

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN  
MASA EMPLEANDO EL MÉTODO MATEMÁTICO DE LÓGICA DIFUSA EN UN  
ÁREA DE 150 KM<sup>2</sup> PERTENECIENTES A LA PLANCHA 136-I-B ESCALA  
1:25.000.**

**ADRIÁN FELIPE RUEDA CASTELLANOS  
CARLOS ALBERTO TAVERA SANABRIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2016**

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN  
MASA EMPLEANDO EL MÉTODO MATEMÁTICO DE LÓGICA DIFUSA EN UN  
ÁREA DE 150 KM<sup>2</sup> PERTENECIENTES A LA PLANCHA 136-I-B ESCALA  
1:25.000.**

**Autores:**

**ADRIÁN FELIPE RUEDA CASTELLANOS  
CARLOS ALBERTO TAVERA SANABRIA**

**MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
Trabajo para optar por el título de geólogo**

**Director:**

**JOAQUIN ANDRES VALENCIA ORTIZ  
Geólogo**

**Codirector:**

**JORGE LEONARDO CAMARGO DAZA**

**Presentado ante:**

**Geólogo**

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

**2016**

## **DEDICATORIA**

*DEDICACIÓN ESPECIAL A MIS PADRES ÁLVARO RUEDA URQUIJO Y MARITZA CASTELLANOS GUZMÁN, Y A MI HERMANO, ÁLVARO ANDRÉS RUEDA CASTELLANOS, POR SER MI FUENTE DE APOYO INCONDICIONAL Y MIS PILARES, NO SÓLO DURANTE LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO, SINO A LO LARGO DE TODO EL TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA UNIVERSIDAD Y DE MI VIDA. A MIS PRIMOS DIEGO, NATHALIE, LUISA, CAMILO, CAROLINA, MELISA, ÓSCAR, JUAN JOSÉ; A MIS TÍOS MIREYA, MÓNICA, JAVIER, CARMEN, MABEL Y JULIO; Y A MIS ABUELOS ALIRIO CASTELLANOS, BLANCA GUZMÁN Y RUTH URQUIJO POR EL CARIÑO, LAS RISAS, EL SOPORTE Y EL ACOMPAÑAMIENTO QUE ME HAN DADO SIEMPRE, QUE ME HA FORMADO COMO EL SER HUMANO QUE SOY AHORA.*

*A MIS AMIGOS JOHN, TONY, MAYCOL, JOSE EFRAÍN, DANI, KATHE, ÓMAR, SEBAS, LINA, MARQUITO, PAO, NATA, ROBINSON, LAU, KAREN, CAMI, ELI Y A TODOS MIS DEMÁS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE LA UNIVERSIDAD Y DEL COLEGIO. POR USTEDES TUVE DOS DE LAS ETAPAS MÁS BONITAS DE TODA MI VIDA: GRACIAS POR SU CARIÑO, SU CONFIANZA, SU APOYO INCONDICIONAL Y SU HONESTIDAD. A MI COMPAÑERO DE TESIS Y AMIGO CARLOS ALBERTO TAVERA SANABRIA, CON SU PACIENCIA, APOYO, DEDICACIÓN Y ESFUERZO ME PERMITIERON SEGUIR ADELANTE CON ESTE PROYECTO,*

*A TODOS MIS PROFESORES DE LA UNIVERSIDAD; EN ESPECIAL A NUESTRO DIRECTOR JOAQUÍN ANDRÉS VALENCIA Y A NUESTRO CODIRECTOR JORGE DAVID DAZA: GRACIAS POR DEPOSITAR TODA SU CONFIANZA EN NOSOTROS. POR INSTRUIRNOS, POR LAS FELICITACIONES Y LOS JALONES DE OREJAS. SIN USTEDES JAMÁS SE NOS HABRÍAN PODIDO ABRIR LAS PUERTAS COMO EN ESTE MOMENTO, ¡MUCHAS*

