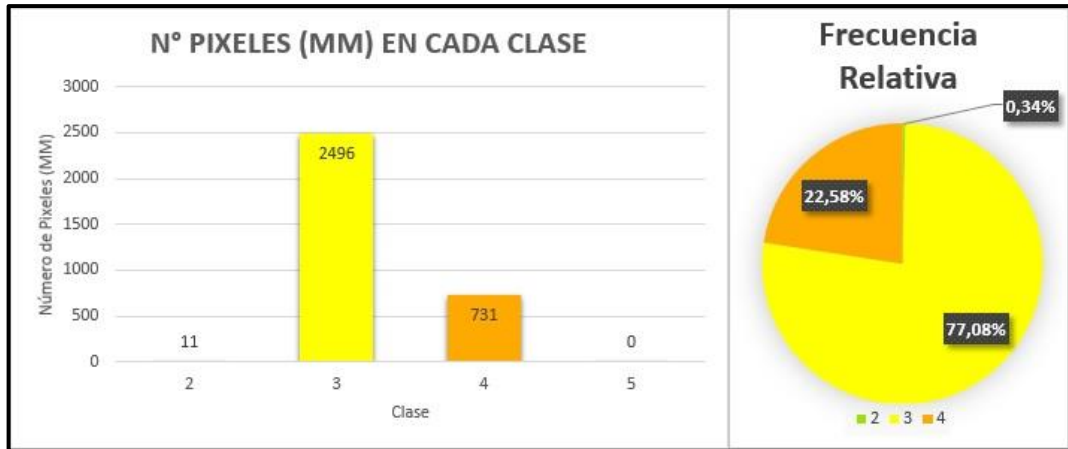
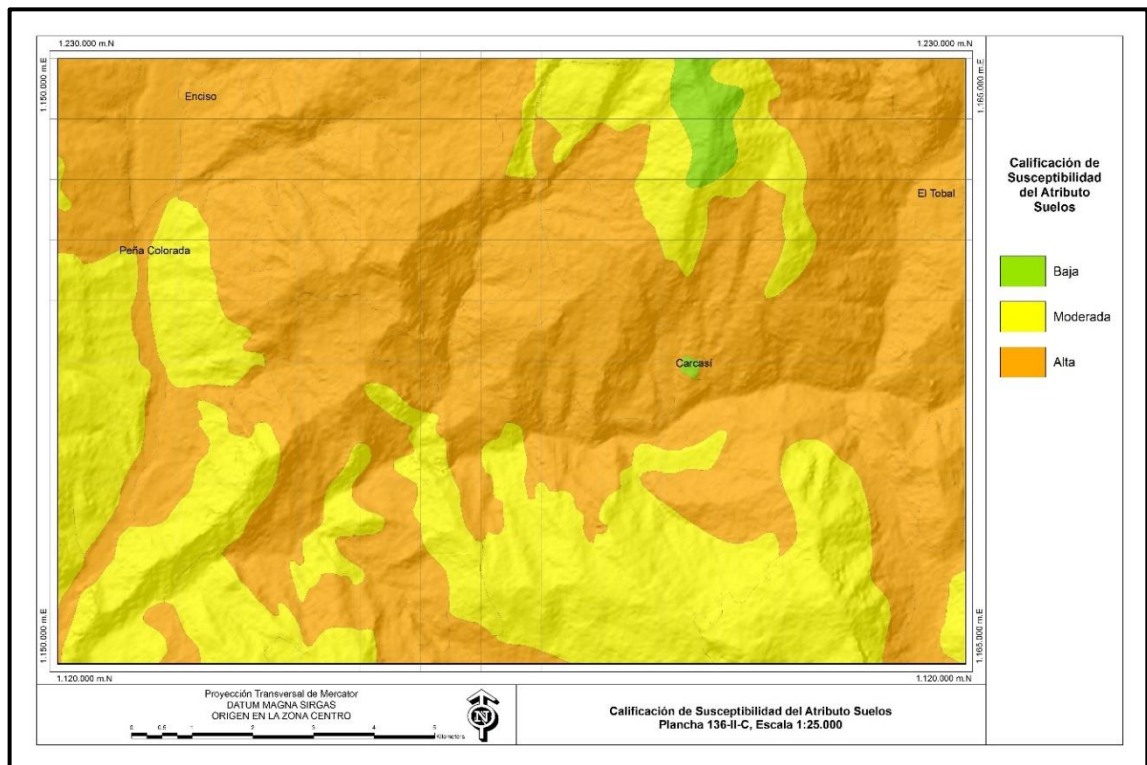


Figura 128. Relación entre el número de pixeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases para el atributo de Cobertura de la Tierra.



9.5.11. Suelos. El mapa de susceptibilidad del atributo suelos (**Figura 129**), indica que la plancha 136 presenta susceptibilidades que van desde bajas hasta altas, las susceptibilidades bajas se encuentran en la zona urbana del municipio de Carcasí y al norte de la plancha, específicamente en las partes más altas de la sierra de Carcasí; las susceptibilidades moderadas se localizan hacia el Norte, Sur, Oeste y Suroeste de la plancha 136-II-C. Las zonas de susceptibilidad alta se encuentran ubicadas principalmente hacia el Noroeste y este de la plancha.

Figura 129. Calificación de Susceptibilidad del Atributo Suelo de la plancha 136-II-C.



La relación entre el número de píxeles (totales y con presencia de MM) y las clases del atributo “suelos” (**Tabla 37, Figura 130, Figura 131**) indican que la plancha 136-II-C presenta principalmente susceptibilidades altas (65,56%), estas susceptibilidades son también las que más presentan y causan movimientos en masa (94,47%) y (0,49%) respectivamente. Las susceptibilidades moderadas se

exhiben en la plancha con una frecuencia relativa de (33,24%), y sólo (5,53%) MM; por su parte la susceptibilidad baja representa la susceptibilidad menor en la plancha (12%), esta clase no presenta movimientos en masa.

9.6. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

9.6.1. Entrenamiento. Los factores causantes previamente descritos fueron utilizados como insumos para la elaboración de las redes neuronales artificiales, este proceso se explicó detalladamente en la metodología del trabajo de investigación; destacando los parámetros de entrenamiento compilados en las **(Tabla 16 y Tabla 17)**.

En resumen, cada set de datos se corrió con cada uno de los algoritmos de entrenamiento propuestos, estos a su vez se corrieron con cada una de las arquitecturas propuestas. Los set de datos 2 y 3 se corrieron dos veces para cada arquitectura; así mismo se corrieron 49 redes neuronales adicionales, en algunas de estas se intercambiaron los algoritmos de entrenamiento entre los set de datos 2 y 3; y en otras se eliminó la variable de morfodinámica, todo esto con el fin de poder establecer comparaciones entre los diferentes modelos. El test final (MM) consistió en aquellos movimientos en masa (1619) que no se utilizaron en ninguna de las fases (entrenamiento, validación y test).

Tabla 37. Relación entre el factor causante “Suelo” y la ocurrencia de MM.

SUELO					
Clase	N° Pixel/Clase	%	N° Pixel (MM)/Clase	%	%C
2	11521	12	0	0	0
3	319087	33,24	179	5,53	0,06
4	629392	65,56	3059	94,47	0,49

Figura 130. Relación entre el número de píxeles y las clases del atributo “Suelo”.

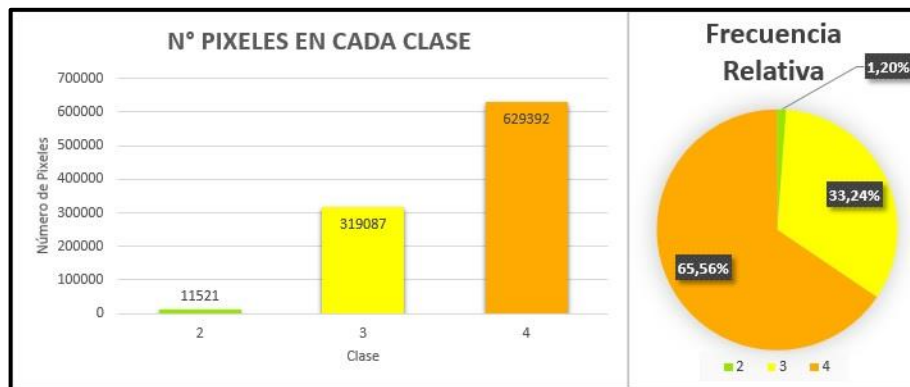
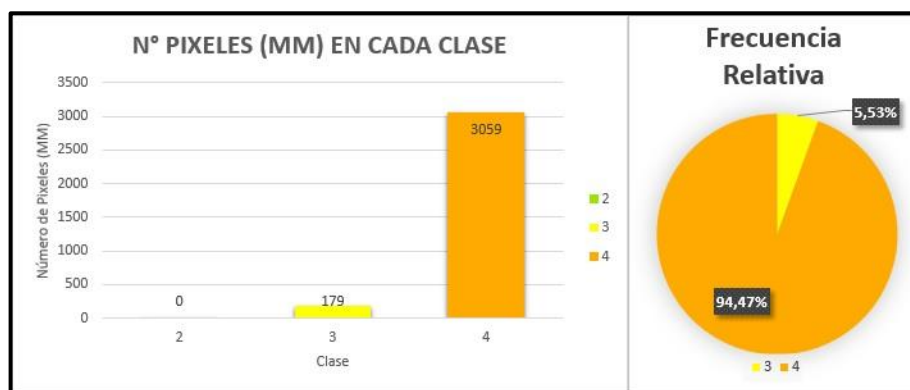


Figura 131. Relación entre el número de píxeles con ocurrencia de movimientos en masa y las clases del atributo “Suelo”.



Cabe mencionar que los parámetros de entrenamiento fueron establecidos a partir de trabajos previos relacionados con gestión del riesgo, principalmente susceptibilidad (Lee *et al*, 2003; Lee *et al*, 2013; Lee *et al*, 2012; Tien *et al*, 2012 en Machuca, S, 2016; Bhardwaj & Venkatachalam, 2014). Además, se realizaron ensayos con diferentes sets de datos de entrada, estos ensayos, fueron de gran importancia para la selección de los parámetros de entrada. Las conclusiones de los ensayos previos fueron los siguientes: al seleccionar en el mapa los targets “0” o targets de “zonas estables” al azar y entrenar la red hasta un error de generalización “goal” < 1, la red logra discriminar bien entre las dos clases (0 y 1) o

(susceptibilidad muy baja y muy alta), pero asocia pocos patrones a las demás clases (susceptibilidad baja, media y alta); a partir de esta apreciación se consideró preseleccionar zonas de baja susceptibilidad y asociarlas a targets "0"; la preselección tuvo en cuenta principalmente la pendiente, ya que es correcto afirmar que en zonas planas no se generan movimientos en masa, también se estableció un error de generalización "goal" de 0,05; por otro lado, no se debe usar la matriz de confusión que arroja el programa de Matlab para calcular la exactitud del modelo (ACC), esto se debe a que asocia los resultados $< 0,5$ y $> 0,5$ a las clases "0" y "1" respectivamente, la cual no sirve para estos propósitos ya que no representa de manera adecuada las clases, una mejor clasificación sería < 0.8 y > 0.8 ; para cada clase el número máximo de fallos fue seleccionado con el fin de que la red encontrara el mínimo global y no local de la función (**Figura 13**), sin embargo ninguno de los modelos llegó a utilizar este parámetro de finalización "parada", ya que alcanzaban primero el error de generalización mínimo "goal"; otra apreciación importante considerada a partir de la visualización de los mapas de ensayos generados por las redes, era que estas asignaban un peso muy elevado al factor causante "morfodinámica", esto podía deberse al método de calificación de este factor y no necesariamente a su fuerte relación con la ocurrencia de movimientos en masa. El factor morfodinámica considera como susceptibilidad muy alta los MM, esto genera una relación directa entre la morfodinámica muy alta "5" (la cual a su vez incluyen depósitos coluviales) y la ocurrencia de MM; con el fin de considerar diferentes resultados se optó por modelar la red sin este atributo y observar las calificaciones en los depósitos coluviales.

En total se generaron 289 modelos correspondientes a 186 arquitecturas diferentes. De manera general, se pudo observar que los algoritmos de entrenamiento Levenberg-Marquardt "LM" y Scaled Conjugate Gradient "SCG" arrojan resultados más exactos y convergen más rápido que los algoritmos Resilient Backpropagation "RP" y Variable Learning Rate Gradient Descent "GDJ"; mientras que los tipos de función de división o de normalización no influyen tanto en los resultados.

Tras una visualización de diferentes mapas con diferentes exactitudes, se consideró que las exactitudes superiores al 90% de los MM del test final no deberían ser consideradas, ya que el número de píxeles de MM no corresponde exactamente al área de los MM (debido a su delimitación con imágenes satelitales o al procedimiento de bufer en los movimientos en calidad de catálogo), lo que genera una sobreestimación de susceptibilidades muy altas. Por otro lado, al eliminar la variable morfodinámica, los depósitos coluviales siguieron considerándose como susceptibilidades altas y muy altas, lo que indica que estos depósitos tienen otras características además de la morfodinámica que los hacen muy susceptibles, por ende, sólo se tuvieron en cuenta las redes que se generaron con todos los atributos. Teniendo en cuenta todo lo anterior se establecieron las condiciones para seleccionar la mejor red neuronal (**Tabla 38**).

Tabla 38. Condiciones para la selección de las mejores redes neuronales.

CARACTERÍSTICA	CONDICIÓN
R ²	> 0,9
%MM del test final en clase 5	[85 – 90]

Sólo 18 modelos de redes neuronales cumplieron con los requisitos anteriormente mencionados (**Tabla 39**), es decir el 6,23% del total de modelos, por lo que se considera de vital importancia entrenar un número adecuado de redes neuronales para que los resultados sean los más confiables posibles.

Tabla 39. Modelos de redes neuronales pre-seleccionados.