**GRACIAS!**

**ADRIÁN FELIPE RUEDA CASTELLANOS**

## **DEDICATORIA**

*UNA DEDICACION MUY ESPECIAL A MIS PADRES CARLOS ALBERTO TAVERA OSORIO Y JOCABETH SANABRIA RONDON POR SU AMOR INCONDICIONAL Y SUS CONSEJOS DE VIDA. POR TODAS SUS ENSEÑANZAS Y DEMOSTRACIONES DE AFECTO QUE A LO LARGO DEL TIEMPO ME HAN LLEVADO A TOMAR BUENAS DECISIONES. GRACIAS POR ENSEÑARME A SOÑAR Y A PERSEVERAR EN TODOS LOS ASPECTOS DE MI VIDA*

*A MIS HERMANA ANDREA LISETH TAVERA SANABRIA POR ESTAR JUNTO AMI CUIDANDOME Y BRINDANDOME TODO SU APOYO Y CARIÑO Y A MI HERMANO CHRISTIAN CAMILO TAVERA SANABRIA POR COMPARTIR MOMENTOS AGRADABLES, A MIS HERMANOS LOS AMO MUCHO.*

*A MI HERMOSA NOVIA TATIANA PAOLA BERNAL ROBLES POR ENSEÑARME A SER UNA PERSONA MAS TOLERANTE, AMOROSA A TRAVEZ DE SU CARIÑO Y SU AMOR*

*A MIS PROFESORES JOAQUIN ANDRES VALENCIA ORTIS, JORGE CAMARGO DAZA Y LUIS EDUARDO MORENO POR BRINDARME TODO EL CONOCIMIENTO Y GUIARME A LO LARGO DE MI CARRERA MOSTRANDOME LA HUMILDAD, SENCILLEZ Y NOBLEZA.*

**CARLOS A. TAVERA SANABRIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director Joaquín Andrés Valencia Ortiz, y a nuestro codirector Jorge Camargo Daza, por transmitirnos su conocimientos de una manera humilde y sencilla. Por siempre estar pendientes y orientarnos en los momentos de mayor dificultad. Por depositar su confianza y acompañarnos hasta el final, para culminar este proyecto de investigación con éxito. ¡Mil Gracias!.

A nuestras familias por brindarnos todo el apoyo de forma incondicional, y guiarnos a lo largo de todas nuestras decisiones. Sin ustedes, esto no hubiese sido posible. ¡Los amamos!

A los habitantes de los municipios de Málaga y Molagavita, por habernos aceptado y guiado de una forma tan humilde, a lo largo de todos los caminos y trochas por las que recorrimos en la fase de campo.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser nuestra alma máter y habernos forjado no sólo académicamente, sino también con un pensamiento crítico ante la vida. A la Escuela de Geología y a toda su planta de profesores, por brindarnos todas las herramientas necesarias para nuestra formación como profesionales.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	29
1. JUSTIFICACIÓN.....	31
2. OBJETIVOS.....	33
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	33
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
3. LOCALIZACIÓN.....	34
4. METODOLOGÍA .....	36
4.1. FASE I. TÉMINOS DE REFERENCIA Y ESTUDIOS PRELIMINARES .....	38
4.2. FASE II. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA Y MAPAS PRELIMINARES .....	38
4.3. FASE III. VALIDACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA Y DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE SUELO EN CAMPO .....	40
4.4. FASE IV. GENERACIÓN Y CALIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES INSUMOS PARA LA GENERACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD.....	41
4.5. FASE V. PROGRAMACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA CON UN SISTEMA DE INFERENCIA TIPO MAMDANI .....	43
4.6. FASE VI. VALIDACIÓN DEL MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD.....	44
5. MARCO TEÓRICO .....	45
5.1. ANTECEDENTES.....	45
5.2. TEORÍA DE CONJUNTOS: CONJUNTOS CONCRETOS Y CONJUNTOS DIFUSOS.....	47
5.2.1. Teoría Clásica de Conjuntos.....	47
5.2.2. Teoría de los Conjuntos Difusos.....	49
5.2.3. Operaciones De Conjuntos Concretos.....	52
5.2.4. Operaciones De Conjuntos Difusos .....	53

5.3. RELACIONES ENTRE LA LÓGICA Y LA TEORÍA DE CONJUNTOS.....	54
5.3.1. Lógica Clásica y conjuntos concretos .....	54
5.3.2. Lógica Difusa y conjuntos difusos.....	57
5.4. LA LÓGICA DIFUSA Y LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA.....	58
5.5. SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA .....	63
5.5.1. Módulo de Inferencia. ....	67
5.5.2. Módulo Concesor.....	68
5.6. MAPAS E INSUMOS BASE Y TEMÁTICOS.....	70
5.6.1. Modelo Digital de Elevación (DEM). ....	71
5.6.2. Imágenes Satelitales.....	71
5.6.3. Inventario SIMMA. ....	71
5.6.4. Mapa geológico.....	72
5.7. GEOMORFOLOGÍA.....	72
5.7.1. Morfometría.....	74
5.7.2. Curvatura. ....	75
5.7.3. Morfogénesis .....	75
5.7.4. Morfodinámica .....	76
5.7.5. Geología. ....	76
5.7.6. Densidad de fracturamiento .....	77
5.7.7. Unidad Geológica Superficial.....	77
5.8. MOVIMIENTOS EN MASA .....	78
5.8.1. Caída (Fall). ....	80
5.8.2. Volcamiento (Topple).....	81
5.8.3. Deslizamiento (Slide).....	82
5.8.4. Propagación lateral (Lateral spread).....	83
5.8.5. Reptación (Creep).....	85
6. MARCO GEOLÓGICO.....	87
6.1. ESTRATIGRAFÍA .....	87

6.2. GEOLOGÍA EN CAMPO .....	92
6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	94
7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	98
7.1. MORFOGÉNESIS.....	98
7.2. GEOFORMAS DE TIPO DENUDACIONAL.....	101
7.2.1. Cima (Dc).....	102
7.2.2. Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco) .....	103
7.2.3. Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc). .....	104
7.2.4. Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl). .....	105
7.2.5. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi).....	106
7.2.6. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr).....	107
7.2.7. Escarpe de erosión mayor (Demm). .....	109
7.2.8. Escarpe de erosión menor (Deeme). .....	110
7.2.9. Loma denudada (Dld). .....	111
7.2.10. Lomo denudado (Dlde).....	112
7.2.11. Ladera erosiva (Dle).....	113
7.2.12. Ladera ondulada (Dlo). .....	114
7.2.13. Terrazas sobreelevadas (Dts).....	115
7.3. GEOFORMAS DE TIPO FLUVIAL.....	116
7.3.1. Cauce aluvial (Fca). .....	117
7.3.2. Terraza de acumulación (Fta). .....	118
7.3.3. Escarpe de terraza de acumulación (ftae). .....	119
7.3.4. Terraza de acumulación antigua (ftan). .....	120
7.4. GEOFORMAS DE TIPO ESTRUCTURAL.....	120
7.4.1. Ladera estructural de cuesta (Scle). .....	121
7.4.2. Cornisa estructural (Scor). .....	122
7.4.3. Escarpe en contrapendiente (Secp).....	123
7.4.4. Ladera en contrapendiente (Slcp).....	124
7.4.6. Escarpe estructural (See). .....	125