#	A.E	S	A	I	MSE	R ²	EMMT
232	RP	3	11-25-1	1	0,0424	0,95967	90,3644
153	SCG	2	11-30-1	1	0,0129	0,98164	90,3027
233	RP	3	11-30-1	2	0,0103	0,98752	90,1791

223	RP	3	11-14-1	1	0,0176	0,97241	90,0556
14	GDX	1	11-18-1	81	0,0471	0,91091	89,8703
44	SCG	1	11-4-1	4	0,0417	0,92977	89,7468
234	RP	3	11-30-1	1	0,0346	0,96304	89,1291
131	SCG	2	11-6-1	3	0,0459	0,92705	89,0056
189	GDX	3	11-20-1	106	0,0429	0,92045	87,8938
250	SCG	3	11-18-1	4	0,0277	0,96124	87,3996
237	RP	3	11-50-1	2	0,0334	0,93578	87,3379
201	RP	3	11-1-1	10	0,0235	0,97027	87,1526
207	RP	3	11-4-1	7	0,0398	0,97771	87,1526
213	RP	3	11-7-1	4	0,0261	0,95212	87,0908
87	LM	2	11-4-1	1	0,0354	0,96980	86,1643
132	SCG	2	11-6-1	3	0,0479	0,91742	85,9172
152	SCG	2	11-25-1	4	0,0444	0,92244	85,5114
219	RP	3	11-10-1	3	0,0218	0,97774	85,2996

Siendo # el número del modelo de red neuronal, A.E el algoritmo de entrenamiento, S el set de datos, A la arquitectura del modelo, I el número de iteraciones, MSE el performance de validación, R2 el coeficiente de determinación, EMMT la exactitud de que los MM se encuentren en la clase de susceptibilidad muy alta (utilizando los datos del testfinal).

Se seleccionó el modelo número 14 ya que tuvo un EMMT alto y visualmente es el que mejor representa la susceptibilidad de la plancha, su arquitectura (11-18-1) (**Figura 132 y Figura 133**), performance (0,042) (**Figura 134**) y coeficiente de determinación (0,91) (**Figura 135**) son presentadas a continuación.

Figura 132. Arquitectura detallada de la red neuronal.

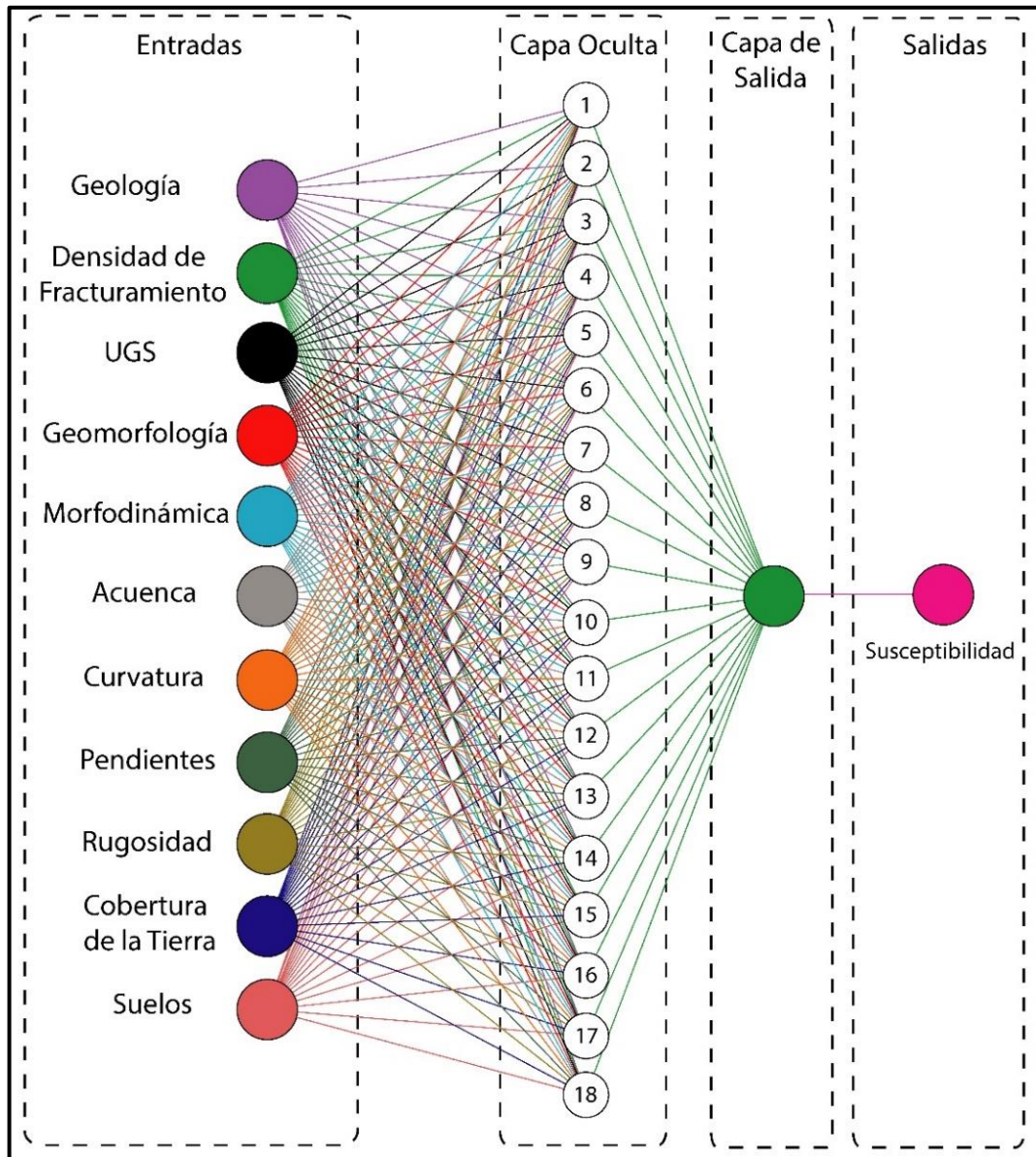
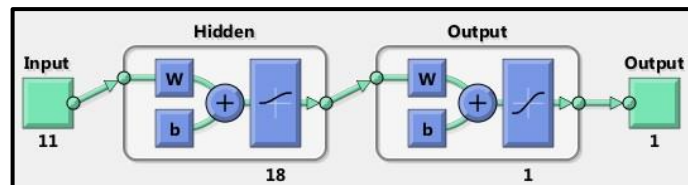
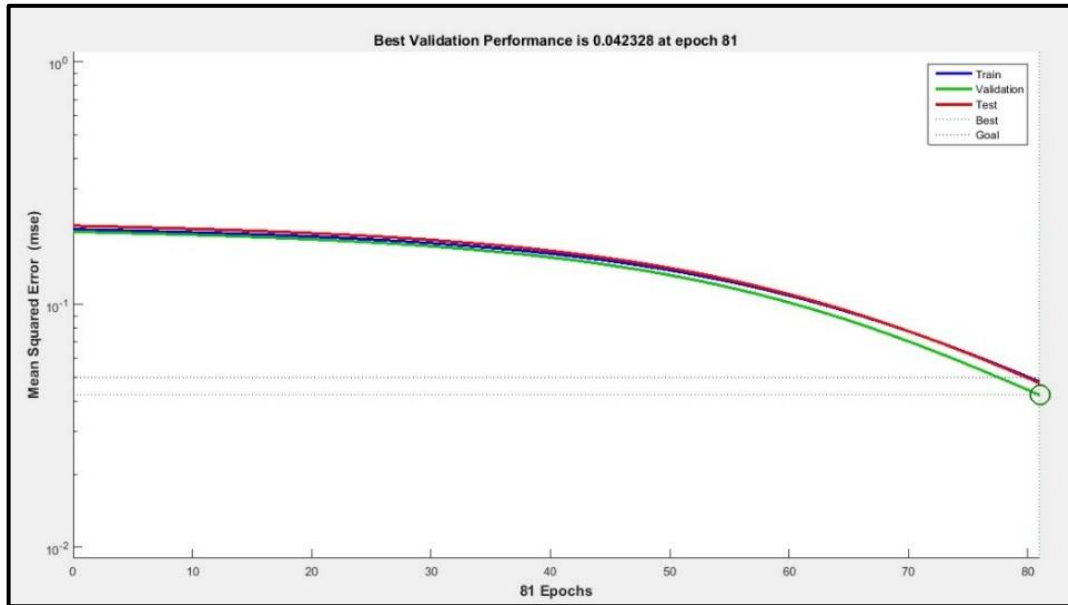


Figura 133. Arquitectura generalizada de la red neuronal.



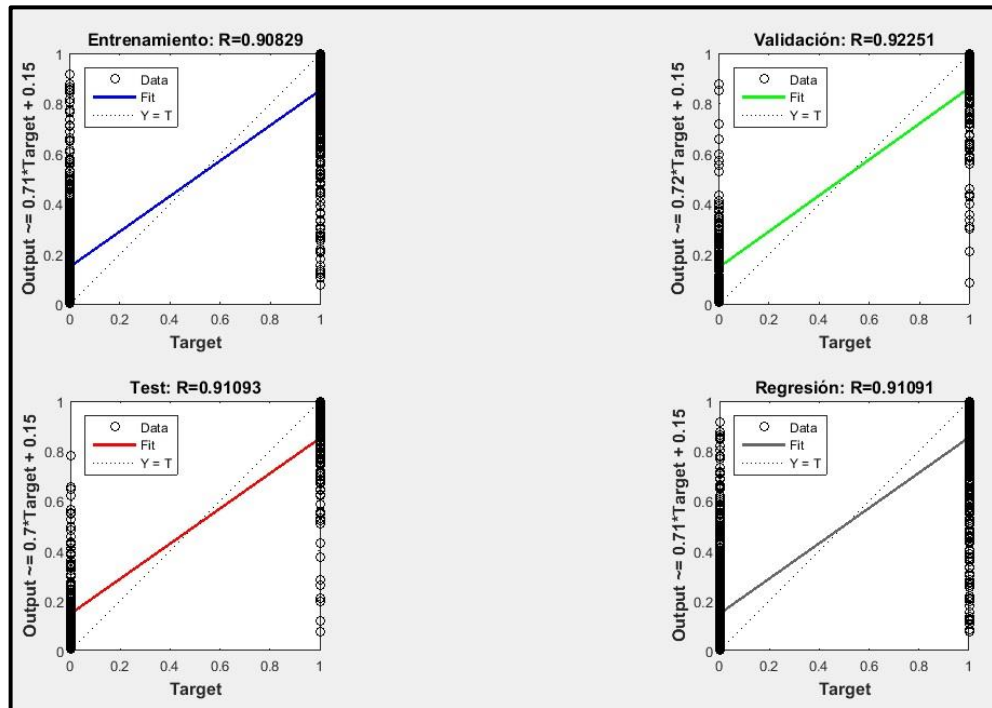
Fuente: Matlab R2015a.

Figura 134. Performance de la red neuronal.



Fuente: Autores en Matlab R2015a.

Figura 135. Coeficiente de determinación de la red neuronal artificial.



Fuente Autotes en Matlab R2015a.

9.6.2. Validación. Todas las redes generan salidas en el rango [0 - 1] debido a las funciones de activación utilizadas en cada capa; logsig para la capa oculta y tansig para la capa de salida. Dado que el mapa de susceptibilidad a generar cuenta con cinco rangos se dividió la salida en rangos en intervalos de 0,2, de esta manera se asigna el rango [0 – 0,2) a la susceptibilidad muy baja, [0,2 – 0,4) susceptibilidad baja, [0,4 – 0,6) susceptibilidad moderada, [0,6 – 0,8) susceptibilidad alta y [0,8 – 1] susceptibilidad muy alta (**Tabla 18**). Con el fin de calcular la exactitud del modelo, se debe considerar que los target sólo son “0” para zonas estables y “1” para zonas inestables o con presencia de MM, se asocian los rangos [0 – 0,8) zonas estables y [0,8 – 1] a las zonas inestables o susceptibilidades muy altas.

El análisis de la curva ROC, la exactitud (ACC) y el cálculo de la importancia relativa de cada entrada del modelo, fueron los criterios utilizados para la validación de la red neuronal. La curva ROC es una representación gráfica de la razón de verdaderos positivos vs la razón de falsos positivos de un sistema clasificador binario según se varía el umbral de discriminación. Los umbrales de discriminación son valores de clasificación que se asumen con el fin de evaluar un modelo. Por ejemplo; el umbral de discriminación más realista, considerando los rangos de susceptibilidad descritos anteriormente, sería 0,8; es decir, los resultados $\geq 0,8$ pertenecen a la clase 1, mientras que los $\leq 0,8$ pertenecen a la clase 0. Los umbrales son el punto de partida en la construcción de las matrices de confusión, estas matrices permiten conocer el desempeño de un clasificador; un desempeño excelente se presenta cuando el clasificador no confunde sus dos clases, mientras que en un desempeño malo el clasificador confunde sus dos clases. La matriz de confusión se construye a partir de las siguientes ecuaciones (**Ecuación 7, 8, 9 y 10**).

- **Verdadero positivo (VP):** Hace referencia al número de píxeles de MM (targets 1) que están correctamente calificados dentro de la susceptibilidad muy alta.

- **Falso positivo (FP):** También llamadas falsas alarmas: hace referencia al número de píxeles de las áreas consideradas como estables (targets 0) que están incorrectamente calificados dentro de la susceptibilidad muy alta.
- **Falso negativo (FN):** Hace referencia a la diferencia entre el total de píxeles de MM (targets 1) y el valor de verdadero positivo (VP).
- **Verdaderos negativos (VN):** También llamados rechazos correctos: hace referencia a la diferencia entre el total de píxeles considerados como estables (targets 0) y el valor de falso positivo.
- **Sensibilidad o razón de verdaderos positivos (VPR):**

$$(7) VPR = \frac{VP}{VP+FN}$$

- **Especificidad o razón de verdaderos negativos (SPC):**

$$(8) SPC = \frac{VN}{VN+FP}$$

- **Razón de falsos positivos (FPR):**

$$(9) FPR = 1 - SPC$$

- **Exactitud (ACC)**

$$(10) ACC = \frac{VP+VN}{VP+FN+FP+VN}$$

La exactitud del modelo se calculó a partir de la matriz de confusión para un umbral discriminante de 0,8 (**Figura 136**).