7.4.7. Ladera estructural (Sle).....	126
7.4.8. Escarpe de línea de falla (Slfe).....	126
7.4.9. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc).....	127
7.4.10. Meseta estructural (Sm).....	128
7.4.11. Escarpe de meseta (Sme).....	129
7.4.12. Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle).....	130
7.5. GEOFORMAS DE TIPO ANTROPOGÉNICO.....	131
7.5.1. Superficies de explanación (Asp).....	132
7.5.2. Terrazas agrícolas (Ata).....	133
7.6. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES .....	133
7.6.1. Suelos antrópicos. ....	136
7.6.2. Suelos transportados.....	136
7.6.3. Suelo coluvial.....	137
7.6.4. Suelo residual.....	138
7.6.5. Suelo orgánico.....	138
7.6.6. Roca.....	139
7.7. MORFODINÁMICA .....	140
8. INSUMOS CALIFICADOS PARA LA SUSCEPTIBILIDAD .....	144
8.1. GEOLOGÍA .....	144
8.2. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES .....	146
8.3. PENDIENTES .....	149
8.4. RUGOSIDAD .....	151
8.5. ACUENCA .....	154
8.6. MORFOGÉNESIS.....	156
8.7. MORFODINÁMICA .....	158
8.8. DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO .....	160
8.9. CURVATURA.....	162
9. APLICACIÓN DE LA LOGICA DIFUSA PARA ESTIMACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA .....	164

9.1. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA USANDO EL SOFTWARE FUZZYCELL.....	164
9.1.1. Raster.....	166
9.1.2. Hedge.....	166
9.1.3. Lista de variables lingüísticas.....	168
9.1.4. Lista de Reglas.....	170
9.1.5. Propiedades del Modelo.....	172
9.2. MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	173
9.3. SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA.....	176
9.4. SUSCEPTIBILIDAD ALTA.....	177
9.5. SUSCEPTIBILIDAD MODERADA.....	178
9.6. SUSCEPTIBILIDAD BAJA.....	178
9.7. SUSCEPTIBILIDAD MUY BAJA.....	179
10. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA.....	181
10.1. CURVA ROC DE ÉXITO.....	182
10.2. DIFERENCIAS ENTRE LA SUSCEPTIBILIDAD CON UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA Y EL METODO HEURÍSTICO EN LA PLANCHA 136-I-B.....	188
11. CONCLUSIONES.....	192
12. RECOMENDACIONES.....	194
REFERENCIAS.....	196
BIBLIOGRAFÍA.....	203
ANEXOS.....	210

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. A) Mapa político de Colombia; B) Mapa político de Santander; C) Localización de la plancha 136-I; D) Localización de la plancha 136-I-B. ....	35
Figura 2. Metodología empleada para la generación de la susceptibilidad por movimientos en masa, mediante el modelo de la Lógica Difusa, de la plancha 136-I-B. Elaborada para el presente proyecto de investigación. ....	37
Figura 3. Mapa de estaciones de campo de control geológico, geomorfológico y de unidades geológicas superficiales .....	40
Figura 4. Elementos como “lunes”, están dentro del conjunto “Días de la semana”; lo cual indica una pertenencia total a este. Sin embargo, elementos como “dorsal” están por fuera del conjunto; es decir, no tienen ninguna relación al conjunto. ....	49
Figura 5. Diferencias entre un conjunto concreto (izquierda) y un conjunto difuso (derecha). En el primero, los elementos pertenecen o no al conjunto; mientras que, en el segundo, hay una pertenencia parcial. Esta propiedad hace que los límites del conjunto difuso no estén bien definidos. ....	50
Figura 6. Ejemplo de un conjunto difuso. Elementos como “sábado” y “dorsal” tienen una pertenencia total o nula al conjunto difuso “Días del fin de semana”; mientras que el elemento “Viernes” tiene un grado de membrecía parcial. ....	51
Figura 7. Ilustración de cuatro tipos de formas diferentes para las funciones de membrecía. De izquierda a derecha: a) Triangular; b) Trapezoidal; c) Gausiana y d) En forma de campana. ....	52
Figura 8. Ilustración de dos tipos de formas para la función de membrecía: a) Sigmoidal y b) “en forma de S”. ....	52
Figura 9. Correspondencia entre la Teoría clásica de conjuntos, el Álgebra Booleana y la Lógica Clásica o Tradicional. ....	55
Figura 10. Tabla de verdad para el operador Implicación en la Lógica Clásica. ....	56

Figura 11. Tablas de verdad de los operadores “Conjunción” e “Implicación” en la Lógica Clásica. Debido a que la Lógica Difusa trata de mantener las relaciones causa-efecto de sus enunciados, recurre a la tabla de verdad de la conjunción para formular “Implicaciones de ingeniería” .....	58
Figura 12. Recuento de los métodos para la determinación de susceptibilidad a movimientos en masa. ....	61
Figura 13. Los sistemas de inferencia están caracterizados por el uso de reglas de la forma IF-THEN, utilizadas para representar el conocimiento y la experiencia de los expertos. Está formado por cuatro bloques: Módulo Difusor, Módulo Base de Reglas, Módulo Motor de Inferencia y Módulo Concesor. ....	63
Figura 14. Ejemplo de una variable lingüística de entrada, en un SLD: el nombre es “ángulo de buzamiento”; el universo de discurso va de 0-90 grados; los términos lingüísticos son tres conjuntos difusos BAJO, MEDIO y ALTO; y el significador lingüístico, corresponde a la representación gráfica de todos estos parámetros.....	66
Figura 15. La variable lingüística “ <i>food</i> ” tiene un término lingüístico “ <i>delicious</i> ”. Para hallar el grado de membrecía de cualquier elemento, se proyecta una línea vertical, desde la horizontal, hasta cortar con el trazo del conjunto. ....	67
Figura 16. Los números 1,2 y 3 en negrilla representan una regla de implicación cada uno. El Módulo de Inferencia hace uso de los operadores lógicos, del método de Implicación y el método de Agregación, para sumar todos los conjuntos difusos generados a partir de cada regla. ....	69
Figura 17. Ilustración del Centro de Gravedad, mecanismo principal del Módulo Concesor para transformar el conjunto difuso de salida (del Módulo Motor de Inferencia), a un valor concreto.....	70
Figura 18. Sistema de clasificación de Unidad Geológica Superficial, propuesto por el Semillero de Geomorfología de la Universidad Industrial de Santander. ....	78
Figura 19. Clasificación de movimientos en masa según el Proyecto Multinacional Andino (PMA: GCA, 2007). A diferencia del sistema de clasificación de	

movimientos en masa de Varnes (1978) (en Cruden & Varnes, 1996), este considera a los movimientos de Reptación como independientes de los de Flujo.80

Figura 20. A) Dibujo esquemático de una caída de roca. B) Fotografía de un movimiento de caída en la comunidad Chullpa Khasa, Provincia de Ayopaya, Departamento de Cochabamba, Bolivia. ....81

Figura 21. Dibujo esquemático de un Volcamiento.....82

Figura 22. A) Dibujo esquemático de un deslizamiento traslacional; B) Fotografía de un deslizamiento rotacional en el Cerro Mizhquiyacu, Ecuador.....83

Figura 23. Ilustración de un movimiento de Propagación Lateral, en un entorno donde un suelo cohesivo (Arcilla firme) suprayace a material de menor consistencia .....84

Figura 24. A) Dibujo esquemático de un Flujo de Detritos.; B) Fotografía de un Flujo de Detritos, en la Cuenca del Río Checas, Perú.....85

Figura 25. A) Dibujo esquemático de un movimiento de Reptación; B) Fotografía de un movimiento de Reptación de una ladera, compuesta por esquistos cloríticos meteorizados del Grupo Cajamarca, carretera Ibagué, Armenia. ....86

Figura 26. Mapa geológico de la zona de estudio.....88

Figura 27. Mapa geológico de la plancha 136-I-B a escala 1:25000. ....93

Figura 28. Corte por la vertiente S del río Congreso. En este se muestran algunas características de la zona sinclinal en la que está localizada el Valle del río Guaca: b representa el basamento del Macizo de Santander; c representa la Formación Girón y 1, 2 y 3 representan paquetes rocosos de la secuencia cretácica que aflora.....95

Figura 29. Corte en la zona de Molagavita: b representa el basamento del Macizo de Santander; G representa la Formación Girón y los números 1-8, la secuencia del cretácico que aflora en las Minas de Carbón. ....95