Exactitud del modelo para umbral discriminante 0,8:

$$ACC = \frac{1250 + 1605}{3238} = \frac{2855}{3238} = 0.8817$$

Figura 136. Matriz de confusión para el umbral 0,8.

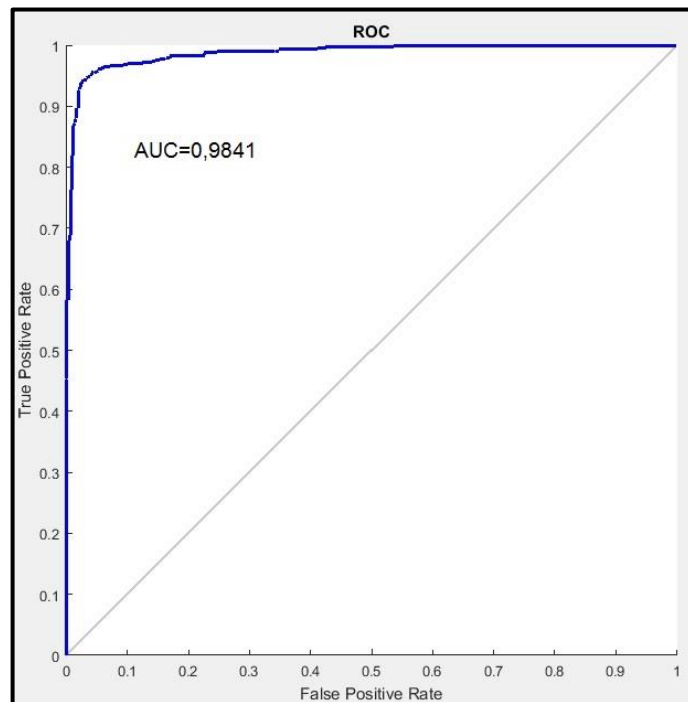
		Matriz de Confusión		
		0	1	
Outputs	0	VN 1605	FN 369	VN+FN 1964
	1	FP 14	VP 1250	FP+VP 1264
		FP+VN 1619	VP+FN 1619	FP+VN+VP+FN 3238
		0	1	
		Targets		

Fuente: Tomado y modificado de Matlab R2015a.

Con el fin de graficar la curva ROC del modelo, se construyeron matrices de confusión tomando umbrales cada 0,02 en el rango de [0 – 1], a cada matriz se le calculó su FPR Y VPR, siendo FPR el eje “x” y VPR el eje “y” de la curva (**Figura 137**). Para el análisis de la curva ROC, se debe calcular su área bajo la curva (AUC), valores de AUC por debajo de 0,5 (línea diagonal trazada desde la coordenada 0,0 hasta la coordenada 1,1) indican un bajo grado de clasificación del modelo, por su parte, valores por encima de 0,5 indican que el modelo presenta un grado de clasificación aceptable; el cual aumenta su grado al acercarse a 1 (clasificación perfecta). El área bajo la curva ROC fue calculada utilizando la función “trapz” (integración numérica trapezoidal) de Matlab, arrojando un valor de 0,9841.

Como se puede observar, el valor de AUC (0,9841) se acerca lo suficiente a 1, lo que indica que el modelo clasifica muy bien sus clases “0” y “1”; sin embargo, a manera general se puede observar que la exactitud del modelo está fuertemente controlado por su fase de entrenamiento, ya que en este tipo de redes donde suele ser muy difícil caer en sobreaprendizaje (debido a que el número de ejemplos con los que se entrena la red es muy alto en comparación con el número de sus entradas) el proceso de entrenamiento se detiene con los parámetros de entrenamiento de parada que uno define. Por ejemplo, en la mayoría de los casos, valores muy altos en el error de generalización “goal” generan modelos cuyo grado de clasificación es casi perfecto ($AUC \approx 1$); mientras que valores más bajos generaran modelos con un grado de clasificación más baja. Por lo que se considera de vital importancia en estas aplicaciones que el experto establezca un margen de error adecuado para el modelo en base a la calidad, cantidad y escala de sus datos.

Figura 137. Curva ROC.



Fuente: Tomado y modificado de Matlab R2015a.

Con el fin de conocer la influencia que tiene cada entrada en la salida de la red (importancia relativa), se aplicó el método “Stepwise”, en el que se evalúa el rendimiento de la red (MSE) utilizando los valores de una sola entrada, mientras que todas las otras se eliminan (se hacen “0”), de esta manera los MSE más bajos corresponderán a las variables de mayor contribución al modelo, ya que desde que estas variables estén presentes el modelo clasifica bien la zona; mientras que los MSE más alto corresponderán a las variables de menor contribución (Sung, 1998). La importancia relativa de las entradas de la red (**Tabla 40**) indican que la rugosidad y la morfodinámica son los atributos que más influyen en la generación de movimientos en masa, asociando sus calificaciones altas a susceptibilidades altas y calificaciones bajas a susceptibilidades bajas, mientras que los atributos de cobertura de la tierra y acuenca son los menos influyentes, por lo que sus calificaciones no tienen una relación directa con la susceptibilidad y por ende una misma calificación se puede asociar a diferentes susceptibilidades.

Tabla 40. Importancia relativa de cada uno de los factores causantes.

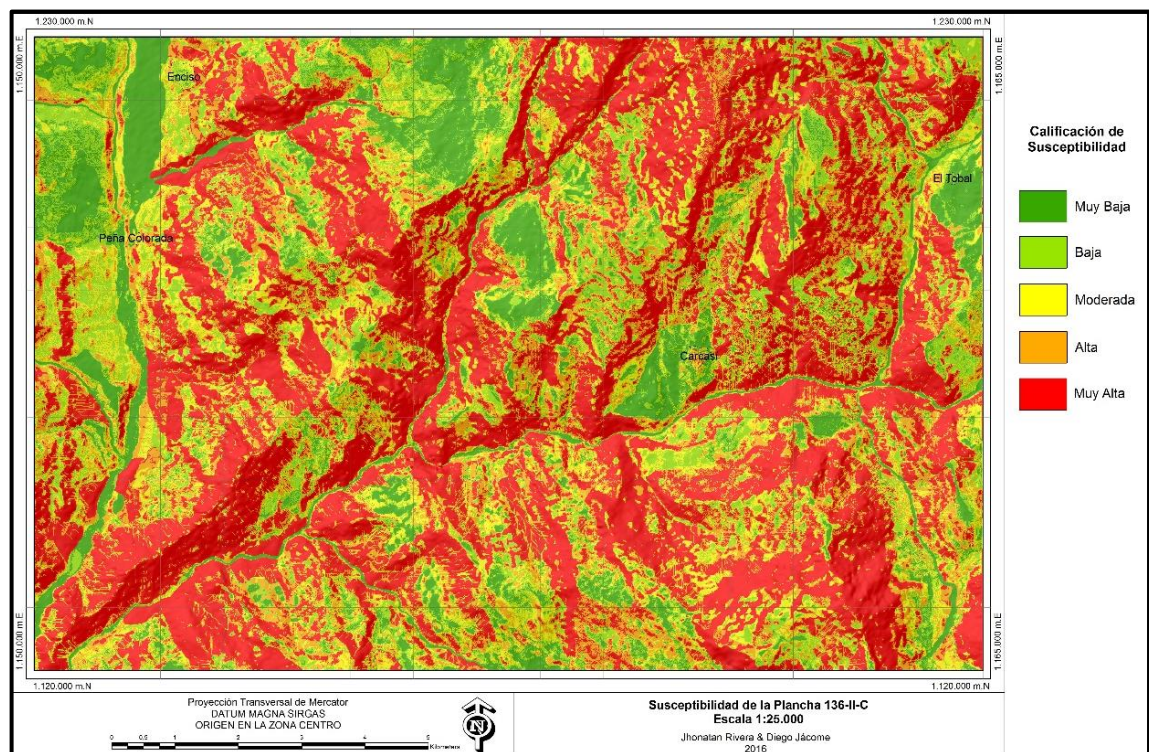
IMPORTANCIA	ATRIBUTO	MSE
1	Rugosidad	0,1874
2	Morfodinámica	0,1891
3	Pendientes	0,2838
4	Morfogenética	0,2974
5	Densidad de Fracturamiento	0,3013
6	Curvatura	0,3418
7	Suelos	0,3715
8	Unidades Geológicas Superficiales	0,3827
9	Geología	0,3862
10	Acuenca	0,3942
11	Cobertura de la Tierra	0,3996

9.7. SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

El mapa de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C (**Figura 138**) es el resultado de la aplicación de las redes neuronales artificiales

sobre los factores causantes descritos previamente. Este mapa presenta 5 categorías, susceptibilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta; a continuación se analiza cada clase de susceptibilidad en términos de su cantidad de píxeles y cantidad de píxeles con movimientos en masa.

Figura 138. Mapa de zonificación de la susceptibilidad relativa a movimientos en masa de la plancha 136-II-C.



El número y la frecuencia relativa de píxeles en cada clase de susceptibilidad (**Tabla 41 y Figura 139**) indican que la plancha 136-II-C presenta principalmente susceptibilidades muy altas (41,53%), seguida, en menor medida, de susceptibilidades altas (18,3%), bajas (14,67%), moderadas (13,53%) y muy bajas (11,96%). Con el fin de realizar una descripción adecuada de cada una de estas clases, se superpuso cada factor causante sobre el mapa de susceptibilidad; estas descripciones se presentan a detalle más adelante. Por otro lado, el número de píxeles de MM presentes en cada clase (**Tabla 42 Y Figura 140**) indican que el

mapa de susceptibilidad logra identificar el 85,76% de los movimientos en masa dentro de su categoría correspondiente (susceptibilidad muy alta); mientras que el otro 14,24% de los movimientos se distribuyen en las demás categorías, de la siguiente manera: susceptibilidad alta (10,13%), moderada (2,5%), baja (1,33%) y muy baja (0,28%).

Tabla 41. Número de píxeles para cada clase de susceptibilidad.

CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	NÚMERO DE PÍXELES	FRECUENCIA RELATIVA
Muy Baja	114819	11,96 %
Baja	140860	14,67 %
Moderada	129873	13,53 %
Alta	175714	18,3 %
Muy Alta	398734	41,53 %
TOTAL	960000	100 %

Figura 139. Cantidad de píxeles en cada clase de susceptibilidad.

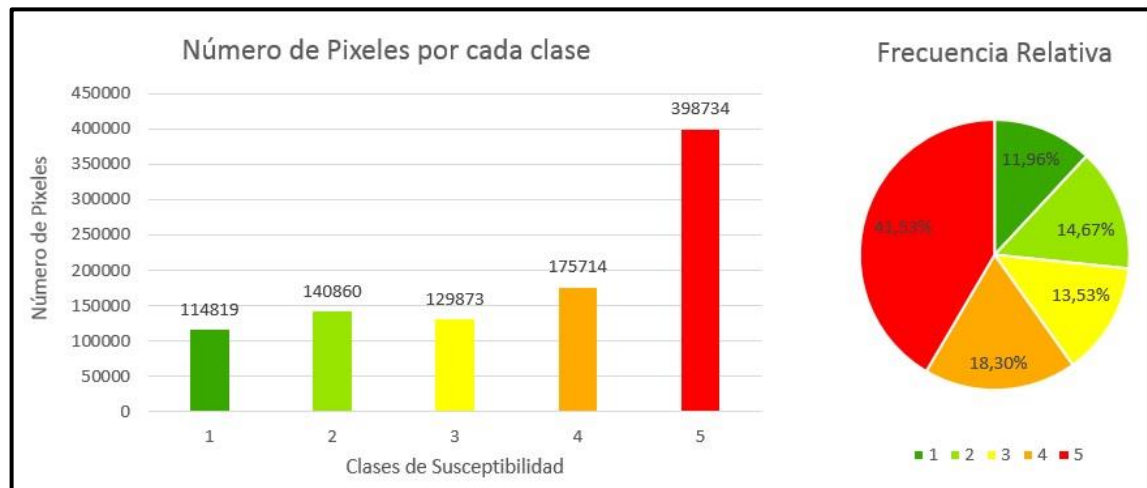
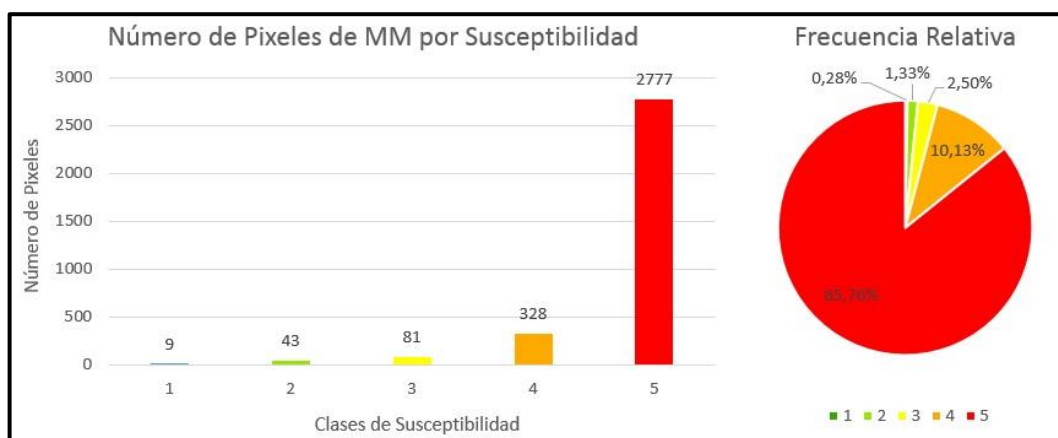


Tabla 42. Número de píxeles con movimientos en masa presentes en cada clase de susceptibilidad.

CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	NÚMERO DE PÍXELES CON MM	FRECUENCIA RELATIVA
Muy Baja	9	0,28 %
Baja	43	1,33 %
Moderada	81	2,5 %
Alta	328	10,13 %
Muy Alta	2777	85,76 %
TOTAL	960000	100 %

Figura 140. Cantidad de píxeles de MM en cada clase de susceptibilidad.