Figura 30. Esquema de la zona occidental de la zona divisoria anticlinal: hacia el W se tiene el conjunto de pliegues apretados, relacionados con el área de Guaca-Molagavita (zona divisoria del Valle del río Cámara); mientras que, hacia el E, se tiene el Sinclinal de Pangote.....96

Figura 31. Representación esquemática de la geología estructural del área de García Rovira: dos zonas en posición sinclinal, separadas por un área de carácter anticlinal.....	97
Figura 32. Mapa geomorfológico de la plancha 136-I-B a escala 1:25000. ....	99
Figura 33. Diagrama circular donde se muestran el porcentaje de cada ambiente de formación según la cantidad de geoformas en el área de trabajo.....	99
Figura 34. Área de influencia de las geoformas de tipo denudacional en la plancha 136-I-B. ....	102
Figura 35. Diagrama esquemático de una cima denudacional ubicada hacia el noroccidente de municipio de Málaga.....	103
Figura 36. Se observa al municipio de Molagavita sobre un cono o lóbulo coluvial y de solifluxion, en conjunto con dos Dldebl y un Dldebc. ....	106
Figura 37. Movimiento indiferenciado de origen denudacional encontrado en el area de estudio .....	107
Figura 38. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr) junto con una ladera estructural de cuesta (Scle). ....	108
Figura 39. Escarpe de erosión mayor en el kilómetro 16 via Pangote - Málaga a el margen derecho de la carretera.....	110
Figura 40. Escarpe de erosión menor hacia nor-oeste del municipio de Molagavita.....	111
Figura 41. Esquema de una loma denudada en el área de estudio.....	112
Figura 42. Vista de una Slcp via San Andrés-Málaga, 100 metros despues del desvio que va hacia la Laguna de Ortices. ....	114
Figura 43. Diagrama esquemático de una ladera ondulada, con una vista en perfil y planta. ....	115
Figura 44. Área de influencia de la geoformas de tipo fluvial en la plancha 136-I-B. ....	116
Figura 45. Cauce fluvial activo a 800 m del cruce de la via San Andrés-la Laguna de Ortices, margen izquierdo de la carretera .....	117

Figura 46. Diagrama de un ambiente fluvial donde se observa una terraza de acumulación, seguido de un escarpe de terraza y una terraza antigua al sur occidente del municipio de Pangote. ....	119
Figura 47. Área de influencia de las geoformas de tipo estructural en la plancha 136-I-B .....	121
Figura 48. Municipio de Málaga, ubicado sobre una cornisa estructural. ....	123
Figura 49. Escarpe estructural en contrapendiente, ubicado al nor-oriente de la Laguna de Ortices, en conjunto con una ladera en contrapendiente y un lomo de falla.....	125
Figura 50. Escarpe de línea de falla hacia el oeste del municipio de Málaga. ....	128
Figura 51. Diagrama de una meseta estructural en conjunto con un escarpe de meseta. ....	130
Figura 52. Se observa una ladera estructural de sierra homoclinal hacia el oriente del casco urbano del municipio de Molagavita.....	131
Figura 53. Área de influencia de las geoformas de tipo antropogénico en la región de la plancha 136-I-B. ....	132
Figura 54. Terraza agrícola ubicado a 3 km del cruce a la avenida de Molagavita al margen izquierdo de la carretera. ....	133
Figura 55. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de la plancha 136-I-B escala 1:25000.....	134
Figura 56. Diagrama de torta con los porcentajes de los diferentes tipos de UGS .....	135
Figura 57. Municipio de Málaga, como parte del suelo de tipo antropogénico. ...	136
Figura 58. Suelo de tipo transportado que se encuentra al sur del municipio de Pangote. ....	137
Figura 59. Suelo de tipo coluvial sobre la vía Málaga- Molagavita, a dos kilómetros del casco urbano del municipio de Molagavita .....	138
Figura 60. Suelo de tipo orgánico en zona de alta montaña, junto con suelo residual en la cercanía de la Vereda Pescadero.....	139