9.7.1. Susceptibilidad Muy Alta. La susceptibilidad muy alta corresponde a la categoría de mayor extensión en la zona de estudio, cubriendo un 41,53% de esta. Se encuentra localizada principalmente en las partes medias y altas de las sierras de los municipios de Enciso y Carcasí; a lo largo de los ríos y quebradas Tunebo y Petaquera, Puertas, Ínsula y Quebrada Honda; y a lo largo de estructuras geológicas en sentido NE – SW del Municipio de Enciso y San Miguel.

Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes abruptas a escarpadas (>19°), rugosidades medias, altas y muy altas, curvaturas cóncavas a convexas, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta y

flujo acumulado las más frecuentes. Morfodinámicamente las zonas de susceptibilidades muy altas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas moderadas, altas y muy altas; correspondientes a materiales resistentes y erosión moderada con relieves relativos altos (superiores a 400 metros), geoformas asociadas a depósitos y movimientos en masa.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a unidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional y antrópico, siendo el ambiente estructural el de mayor asociación. Dentro de las unidades de origen estructural, destacan las geoformas endógenas agradacionales de laderas en contrapendiente de sierras homoclinales y sinclinales (Sshlc y Ssslc), sierras estructurales (Ss), laderas estructurales de sierras sinclinales (Sssle), escarpes de línea de falla (Slfe), escarpes en contrapendiente (Secp), escarpes estructurales (See), lomos estructurales (Sloes), lomas anticlinales (Sla), laderas en contrapendiente de colinas estructurales (Slcpco) y lomos de obturación (Slo); las cuales presentan una relación directa con las susceptibilidades muy altas. Con una menor relación se encuentran los espolones festoneados bajos largos (Sefesbl), espolones faceteados bajos largos (Sefcbl), laderas estructurales (Sle), colinas estructurales (Sces), laderas estructurales de sierras homoclinales y sinclinales (Sshle y Sssle) y laderas estructurales de colinas (Sleco). Dentro de las unidades de origen denudacional, esta susceptibilidad se encuentra relacionada con lomos denudados bajos de longitud corta (Dldebc), lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl), escarpes de erosión menor y mayor (Deeme y Deem), conos o lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco), escarpes faceteados (Def), cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt) y cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft). Por otro lado, la única unidad geomorfológica de ambiente antrópico relacionada a susceptibilidades muy altas fueron las dos geoformas de canteras (Ac) localizadas sobre la Vereda Salado Bravo de San José de Miranda y Loma Del Negro de Enciso.

Litológicamente las susceptibilidades muy altas se encuentran relacionadas a depósitos inconsolidados de origen coluvial de pendientes muy inclinadas a escarpadas y rocas clásticas consolidadas y cementadas correspondientes a las formaciones Paleógenas de Los Cuervos (Tplc) y Barco (Tpb), localizadas en el flanco este del Sinclinal de Servitá. En menor medida se encuentran asociadas a rocas clásticas cementadas de la Formación Aguardiente (Kia) y Mirador (Tem). A nivel estructural, estas susceptibilidades se presentan en zonas de media, alta y muy alta densidad de fracturamiento, principalmente en los anticlinales y sinclinales de la zona de estudio. En términos de (UGS) las susceptibilidades muy altas se encuentran relacionadas a todas las clases de unidades geológicas superficiales (exceptuando únicamente las unidades de suelos antrópicos); principalmente en rocas (R) de las formaciones Paleozoicas, Cretácicas y Paleógenas y suelos coluviales (Sc) desarrollados sobre laderas muy inclinadas.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidades muy altas a los MM, son las unidades MEA, MHA y MRA, las cuales se desarrollan en paisajes montañosos con climas muy fríos. El grupo indiferenciado MEA (Lithic Cryorthents – Lithic Cryumbrepts) se desarrolla principalmente sobre la Formación Tibú-Mercedes, localizada en las partes altas de la sierra de la Vereda Victarigua del Municipio de Carcasí. Este grupo se caracteriza por presentar suelos muy superficiales y superficiales; texturas franco arenosa, franca; reacción extremada a moderadamente ácida; niveles tóxicos en aluminio; fertilidad baja y muy baja; y erosión leve. Por otro lado, el grupo indiferenciado MHA (Lithic Troorthents – Typic Dystropepts) se desarrolla sobre las formaciones Tibú-Mercedes, Paleozoico del Río Nevado y Aguardiente, localizadas en las sierras y colinas de las veredas Victarigua, Montonera y Robles. Este grupo se caracteriza por presentar suelos muy superficiales y profundos; texturas franco arenosa, franco arcilloso, arenosa; reacción muy fuerte a extremadamente ácida; fertilidad alta, baja y muy baja; y erosión moderada en algunos sectores. La consociación MRA (Typic Ustorthents) se desarrolla sobre las formaciones Paleógenas Barco, Los Cuervos y

Carbonera, localizadas en las veredas Agua Sucia, Juncal y Quebrada de Vera del Municipio de Enciso. Esta consociación se caracteriza por presentar suelos superficiales, textura franco arcillo arenosa; reacción moderadamente ácida a ligeramente alcalina; fertilidad alta y muy alta; y erosión moderada. En términos de cobertura de la tierra, las susceptibilidades muy altas se presentan principalmente en coberturas tipo arbustos y vegetación herbácea; las cuales presentan las siguientes características: profundidades radiculares mayores a 150 cm, drenaje profundo de tipo moderadamente profundo a profundo, estratos de baja densidad estructural y evapotranspiraciones altas a muy altas.

En resumen, las susceptibilidades muy altas a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C se presentan principalmente en geoformas asociadas a depósitos coluviales y unidades geomorfológicas estructurales, correspondientes a geoformas anticlinales y sinclinales, escarpes y laderas en contrapendiente; producto del modelado de rocas Paleógenas y cretácicas correspondientes a la Formación Barco, Los Cuervos, Mirador y Aguardiente; las cuales generan suelos tipo MEA, MRA y MHA que permiten el desarrollo de coberturas vegetales de tipo arbustiva y vegetación herbácea.

9.7.2. Susceptibilidad Alta. La susceptibilidad alta corresponde a la segunda categoría de mayor extensión en la zona de estudio, cubriendo un 18,3% de esta. Se encuentra distribuida homogéneamente a lo largo de toda la plancha; exceptuando las inmediaciones de las Veredas Carbonera, Salado Bravo, Popaga, Tierra Blanca, Mosgua, Robles, Buenavista, Centro, El Reposo y Babega. Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes muy inclinadas a abruptas (11° - 40°), rugosidades bajas a medias, curvaturas cóncavas a convexas, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de drenaje no permanente, divisorias de aguas y flujo acumulado las más frecuentes.

Morfodinámicamente las susceptibilidades altas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas moderadas y bajas; correspondientes a materiales con erosión moderada y relieves relativos entre 200 y 500 metros.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a unidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional y fluvial; siendo el ambiente denudacional el de mayor asociación. Dentro de las unidades de origen denudacional, destacan las geoformas exógenas agradacionales de lomos denudados (Dld), lomos denudados bajos de longitud media (Dldebm) y Conos o lóbulos coluviales (Dco) de pendientes muy inclinadas; y en menor medida laderas erosivas y onduladas (Dle y Dlo). Dentro de las unidades de origen estructural, esta susceptibilidad se encuentra relacionada con laderas estructurales (Sle) y en menor medida espolones festoneados bajos de longitud larga (Sefesbl), espolones faceteados bajos de longitud larga (Sefcbl) y laderas estructurales de sierras homoclinales (Sshle). Por otro lado, los escarpes de terraza de erosión (Ftee) corresponden a las únicas geoformas fluviales relacionadas a susceptibilidades altas.

Litológicamente las susceptibilidades altas se encuentran relacionadas a depósitos coluviales (Qc) y rocas Cretáceas y en menor medida Paleógenas, siendo la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) la de mayor relación. A nivel estructural, estas susceptibilidades se presentan en zonas de media y alta densidad de fracturamiento. En términos de (UGS) las susceptibilidades altas se encuentran relacionadas principalmente con suelos residuales (Sr) de formaciones Cretácicas y suelos coluviales (Sc) desarrollados sobre laderas de pendientes inclinadas.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidades altas a los movimientos en masa son las unidades MQA y MQB, las cuales se desarrollan en paisajes montañosos de laderas y conos con climas templados húmedos a muy húmedos. El grupo indiferenciado MQA (Typic Troprothents – Typic Dystropepts) se desarrolla sobre las Formación Paleozoico del

Río Nevado, Aguardiente y Colón-Mito Juan, localizadas en las Veredas Tierra Blanca y Popaga en la Vereda Villetas, Saucara y San Jacinto. Este grupo se caracteriza por presentar suelos muy superficiales, moderadamente profundos a profundos, texturas franca, franco arcillosa, arenosa franca; reacción extremada a moderadamente ácida; fertilidad baja a muy baja; y erosión leve. Por otro lado, el grupo indiferenciado MQB (Typic Troprothents – Oxic Dystropepts) se desarrolla únicamente sobre las formaciones Paleógenas Mirador y Los Cuervos. Este grupo se caracteriza por presentar suelos moderadamente profundos a profundos, texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa y franca; reacción muy fuerte a moderadamente ácida; fertilidad baja; y erosión leve. En términos de cobertura de la tierra, las susceptibilidades muy altas se presentan principalmente en coberturas tipo bosque de galería y/o ripario y bosque denso; las cuales presentan las siguientes características: profundidades radiculares mayores a 150 cm, drenaje profundo de tipo profundo, estratos de alta densidad estructural y evapotranspiraciones muy bajas.

En resumen, las susceptibilidades altas a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C se presentan principalmente en geoformas asociadas a escarpes de terraza de erosión, laderas estructurales, conos o lóbulos coluviales de pendientes muy inclinadas y unidades geomorfológicas denudacionales, correspondientes a lomos denudados y lomos denudados bajos de longitud media; producto del modelado de suelos residuales de formaciones Cretácicas y en menor medida Paleógenas; las cuales generan suelos tipo MQA y MQB que permiten el desarrollo de coberturas vegetales de tipo bosque de galería.

9.7.3. Susceptibilidad Moderada. La susceptibilidad moderada cubre el un 13,53% del área total de la plancha 136-II-C. Se encuentra distribuida homogéneamente a lo largo de toda la plancha; exceptuando las inmediaciones de las Veredas Carbonera, Salado Bravo, Popaga, Tierra Blanca, Mosgua, Robles, Buenavista, Centro, El Reposo y Babega. Esta susceptibilidad presenta características similares a las presentadas por la susceptibilidad alta. Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes inclinadas a muy inclinadas (7°- 19°), rugosidades bajas, curvaturas principalmente cóncavas, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta y flujo acumulado las más frecuentes.

Morfodinámicamente las susceptibilidades moderadas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas moderadas y bajas; correspondientes a materiales moderadamente blandos y erosión alta y relieves relativos entre 200 y 400 metros.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a unidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional, fluvial y antropogénico; destacándose las geoformas de cuesta (Sc), superficies de explanación (Asp), como lo son los cascos urbanos del Municipio de Enciso y Carcasí, Conos o lóbulos coluviales (Dco) de pendientes planas a inclinadas, y en menor medida, la ladera contrapendiente de la sierra homoclinal (Sshlc) del Municipio de San José de Miranda, escarpes de terraza (Ftee) y laderas onduladas (Dlo), exceptuando las que se presentan alrededor de la cabecera municipal de Carcasí y el corregimiento el Tobal.

Litológicamente las susceptibilidades moderadas se encuentran relacionadas a las rocas clásticas consolidadas de las formaciones Capacho (Ksc), Colón-Mito Juan (Kscm) y, en menor medida, las rocas de la Formación La Luna (Ksl) y Mirador (Tem), especialmente las que afloran en el flanco oeste del Sinclinal de Servitá. Estructuralmente, estas susceptibilidades se presentan principalmente en zonas de baja densidad de fracturamiento. En términos de (UGS) las susceptibilidades moderadas se encuentran relacionadas principalmente con suelos residuales (Sr)

de las formaciones anteriormente descritas y suelos coluviales (Sc) desarrollados sobre laderas de pendientes planas a inclinadas.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidades moderadas a los movimientos en masa son las unidades MRA, MRG, ZU “Zonas Urbanas” y en menor medida MLD y MMD, las cuales se desarrollan en paisajes montañosos de sierras y colinas con climas templados secos. La consociación MRA (Typic Ustorthents) se desarrolla sobre las formaciones Colón-Mito Juan y Carbonera, localizadas en las Veredas Salado Bravo, Carbonera y Loma Del Negro. Esta consociación se caracteriza por presentar suelos superficiales, textura franco arcillo arenosa; reacción moderadamente ácida a ligeramente alcalina; fertilidad alta y muy alta; y erosión moderada a severa. Por otro lado, la asociación MRG (Typic Ustropepts – Typic Ustorthents y Entic Haplustolls) se desarrolla sobre las formaciones Cretácicas Colón-Mito Juan, Capacho y La Luna. Este grupo se caracteriza por presentar suelos moderadamente profundos y superficiales, texturas franco arcillo arenosa, franca, franco arenosa, arcillo arenosa; reacción medianamente alcalina y neutral; fertilidad moderada; y erosión leve a moderada. En términos de cobertura de la tierra, las susceptibilidades moderadas se presentan principalmente en coberturas tipo pastos enmalezados, pastos limpios y tejido urbano; las cuales presentan las siguientes características: profundidades radiculares superficiales y profundas, drenaje profundo de tipo moderadamente profundo y muy profundo, estratos de baja densidad estructural y evapotranspiraciones bajas.

En resumen, las susceptibilidades moderadas a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C se presentan principalmente en geoformas asociadas a superficies de explanación, cuevas, conos o lóbulos coluviales de pendientes inclinadas y en menor medida laderas estructurales de sierra homoclinal y laderas onduladas; producto del modelado de suelos residuales de formaciones Capacho, Colón-Mito Juan, La Luna y Mirador; las cuales generan suelos tipo MRA y MRG que permiten

el desarrollo de coberturas vegetales de tipo pasto. Cabe destacar que las cabeceras municipales de Enciso y Carcasí presentan susceptibilidades moderadas.

9.7.4. Susceptibilidad Baja. La susceptibilidad baja cubre el un 14,67% del área total de la plancha 136-II-C. Se encuentra localizada principalmente en algunos sectores de las veredas Salado Bravo, Popaga y Tierra Blanca del Municipio de San José de Miranda; las veredas Villeta y Robles del Municipio de Enciso, las veredas Montonera, Buenavista, Victarigua, Babega, Sirguaza, San Jacinto y San José de Carcasí. Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes inclinadas a muy inclinadas (7° - 19°), rugosidades bajas y muy bajas, curvaturas cóncavas, convexas y rectas, y diferentes valores de acuenca, siendo las zonas de escorrentía lenta las más frecuentes. Morfodinámicamente las susceptibilidades bajas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas bajas y muy bajas; correspondientes a materiales blandos erosionables y relieves relativos menores a 200 metros.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a unidades geomorfológicas de origen estructural, denudacional, fluvial y antropogénico; destacándose las geoformas de laderas en contrapendiente (Slcp), ladera estructural de loma (Slcl), cornisas estructurales (Scor), cono de deyección (Fcdy), Conos o lóbulos coluviales (Dco) de pendientes planas, laderas estructurales de sierras homoclinales (Sshle); y en menor medida laderas onduladas (Dlo), superficies de explanación (Asp), cuestras (Sc) y una ladera contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc) localizada en el flanco Oeste del Sinclinal de Servitá.

Litológicamente la susceptibilidad baja se encuentra relacionada a los depósitos de cono de deyección (Qcal) y rocas de las formaciones Rio Negro (Kirn), Capacho (Ksc), Colón-Mito Juan (Kscm), Carbonera (Tec); y en algunos sectores de la

Formación Tibú-Mercedes, Paleozoico del Río Nevado y Aguardiente. Estructuralmente, estas susceptibilidades se presentan principalmente en zonas de baja y muy baja densidad de fracturamiento. En términos de (UGS) las susceptibilidades bajas se encuentran relacionadas principalmente con suelos residuales (Sr) de las formaciones anteriormente descritas y suelos coluviales (Sc) desarrollados sobre laderas de pendientes planas.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidades bajas a los movimientos en masa son las unidades MQH, MLD, MLA, MMD y en menor medida MQA; las cuales se desarrollan en paisajes montañosos de laderas y conos con climas medio húmedos, muy húmedos y ríos. La asociación MQH (Typic Humitropepts –Typic Dystropepts y Typic Troporthents) se desarrolla sobre las formaciones Rio Negro, Mirador y Carbonera, localizadas en las veredas Tierra Blanca y Popaga del Municipio de San José de Miranda. Esta consociación se caracteriza por presentar suelos superficiales y profundos, texturas franco arcillosa, arcillosa, franco arenosa, arcillo arenosa; reacción fuertemente ácida y neutral a ligeramente alcalina; fertilidad natural baja y moderada; y erosión en algunos sectores moderada. Por otro lado, la consociación “MLD” (Typic Humitropepts – Typic Dystropepts) se desarrolla principalmente sobre depósitos coluviales y la Formación Tibú-Mercedes. Este grupo se caracteriza por presentar suelos moderadamente profundos, texturas franco arenosa, franco arcillo arenosa, arcillosa y arcillolimsa; reacción extremada a fuertemente ácida; fertilidad baja; y erosión leve. En términos de cobertura de la tierra, las susceptibilidades bajas se presentan principalmente en coberturas tipo mosaicos de cultivos y pastos, y en menor medida, pastos limpios y herbazales.

En resumen, las susceptibilidades bajas a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C se presentan principalmente en geformas asociadas a conos de deyección, laderas estructurales de loma y laderas en contrapendiente, cornisas estructurales, laderas estructurales de sierras homoclinales y conos o lóbulos

coluviales de pendientes planas; producto del modelado de suelos residuales de formaciones de las formaciones Rio Negro, Capacho, Colón-Mito Juan y Carbonera; las cuales generan suelos tipo MQH, MMD, MLD y MLA que permiten el desarrollo de coberturas vegetales principalmente de tipo mosaicos de cultivos y pastos.

9.7.5. Susceptibilidad Muy Baja. La susceptibilidad muy baja cubre el un 11,96% del área total de la plancha 136-II-C. Se encuentra localizada principalmente en algunos sectores de las veredas Popaga y Tierra Blanca del Municipio de San José de Miranda; las veredas Mosgua, Ínsula y Robles del Municipio de Enciso, la vereda Arenal del Municipio de San Miguel, la vereda Buenavista, Saucara, Centro y El Reposo del Municipio de Carcasí. Morfométricamente se caracteriza por estar asociada a pendientes planas ($< 7^\circ$), rugosidades muy bajas, curvaturas principalmente cóncavas y rectas, y diferentes valores de acuenca, siendo la zona de escorrentía lenta la de mayor asociación. Morfodinámicamente las susceptibilidades muy bajas se presentan en zonas con calificaciones morfodinámicas bajas y principalmente muy bajas; correspondientes a materiales muy blandos y erosionables y relieves relativos menores a 100 metros.

Morfogenéticamente se encuentra asociada a unidades geomorfológicas de origen denudacional, antropogénico y fluvial, siendo el ambiente fluvial el de mayor asociación; destacándose las geoformas de planos o llanuras de inundación (Fpi), cauces aluviales (Fca), planos y artenas lagunar (Fpl), terraza de erosión (Fte). Dentro de las unidades de origen denudacional, esta susceptibilidad se encuentra relacionada con superficies de erosión o aplanamiento (Dsa) y cimas (Dc). Por otro lado la única geoforma de origen antropogénica asociada a susceptibilidades muy bajas corresponden a las terrazas agrícolas (Ata),

Litológicamente la susceptibilidad muy baja se encuentra fuertemente relacionada con los a los depósitos aluviales de: cauce activo (Qal2), llanura de inundación

(Qal1), terraza aluvial (Qt) y fluvio-lacustres (Ql). En menor medida se encuentra relacionada a la Formación Paleozoico del Río Nevado (Pcrn), Tibú-Mercedes (Kitm), Capacho (Ksc) y Carbonera (Tec). Estructuralmente, estas susceptibilidades se presentan principalmente en zonas de muy baja densidad de fracturamiento. En términos de (UGS) las susceptibilidades muy bajas se encuentran relacionadas principalmente con suelos aluviales “transportados” (St) y residuales (Sr) de las formaciones y depósitos anteriormente descritos.

Con respecto al atributo de suelo, las unidades que más se encuentran relacionadas a susceptibilidades muy bajas a los movimientos en masa son las unidades MQF, MLD, MRH y en menor medida MQH; las cuales se desarrollan en climas medio húmedos y húmedos. El complejo MQF (Typic Tropofluvents – Fluventic Hapludolls – Aeric Tropic y Fluvaquents) se desarrolla sobre el depósito de terraza aluvial localizado en la Vereda Mosgua. Este complejo se caracteriza por presentar suelos profundos y moderadamente profundos, texturas franco arcillosa, franco arcillo limosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa y franca; reacción fuerte a moderadamente ácida y neutra; fertilidad natural muy baja y alta; y erosión leve. Por otro lado, el complejo “MRH” (Mollic Ustifluvents – Typic Ustorthents) se desarrolla sobre depósitos de llanura de inundación y cauce activo. Este complejo se caracteriza por presentar suelos profundos y superficiales, texturas arcillosas, franco arcillosas, franco limosas, franco arenosas, franca y arenosa y erosión leve. En términos de cobertura de la tierra, las zonas de susceptibilidad muy baja se presentan únicamente en mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales con las siguientes características: profundidades radicales profundas y muy profundas, drenaje profundo de tipo moderadamente profundo y muy profundo, estratos de media y moderadamente alta densidad estructural, y evapotranspiraciones bajas.

En resumen, las susceptibilidades muy bajas a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C se presentan principalmente en geoformas asociadas a planos de llanuras de inundación, cauces aluviales, planos y artesis lagunares, terrazas de

erosión, superficies de erosión, cimas y terrazas agrícolas; producto del modelado de suelos transportados de composición fluvial y fluvio-lacustrina, y en menor medida suelos residuales de las formaciones Paleozoicas del Río Nevado, Tibú-Mercedes, Capacho y Carbonera; las cuales generan suelos tipo MQF, MLD, MRH y MQH que permiten el desarrollo de coberturas vegetales principalmente de tipo mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales.

9.7.6. Redes Neuronales Artificiales vs Método Heurístico. Con el fin de realizar una comparación cualitativa del mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C (**Figura 138**), descrito anteriormente; se generó, a partir de la metodología del SGC (2013), el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C aplicando el método heurístico (**Figura 141**). Este mapa presenta cuatro categorías de susceptibilidad: susceptibilidad baja, moderada, alta y muy alta; siendo la susceptibilidad moderada la de mayor frecuencia en la plancha, seguido de la susceptibilidad alta, baja y muy alta (**Tabla 43**).

Es así como se observa que a manera general las susceptibilidades bajas se encuentran ubicadas a lo largo de los cauces activos, las terrazas aluviales y los planos lagunares; las susceptibilidades moderadas se presenta en zonas de pendientes inclinadas a muy inclinadas, morfodinámica baja y unidades geomorfológicas de diferentes ambientes, siendo el denudacional el de mayor relación; por otra parte, las susceptibilidades altas se presentan en sitios de pendientes abruptas a escarpadas, relieves relativos altos, morfodinámica moderada a muy alta (donde se incluyen los depósitos coluviales) y unidades geomorfológicas principalmente de origen estructural. Por último la susceptibilidad muy alta se presenta únicamente sobre la vereda (ropejo alto), con pendientes abruptas y rugosidades bajas a moderadas.

Figura 141. Mapa de susceptibilidad relativa a Imovimientos en masa de la plancha 136-II-C aplicando el método heurístico. Basado en la metodología del SGC (2013).

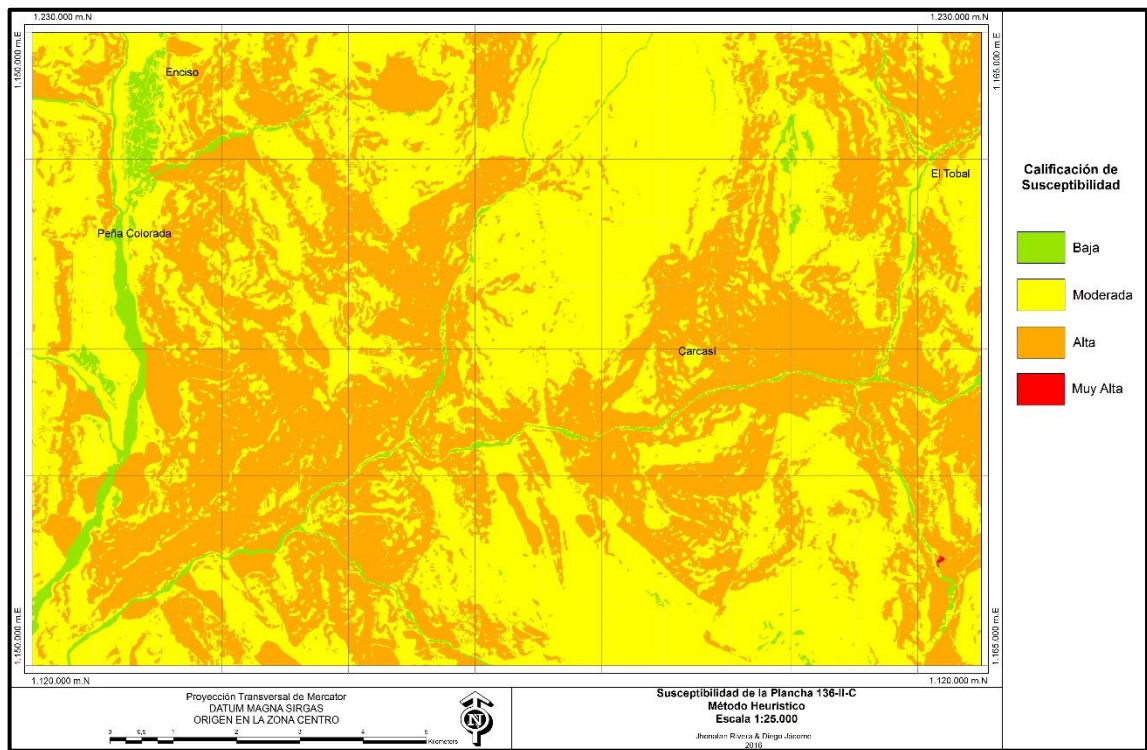


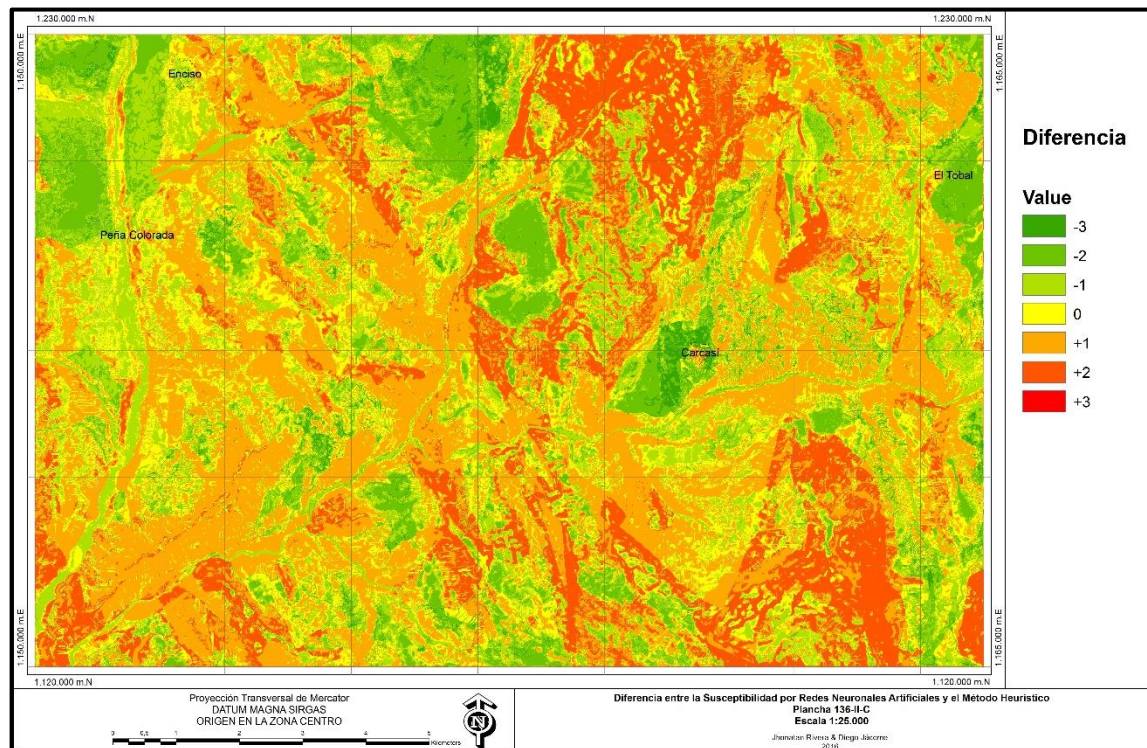
Tabla 43. Número de píxeles y frecuencia relativa de las clases del mapa heurístico de susceptibilidad relativa a movimientos en masa.

CLASE DE SUSCEPTIBILIDAD	NÚMERO DE PÍXELES	FRECUENCIA RELATIVA
2	27707	2,89
3	503360	52,43
4	428869	44,67
5	64	0,01
TOTAL	960000	100

Las categorías de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de los dos mapas (RNA y Heurístico), muestran una marcada diferencia entre ellas. Con el objetivo de representar y analizar estos contrastes se genera el mapa de diferencias de susceptibilidad (**Figura 142**) a partir de la siguiente **Ecuación 11**:

(11) Diferencia = Mapa de Susceptibilidad RNA – Mapa de Susceptibilidad Heurístico

Figura 142. RNA vs Método Heurístico. Diferencia entre los mapas de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa generados mediante redes neuronales artificiales y el método heurístico propuesto por el SGC, 2013.



Las zonas con valor de 0 indican que ambos mapas presentan la misma categoría de susceptibilidad; diferencias negativas indican que el método de RNA está asignando una susceptibilidad menor a las zonas en comparación con las asignadas por el método heurístico; siendo -1 el valor que representa la menor diferencia entre los dos métodos y -3 el valor que representa la mayor diferencia. Por otro lado, diferencias positivas indican que el método de RNA está asignando una susceptibilidad mayor a las zonas en comparación con las asignadas por el método heurístico; siendo +1 el valor que representa la menor diferencia y +3 el valor que representa la mayor diferencia.

Las siguientes tablas permiten conocer el número de píxeles que pertenece a cada clase de diferencia (**Tabla 44**), la proporción del mapa de susceptibilidad por RNA que tiende a arrojar valores superiores, inferiores o iguales en comparación con el mapa de susceptibilidad heurística (**Tabla 45**), y por último, el número de píxeles de cada rango de diferencia (**Tabla 46**).

La **Tabla 44** Indica que el valor de diferencia más frecuente es el de “+1” cubriendo un 35,66% de la zona de estudio; este valor se encuentra ubicado sobre el flanco este de la sierra sinclinal de Servitá, a lo largo de las estructuras NW – SE, algunos depósitos coluviales, escarpes en contrapendiente y sobre la Formación Paleozoico del Río Nevado. Por otro lado, el valor de “+3” es el valor de diferencia menos frecuente, cubriendo tan solo un 0,0002% de la zona de estudio, esta clase se localiza únicamente en la Vereda Saucara del Municipio de Carcasí, cerca del parte aguas de la sierra homoclinal.

Tabla 44. Número de píxeles y frecuencia relativa de la magnitud las diferencias entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).

DIFERENCIA	NÚMERO DE PÍXELES	FRECUENCIA RELATIVA
-3	12392	1,29
-2	107482	11,10
-1	178584	18,6
0	174332	18,16
+1	342304	35,66
+2	144904	15,09
+3	2	0,00
TOTAL	960000	100

La **Tabla 45** muestra que las diferencias positivas son las que más se presentan en la zona de estudio (50,75%), indicando que el mapa generado por RNA tiende a arrojar valores superiores de susceptibilidad en comparación con el mapa heurístico. Esto puede deberse a que las susceptibilidades muy altas del mapa heurístico obedece sólo a algunas combinaciones específicas, las cuales pueden

presentarse o no en la zona de estudio, mientras que en el método de redes neuronales artificiales (RNA) la red es entrenada con la premisa de que todos los movimientos en masa representan zonas de susceptibilidades muy altas; es decir, que todas las combinaciones de factores causantes presentes en dichos movimientos sean consideradas como susceptibilidades muy altas; lo que conlleva a que se presenten más zonas de susceptibilidades muy altas, considerando que es probable que estas combinaciones se presenten en la zona de estudio.

Tabla 45. Número de píxeles y frecuencia relativa de las diferencias positivas y negativas entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).

DIFERENCIA	NÚMERO DE PÍXELES	FRECUENCIA RELATIVA
<0	298458	31,09
0	174332	18,16
>0	487210	50,75
TOTAL	960000	100

Por último, la **Tabla 46** muestra que las diferencias del orden de “1” (ya sea -1 o +1) son las que más se presentan en la plancha 136-II-C (54,26%), seguido de las diferencias del orden de “2” (26,29%), las diferencias nulas o coincidencias (18,16%) y las diferencias del orden de “3” (1,29%). Esto indica que, a pesar de que ambos mapas sólo coinciden en un (18,16%) del total de píxeles, la mayoría de sus diferencias no superan el orden de “1”; por ejemplo, susceptibilidades moderadas del mapa heurístico, suelen ser consideradas por el mapa de RNA como susceptibilidades moderadas, bajas o altas

Tabla 46. Número de píxeles y frecuencia relativa del valor absoluto de las diferencias entre los dos mapas de susceptibilidad (RNA vs Heurístico).

DIFERENCIA	NÚMERO DE PÍXELES	FRECUENCIA RELATIVA
Mayores (del orden de 3)	12394	1,29
Medias (del orden de 2)	252386	26,29
Menores (del orden de 1)	500888	54,26
Nulas (del orden de 0)	174332	18,16
TOTAL	960000	100

10. CONCLUSIONES

- A partir de la cartografía geomorfológica a escala 1:25000, se estableció que la configuración actual del relieve de la plancha 136-II-C refleja el resultado de procesos endógenos y exógenos manifestados en los ambientes estructurales (73,37%), denudacionales (19,45%), fluviales (4,7%) y antropogénicos (2,47%); responsables del origen de las 269 geoformas, asociadas a 48 unidades geomorfológicas.
- A partir de la generación del mapa geológico a escala 1:25000 y su posterior refinamiento en campo, fueron identificados 43 depósitos coluviales, los cuales cubren un área aproximada de 7,29 Km²; estos depósitos, según la metodología del SGC (2013), corresponden a zonas de susceptibilidades altas a muy altas; sin embargo, la red neuronal artificial indica que solo los depósitos coluviales que presentan pendientes muy inclinadas (>11°) y rugosidades altas a muy altas deben ser considerados como zonas de susceptibilidad a los movimientos en masa altas a muy altas.
- La relación entre las UGS de roca y suelos residuales de cada formación geológica, permitieron observar que las formaciones Los Cuervos (Tplc), Barco (Tpb), Mirador (Tem) y Aguardiente (Kia) son las unidades litoestratigráficas más resistentes a los procesos de meteorización y erosión; mientras que las formaciones Rio Negro (Kirn), Capacho (Ksc) y Tibú-Mercedes (Kitm) se encuentran fuertemente afectadas por estos procesos.
- El análisis estadístico de los 28 MM registrados en la fase de campo, permitió establecer que los municipios de Enciso y Carcasí son los que presentan mayor frecuencia de movimientos en masa, con 9 MM cada uno; siendo, la Vereda Cruz Grande y Garbanzal del Municipio de Carcasí la más afectada (6 MM); esta

elevada frecuencia es producto de la socavación lateral del Río Tunebo, la influencia de su falla homónima y la litología predominantemente lodosa. Por otra parte, los movimientos en masa de la plancha 136-II-C suelen encontrarse en un estado latente, estilo único y distribución ensanchada asociados a la inestabilidad de rocas clásticas cementadas y consolidadas de la Formación Aguardiente y Paleozoico del Río Nevado, especialmente las que dieron origen a las laderas contrapendiente de sierra homoclinal, desplazando predominantemente material de detritos.

- A partir del análisis espacial de los factores causantes de los movimientos en masa evaluados en este proyecto, se estableció que la ocurrencia de MM de la plancha 136-II-C, se encuentra fuertemente relacionada a la inestabilidad de suelos coluviales y rocas clásticas consolidadas moderadamente duras con alto grado de fracturamiento, asociados morfogénicamente a conos de depósitos coluviales (Dco) y unidades geomorfológicas estructurales, respectivamente; las cuales suelen presentar rasgos morfométricos de pendientes inclinadas a escarpadas, rugosidades altas a muy altas y relieves relativos altos a muy altos; impidiendo el fácil desarrollo de suelo y vegetación, encontrándose principalmente pastos y suelos tipo (MLA, MRH, MRG, MQA, MQF, MQH y MLD).
- La evaluación de diferentes modelos de redes neuronales; permitió identificar que la mayoría de ellos consideran que el factor causante más influyente es el de morfodinámica; esto es fácil de deducir si tenemos en cuenta que todos los movimientos en masa se encuentran dentro de la clase de susceptibilidad muy alta "5" de este atributo; esta clase también incluye todos los depósitos coluviales presentes en la zona, los cuales, al aplicar la red neuronal artificial, son considerados en la mayoría de los casos como zonas de susceptibilidad a los movimientos en masa muy alta. Con el fin de establecer el resultado verdadero de susceptibilidad para los depósitos coluviales, se programaron algunas redes neuronales artificiales, sin tener en cuenta el atributo de morfodinámica; logrando

identificar que la mayoría de los depósitos coluviales, aún sin este atributo, corresponden a zonas de susceptibilidad alta a muy alta; sin embargo, cabe destacar que estos modelos presentan una exactitud inferior en comparación con la exactitud de los modelos donde si se tiene en cuenta la entrada de morfodinámica.

- La comparación entre los resultados generados por los diferentes algoritmos Back-Propagation empleados en este trabajo de investigación, permitió establecer que el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt (LM), es el que ofrece valores de MSE más bajos ($\approx 0,02$) y convergencias más rápidas ($\approx 1,8$ iteraciones); mientras que el algoritmo Variable Learning Rate Gradient Descent (GDV) presenta los valores de MSE más altos ($\approx 0,043$) y convergencias más lentas ($\approx 77,39$ iteraciones).
- El resultado obtenido por la red al evaluar la susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C, ofreció una excelente zonificación (Performance = 0,042; ACC = 0,8817; ROC = 0,9841) al utilizar 18 neuronas dentro de su capa oculta. Al comparar esta cantidad con las 17 neuronas ocultas utilizadas en el trabajo de Machucha (2016) para la generación del mapa de susceptibilidad de plancha 136 - Málaga; se llegó a la conclusión de que al evaluar la susceptibilidad en áreas similares a la zona de estudio, la red neuronal artificial ofrece mejores resultados al utilizar dentro de su arquitectura, 18 neuronas ocultas, o números cercanos a este. Por otro lado, al aplicar las funciones de activación logsig para la capa oculta y tansig para la capa de salida durante la etapa de entrenamiento; se pudo apreciar que las normalizaciones en el rango de $[-1 - 1]$ ofrecen mejores resultados en comparación con las normalizaciones en el rango $[0 - 1]$; esto puede deberse a que el rango de las primeras normalizaciones corresponden con todo el dominio de la función de activación logsig.

- A partir del análisis de la importancia relativa de las entradas de la red aplicando el método “Stepwise”, se observó que los factores causantes que arrojaron valores más bajos de MSE fueron: rugosidad (0,1874), morfodinámica (0,1891), pendientes (0,2838) y morfogenética (0,2974); lo cual indica que la geomorfología es el estudio más contribuyente a la hora de generar el mapa de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C. Esto se debe a que la red encuentra una relación directa entre la ocurrencia de movimientos en masa y clases específicas (generalmente muy altas) de dichos factores causantes.
- La configuración actual de la plancha 136-II-C da origen, en mayor proporción, a zonas de susceptibilidad muy alta a los movimientos en masa (41,53%) distribuidas en las partes medias y altas de las sierras de los municipios de Enciso y Carcasí, a lo largo de los drenajes Tunebo, Petaquera, Puertas, Ínsula y Quebrada Honda, y a lo largo de fallas y pliegues en sentido NE-SW de los municipios de Enciso y San Miguel. Las clases de susceptibilidad alta (18,3%), moderada (13,53%) y baja (14,67%) se extienden a lo largo y ancho de toda la plancha, sin embargo, resulta difícil caracterizar estas clases debido a que sus pixeles se distribuyen de manera aislada sin formar grandes áreas, dificultando a su vez la elaboración de proyectos de mitigación. Las zonas de susceptibilidad muy baja (11,96%) se encuentran localizadas en los depósitos aluviales y coluviales de pendientes planas a suavemente inclinadas (<7°).
- La comparación entre los mapas de susceptibilidad a escala 1:25000 generados a partir del método heurístico y el método de redes neuronales artificiales, indicó que el primero de ellos tiende a subestimar las zonas de susceptibilidad muy alta y muy baja a los movimientos en masa del área de estudio, mientras que el segundo tiende a sobrestimar estas zonas. Esta sobreestimación puede deberse a que el error cuadrático medio (MSE) mínimo establecido para el entrenamiento de la red suele ser muy bajo; lo que produce un sobreajuste para las dos clases; mientras que en el método heurístico, las susceptibilidades muy altas tienden a

no presentarse debido a que algunos atributos están clasificados de 1 a 4, y las zonas de susceptibilidad muy baja únicamente corresponden a la combinación entre las susceptibilidades muy bajas de los atributos.

11. RECOMENDACIONES

- La propuesta de calificación de susceptibilidad a los movimientos en masa para cada unidad geológica superficial (UGS), se realizó en base a los movimientos en masa de la zona de estudio; por lo que se recomienda utilizar esta calificación únicamente en zonas aledañas a la plancha 136-II-C. Es por esto que, a falta de una calificación de susceptibilidad por UGS para toda Colombia, se recomienda seguir realizando estudios de susceptibilidad que integren el análisis de UGS.
- El mapa de susceptibilidad a escala 1:25.000 fue generado a partir de la interacción de 11 factores causantes; de los cuales, 9 de ellos fueron generados a escala 1:25.000, mientras que los factores causantes de cobertura de la tierra y suelos fueron suministrados a escala 1:100000. Estos últimos dos factores tuvieron poca influencia en el mapa de susceptibilidad; Sin embargo, se recomienda realizar estudios de suelos y coberturas de la tierra a escala 1:25.000 para la zona, con el fin de evaluar la importancia relativa de estos en el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa.
- Dado que el error “goal”, es quizás el parámetro de entrenamiento de parada de mayor importancia a la hora de entrenar la red neuronal artificial; se considera de vital importancia, realizar numerosos estudios de zonificación de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa a escalas 1:100000 y 1:25.000 aplicando redes neuronales artificiales, con el fin de determinar el error mínimo de generalización “goal” para cada escala que permita generar una zonificación adecuada para cada clase de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa.
- Se sugiere evaluar la susceptibilidad relativa a los movimientos en masa por diferentes métodos, teniendo en cuenta los factores causantes de movimientos en masa; con el fin de que se pueda realizar una futura comparación que permita

determinar el método que brinda mayor exactitud en el estudio de zonificación de susceptibilidad relativa a los movimientos en masa de la plancha 136-II-C. Además, sería de gran utilidad, evaluar la contribución o importancia relativa de cada factor causante implementando diferentes métodos; con el fin de conocer con mayor certeza los factores que más influyen en la generación de movimientos en masa.

- Se recomienda elaborar una metodología a escala 1:25.000 para la susceptibilidad a los movimientos en masa aplicando redes neuronales artificiales, que propicie el desarrollo e implementación de este método en áreas similares a la zona de estudio, sobre todo en estudios de dicha escala.
- Debido a que en la plancha 136-II-C predominan zonas de susceptibilidad muy alta a los movimientos en masa, se considera de vital importancia realizar futuros estudios de amenaza y riesgo, con el fin de mitigar posibles daños causados por este tipo de desastre natural.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-batah, M, et al., (2015). Landslide Occurrence Prediction Using Trainable Cascade Forward Network and Multilayer Perceptron. Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering.
- Alok, B & Venkatachalam, G. (2014). Landslide Hazard Evaluation Using Artificial Neural Networks and GIS.
- Anderson, D & McNeill, G. (1992). Artificial Neural Networks Technology. New York, Estados Unidos.
- Ayala, C & García, C. (2011). Determinación de la temperatura de formación de hidratos del gas natural utilizando redes neuronales artificiales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Barragán, K & Forero, A. (2014). Análisis morfoestructural en el corredor aledaño al Río Servitá entre Enciso y el Río Chicamocha, Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bertona, L. (2005). Entrenamiento de redes neuronales basado en algoritmos evolutivos. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Betancourt, B. (2014). Movimientos en masa asociados a las unidades geológicas de la plancha 87-Sardinita, Servicio Geológico Colombiano Regional Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

- Bi, R, et al., (2014). Landslide susceptibility analysis based on ArcGIS and Artificial Neural Network for a large catchment in Three Gorges region, China. *Environ Earth Sci* 72:1925-1938. China.
- Buckley, A. (2010). Understanding curvature raster's.
- Caicedo, F & López, J. (2009). Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Carvajal, J. (2008). Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. INGEOMINAS. Bogotá, Colombia.
- Carvajal, J., et. al (2012). 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. Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental. 88 p. Bogotá, Colombia.
- Cataya, S, et al., (2008). Metodología empleada para la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en cuencas de drenaje del estado Vargas, Venezuela. Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico de Caracas. *Revista de Investigación* 64.
- Cediél, F, et al., (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir* 79: 815-848. Colombia.
- Cruden, D & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Science, 247: 36-75.

- De Brío, B & Sanz, A. (2007). Redes neuronales y sistemas borrosos. México DF, México. Alfaomega.
- Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Carcasí, Santander. 2003.
- Forero, O. (2014). Contribución a los estudios de geomorfología para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa en las planchas 121 y 136 (escala 1:100.000), Sur del Macizo de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Gervey, M & Dimopoulos, Y. (2003). Review and comparison of methods to study the contribution of variables in Artificial Neural Networks models. Ecological Modelling,
- Gómez, et al. (2015). Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1'000.000. Servicio Geológico Colombiano. Colombia.
- Gómez, H & Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa Rives Basin, Venezuela, Eng. Geology, 7, 11-27, 2005.
- Gray, D & Sotir, R. (1996). Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, A practical guide for erosion control. John Wiley and Sons.
- Hernández, D. (2014). Contribución a los estudios de geomorfología para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa en la plancha 110 Pamplona (escala 1:100.000), al centro-oriente del Macizo de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Hudson, B, et al., (2015). Neural Network Toolbox, User's Guide. Matlab R2015a.

- INGEOMINAS. (2002). Catálogo nacional de movimientos en masa. Subdirección de amenazas geoambientales. Bogotá, Colombia.
- Jaimes, L. (2014). Aspectos morfológicos y morfodinámicos aplicados a la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa en la plancha 119 Barrancabermeja cuenca del Valle Medio del Magdalena. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Lee, S, et al., (2003). Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. *Environmental Geology* 44:820-833. Korea.
- Lee, S. (2007). Landslide susceptibility mapping using an artificial neural network in the Gangneung area, Korea. *International Journal of Remote Sensing* 28-10:4763-4783. Korea.
- Machuca, S. (2016). Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la plancha 136 Málaga aplicando la herramienta de redes neuronales artificiales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Mendel, J & McLaren, R. (1970). Reinforcement learning control and pattern recognition system. *Adaptative, Learning and Pattern Recognition System: Theory and Applications* 287-318.
- Nourani, V, et al., (2013). Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic regression, and artificial neural networks models. *Nat Hazards* 71:523-547. Iran.
- Obregón, C & Lara, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. *Espacio y desarrollo* 25: 49-64. Perú.

- Olden, J & Joy, M. (2004). An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. *Ecol Model. Ecological Modelling*.
- Park, S, et al., (2011). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environ Earth Sci* 68:1443-1464. Korea.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA). *Publicación Geológica Multinacional* 4: 432p.
- Rincón, J. (2014). Contribución a los estudios de geomorfología para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 en la Sierra Nevada del Cocuy (planchas 137 y 153). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Royero, J & Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado Departamento de Santander. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Colombia.
- Royero, J & Vargas, R. (1999). Geología del Departamento del SANTANDER. INGEOMINAS. Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (2013). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá, Colombia.
- Sung, A. (1998). Ranking Importance of Input Parameters of Neural Networks. *Expert System with Application* 15: 405-411.

- Tragsa y Tragsatec. (1994). Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, España.
- Valencia, M, et al., (2006). Algoritmo Backpropagation para Redes Neuronales: conceptos y aplicaciones. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Vargas, R, et al., (1981). Geología de las Planchas 136 Málaga y 152 Soatá, Cuadrángulo I-13, Escala 1:100.000, Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Colombia.
- Vargas, R, et al., (1984). Geología de la Plancha 136 Málaga. Escala: 1.100.000. Versión Digital: 2009. INGEOMINAS. Colombia.
- Vílchez, V. (2010). Estimación y clasificación de daños en materiales utilizando modelos AR y redes neuronales para la evaluación no destructiva con ultrasonido. Universidad de Granada. Granada, España.
- Wu, X., et al., (2013). Landslide susceptibility mapping using rough sets and back-propagation neural networks in Three Gorges, China. Environ Earth Sci 70:1307-1318. China.

ANEXOS

Anexo A. Tabla de recolección de datos de Morfometría para Cartografía Geomorfológica.

Tabla de Recolección de Datos de Morfometría para Cartografía Geomorfológica

Fecha: <input type="text"/> D <input type="text"/> M <input type="text"/> A		Plancha: <input type="text"/> Estación: <input type="text"/>		Lugar: <input type="text"/>		Posición Geográfica: <input type="text"/>		Referencia Geográfica: <input type="text"/>		Cobertura del Suelo (%)		Uso del Suelo (%)	
Departamento: <input type="text"/>		Municipio: <input type="text"/>		Vereda: <input type="text"/>		Sitio: <input type="text"/>		Proyección Magna: <input type="text"/>		Veg. Herbácea	Ganadería	Z. Industrial	Z. Agrícola
X: <input type="text"/>		Y: <input type="text"/>		Z: <input type="text"/>		Proyección Magna: <input type="text"/>		Bosque/Selva	Recreación	Vivienda	Sin Uso	Construcciones	Área Protegida
Cultivos		Minería		Pastos		Sin Cobertura		Sin Cobertura	Sin Cobertura	Sin Cobertura	Sin Cobertura	Sin Cobertura	Sin Cobertura

Morfogénesis		Tipo de Relieve		Índice de Relieve		Inclinación de Ladera		Longitud de la ladera		Forma de la Ladera	
Volcánico	<input type="checkbox"/>	Montañoso >= 400 m	<input type="checkbox"/>	Muy Bajas (< 50 m)	<input type="checkbox"/>	Plana o Suave < 5°	<input type="checkbox"/>	Muy Corta (< 50 m)	<input type="checkbox"/>	Rectilínea	<input type="checkbox"/>
Dorsal/keel	<input type="checkbox"/>	Colina 200 - 400 m	<input type="checkbox"/>	Bajas (50 - 250 m)	<input type="checkbox"/>	Inclivada (6° - 10°)	<input type="checkbox"/>	Corta (50 - 250 m)	<input type="checkbox"/>	Cóncava	<input type="checkbox"/>
Fluvial - Deflujo - Lugar	<input type="checkbox"/>	Loma 50 - 200 m	<input type="checkbox"/>	Moderada (250 - 500 m)	<input type="checkbox"/>	Muy Inclivada (11° - 15°)	<input type="checkbox"/>	Moderadamente Larga (250 - 500 m)	<input type="checkbox"/>	Convexa	<input type="checkbox"/>
Marino - Costero	<input type="checkbox"/>	Montículo < 50 m	<input type="checkbox"/>	Alto (500 - 1000 m)	<input type="checkbox"/>	Abrupta (16° - 20°)	<input type="checkbox"/>	Larga (500 - 1000 m)	<input type="checkbox"/>	Irregular	<input type="checkbox"/>
Glaciar	<input type="checkbox"/>			Muy Alto (>1000 m)	<input type="checkbox"/>	Muy Abrupta (21° - 30°)	<input type="checkbox"/>	Muy Larga (1000 - 2500 m)	<input type="checkbox"/>	Compleja	<input type="checkbox"/>
Rólcico	<input type="checkbox"/>					Escarpada (31° - 45°)	<input type="checkbox"/>	Extremadamente Larga (> 2500 m)	<input type="checkbox"/>		
Kárstico	<input type="checkbox"/>					Muy Escarpada (> 45°)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		
Antropogénico / Biológico	<input type="checkbox"/>										

Forma de Canal		Densidad de Drenaje		Frecuencia de Drenaje		Textura de Drenaje		Patrón de Drenaje		Tipo de Roca	
En U Abierto	<input type="checkbox"/>	Baja (< 0.5 km/km²)	<input type="checkbox"/>	Muy Alta (> 40)	<input type="checkbox"/>	Coarse	<input type="checkbox"/>	Ductivo	<input type="checkbox"/>	Ignea Ácida	<input type="checkbox"/>
En U Cerrado	<input type="checkbox"/>	Moderada (0.5 - 1.0)	<input type="checkbox"/>	Alta (20 - 40)	<input type="checkbox"/>	Medium	<input type="checkbox"/>	Subductivo	<input type="checkbox"/>	Ignea Intermedia	<input type="checkbox"/>
En V Abierto	<input type="checkbox"/>	Alta (> 1.0)	<input type="checkbox"/>	Media (10 - 20)	<input type="checkbox"/>	Fina	<input type="checkbox"/>	Paralelo	<input type="checkbox"/>	Ignea Básica	<input type="checkbox"/>
En V Cerrado	<input type="checkbox"/>			Baja (5 - 10)	<input type="checkbox"/>	Muy Fina	<input type="checkbox"/>	Subpendulo	<input type="checkbox"/>	Ignea Ultrabásica	<input type="checkbox"/>
				Muy Baja (< 5)	<input type="checkbox"/>			Pinalo	<input type="checkbox"/>	Volcánica Proterozóica	<input type="checkbox"/>
								Rectangular	<input type="checkbox"/>	Sedimentaria Consolidada	<input type="checkbox"/>
								Radial	<input type="checkbox"/>	Sedimentaria Consolidada	<input type="checkbox"/>
								Anular	<input type="checkbox"/>	Sedimentaria Cuarcita	<input type="checkbox"/>
								Multicéntrica	<input type="checkbox"/>	Metamórfica Masiva	<input type="checkbox"/>
								Concomitante	<input type="checkbox"/>	Metamórfica Basáltica	<input type="checkbox"/>
								Otro	<input type="checkbox"/>	Metamórfica Bien Foliada	<input type="checkbox"/>

Grado de Meteorización		Tipo de Movimiento		Movimiento en Masa		Estado	
Fresca	<input type="checkbox"/>	Caída	<input type="checkbox"/>	Roca	<input type="checkbox"/>	Activo	<input type="checkbox"/>
Meteorización Débil	<input type="checkbox"/>	Volcánico	<input type="checkbox"/>	Ductivo	<input type="checkbox"/>	Inactivo	<input type="checkbox"/>
Meteorización Moderada	<input type="checkbox"/>	Deslizamiento Rotacional	<input type="checkbox"/>	Suelo	<input type="checkbox"/>	Suspendido	<input type="checkbox"/>
Meteorización Alta	<input type="checkbox"/>	Deslizamiento Translacional	<input type="checkbox"/>	Lodos	<input type="checkbox"/>	Reactivo	<input type="checkbox"/>
Descompuesta	<input type="checkbox"/>	Rotación	<input type="checkbox"/>	Turba	<input type="checkbox"/>		
		Flujos	<input type="checkbox"/>				
		Deslizamiento Lateral	<input type="checkbox"/>				
		Avalancha	<input type="checkbox"/>				
		Compuesto o Múltiple	<input type="checkbox"/>				

Tipo de Material		Tipo de Erosión		Espaciamiento de Canales (m)		Intensidad de Erosión	
Saprítico Coarseno	<input type="checkbox"/>	Limitar	<input type="checkbox"/>	< 5	<input type="checkbox"/>	Suave	<input type="checkbox"/>
Saprítico Fino	<input type="checkbox"/>	Surcos	<input type="checkbox"/>	5 - 15	<input type="checkbox"/>	Moderada	<input type="checkbox"/>
		Barrancos	<input type="checkbox"/>	15 - 50	<input type="checkbox"/>	Severa	<input type="checkbox"/>
		Cárcavas	<input type="checkbox"/>	50 - 100	<input type="checkbox"/>		
		Suscesión	<input type="checkbox"/>	150 - 500	<input type="checkbox"/>		
		Tierra Mala	<input type="checkbox"/>	> 500	<input type="checkbox"/>		
		Terrazas	<input type="checkbox"/>				
		Eólica	<input type="checkbox"/>				
		Glaciar	<input type="checkbox"/>				
		Cárcava	<input type="checkbox"/>				
		Marica	<input type="checkbox"/>				

Observaciones:		Observaciones:	
----------------	--	----------------	--

Página 1

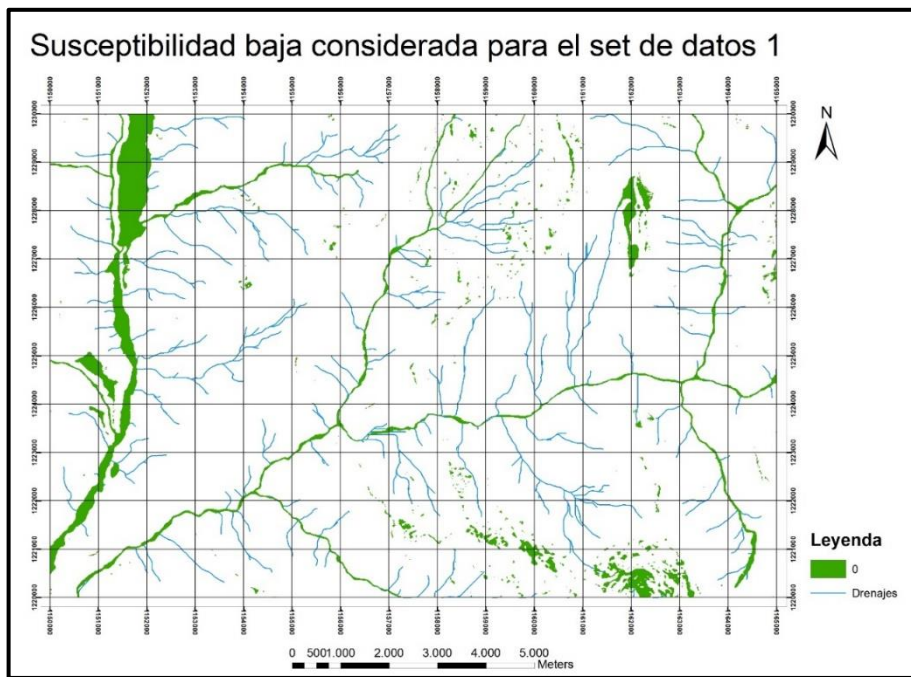
Tipo de Suelo		Tipo de Erosión		Espaciamiento de Canales (m)		Intensidad de Erosión	
Arcillo	<input type="checkbox"/>	Limitar	<input type="checkbox"/>	< 5	<input type="checkbox"/>	Suave	<input type="checkbox"/>
Fagnar	<input type="checkbox"/>	Surcos	<input type="checkbox"/>	5 - 15	<input type="checkbox"/>	Moderada	<input type="checkbox"/>
Delatado	<input type="checkbox"/>	Barrancos	<input type="checkbox"/>	15 - 50	<input type="checkbox"/>	Severa	<input type="checkbox"/>
Rólcico	<input type="checkbox"/>	Cárcavas	<input type="checkbox"/>	50 - 100	<input type="checkbox"/>		
Glaciar	<input type="checkbox"/>	Suscesión	<input type="checkbox"/>	150 - 500	<input type="checkbox"/>		
Volcánico	<input type="checkbox"/>	Tierra Mala	<input type="checkbox"/>	> 500	<input type="checkbox"/>		
Residual	<input type="checkbox"/>	Terrazas	<input type="checkbox"/>				
Coluvial	<input type="checkbox"/>	Eólica	<input type="checkbox"/>				
Flujo de Lodo	<input type="checkbox"/>	Glaciar	<input type="checkbox"/>				
Dóm	<input type="checkbox"/>	Cárcava	<input type="checkbox"/>				
Bloques	<input type="checkbox"/>	Marica	<input type="checkbox"/>				
Corón de Dirección	<input type="checkbox"/>						
Otro	<input type="checkbox"/>						

Observaciones:		Observaciones:	
----------------	--	----------------	--

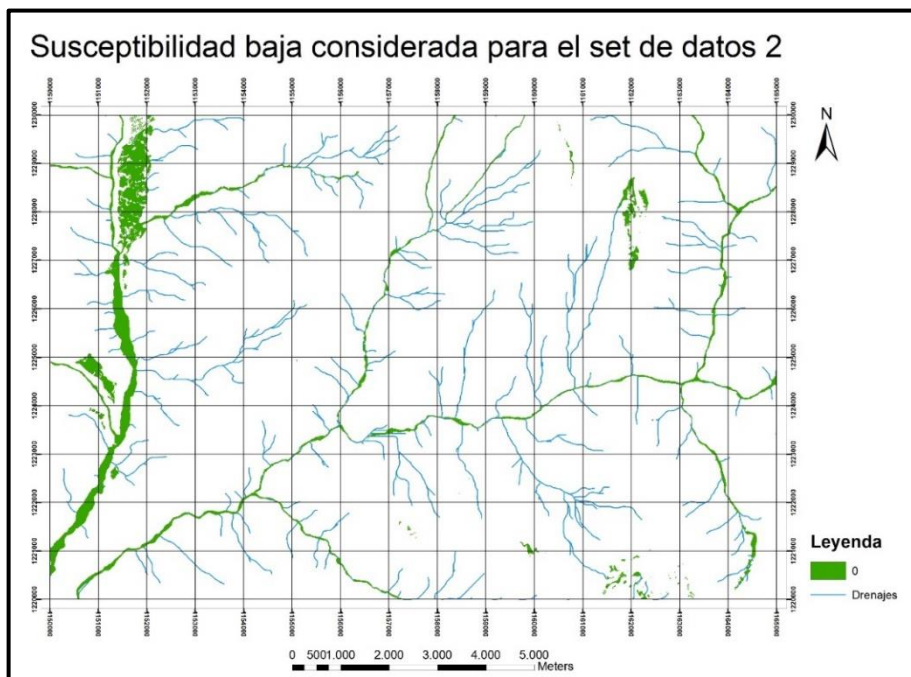
Página 2

Fuente: Valencia & Camargo, 2016.

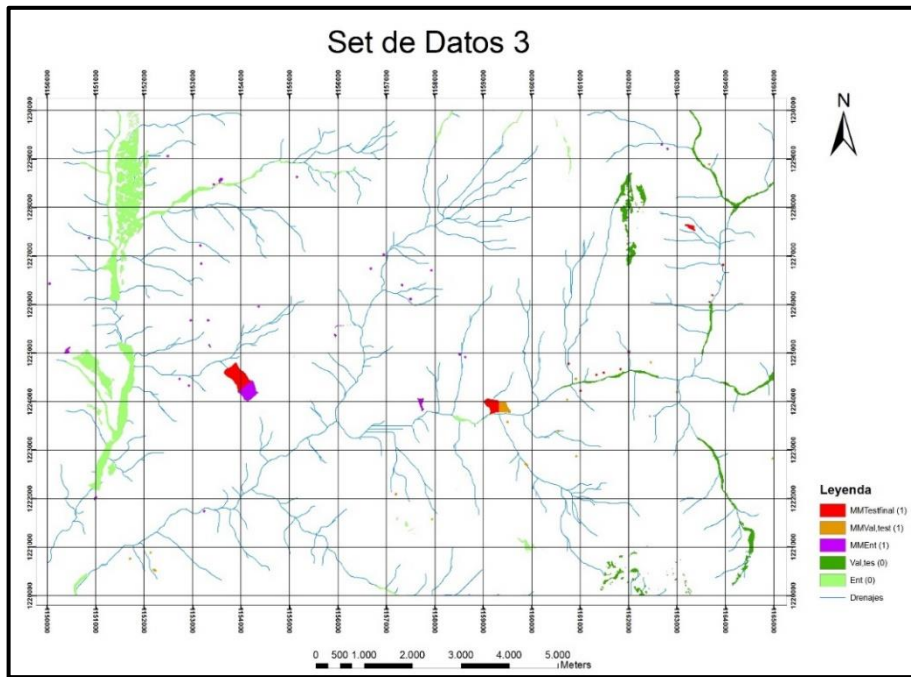
Anexo D. Zonas consideradas como susceptibilidad baja para el primer set de datos de la plancha 136-II-C.



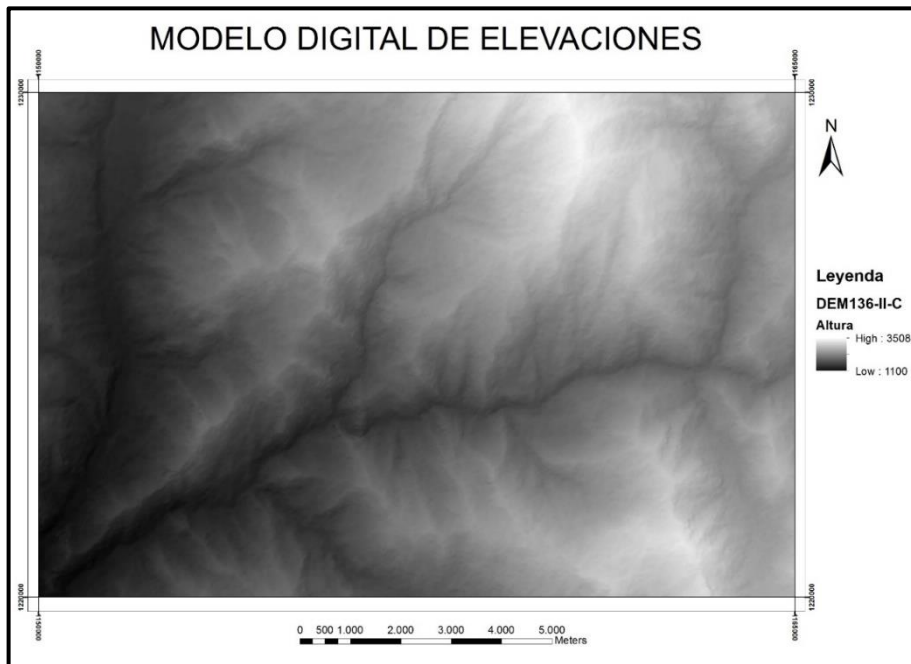
Anexo E. Zonas consideradas como susceptibilidad baja para el segundo set de datos de la plancha 136-II-C.



Anexo F. Secciones de entrenamiento, validación y test para las zonas consideradas como susceptibilidad baja y los MM de la plancha 136-II-C utilizadas en el tercer set de datos.



Anexo G. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para la plancha 136-II-C.



Fuente: Liberado por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA)

Anexo H. Tabla de Movimientos en masa registrados en la plataforma SIMMA para la plancha 136-II-C.

CÓDIGO	TIPO DE MOVIMIENTO	X	Y
1391	Flujo de lodo	1.152.486 E	1.229.055 N
1407	Deslizamiento traslacional	1.152.958 E	1.225.671 N
20747	Deslizamiento	1.155.156 E	1.228.630 N
29616	Deslizamiento traslacional	1.162.681 E	1.229.297 N
29619	Deslizamiento rotacional	1.153.163 E	1.227.211 N
29620	Deslizamiento rotacional	1.163.666 E	1.228.885 N
29641	Deslizamiento rotacional	1.162.805 E	1.229.206 N
29643	Caida de roca	1.164.975 E	1.222.820 N
29645	Deslizamiento traslacional	1.163.004 E	1.224.197 N
29652	Deslizamiento traslacional	1.159.502 E	1.223.972 N
29654	Deslizamiento rotacional	1.160.914 E	1.224.468 N
29655	Deslizamiento traslacional	1.161.007 E	1.224.222 N
29656	Deslizamiento rotacional	1.159.905 E	1.222.682 N
29657	Deslizamiento rotacional	1.160.918 E	1.222.870 N
29660	Deslizamiento traslacional	1.159.503 E	1.223.572 N
29661	Deslizamiento en cuña	1.157.203 E	1.222.091 N
29662	Deslizamiento rotacional	1.160.759 E	1.224.775 N
29663	Deslizamiento traslacional	1.157.535 E	1.224.028 N
29666	Deslizamiento traslacional	1.157.927 E	1.226.702 N
29900	Reotación de suelos	1.153.436 E	1.228.472 N
29902	Deslizamiento rotacional	1.153.321 E	1.225.675 N
29906	Reptación de suelos	1.154.365 E	1.225.955 N
29908	Deslizamiento rotacional	1.157.498 E	1.226.117 N
29912	Deslizamiento rotacional	1.160.731 E	1.224.037 N
29913	Deslizamiento rotacional	1.160.548 E	1.223.391 N
29916	Deslizamiento rotacional	1.159.874 E	1.222.713 N
29917	Deslizamiento rotacional	1.163.949 E	1.226.812 N
29921	Deslizamiento rotacional	1.157.942 E	1.221.571 N
29924	Deslizamiento rotacional	1.151.706 E	1.220.754 N

Fuente. Tomado y modificado de la plataforma SIMMA (2015).