Figura 61. Macizo rocoso ubicado en la vía Pangote-Málaga, hacia el margen izquierdo de la carretera. ....	140
Figura 62. Representación geográfica de los movimientos encontrados en campo y registrados en la plataforma nacional SIMMA. ....	143
Figura 63. Mapa geológico calificado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa (SLD).....	145
Figura 64. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Geología”, en relación a las clases de susceptibilidad. ....	146
Figura 65. Mapa calificado, en términos de susceptibilidad, de las Unidades geológicas superficiales, como parámetro de entrada para el SLD. ....	147
Figura 66. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de las UGS, en relación a los términos de susceptibilidad. ....	148
Figura 67. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de pendientes, como parámetro de entrada para el SLD.....	150
Figura 68. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de las pendientes, en relación a los términos de susceptibilidad. ....	151
Figura 69. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de rugosidad, como parámetro de entrada para el SLD.....	152
Figura 70. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la rugosidad, con relación a los términos de susceptibilidad ....	153
Figura 71. Mapa calificado en términos de susceptibilidad del factor “Acuencia”, como parámetro de entrada para el SLD.....	154
Figura 72. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Acuencia”, con relación a los términos de susceptibilidad.....	155
Figura 73. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de “Morfogénesis”, como parámetro de entrada para el SLD.....	156
Figura 74. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la Morfogénesis, con relación a los términos de susceptibilidad. ....	157
Figura 75. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de Morfodinámica como parámetro de entrada para el SLD.....	158

Figura 76. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Morfodinámica”, con relación a los términos de susceptibilidad .....	159
Figura 77. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de densidad de fracturamiento, como parámetro de entrada para el SLD. ....	160
Figura 78. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la densidad de fracturamiento, con relación a los términos de susceptibilidad.....	161
Figura 79. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de curvatura, como parámetro de entrada para el SLD.....	162
Figura 80. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la curvatura, con relación a los términos de susceptibilidad. ....	163
Figura 81. Interfaz gráfica del software, FuzzyCell, desarrollado por Yanar & Akyürek (2006). Tomada de Aydin & Eker (2016).....	164
Figura 82. Flujograma del Sistema de Lógica Difusa (o Sistema de Inferencia) tipo Mamdani, para el trabajo de investigación actual. Desarrollado para el presente trabajo de investigación. ....	165
Figura 83. Ilustración de la opción “Raster List” (resaltado de color rosa) de FuzzyCell (Yanar & Akyürek, 2006). Permite cargar los mapas de las variables de entrada ( <i>i.e.</i> capas temáticas) en formato Raster, al software. Se muestra un ejemplo con todas las variables cargadas. ....	166
Figura 84. Ilustración de la opción “Hedge List”. En la imagen se muestran las opciones predeterminadas: 1, corresponde a ningún modificador; mientras que 2, corresponde al conjunto complemento del conjunto difuso que acompañe. ....	167
Figura 85. Ilustración de la opción “Linguistic Variable List”. Tiene la función de definir parámetros como el nombre, los elementos de entrada, los términos lingüísticos y la forma de la función de cada una de las variables de entrada y de salida. Se muestra un ejemplo con la variable lingüística “Geología”, ingresada al sistema como “GEO”. ....	169

Figura 86. Ilustración de la opción “Linguistic Variable List”. Se aprecia etapa final en la que se insertan las variables de entrada, ya definidas con todos sus elementos. ....	170
Figura 87. Con la opción “insert” (a la derecha del ícono de la lupa), aparece una ventana que permite cargar las variables de entrada, junto con los términos lingüísticos que se escojan para cada una, y los conectores difusos que se requieran.....	171
Figura 88. Ejemplo de una sección del conjunto de 112 reglas, usadas para el modelamiento del raster de susceptibilidad a movimientos en masa. ....	171
Figura 89. Ilustración de la opción “Model Properties”. Tiene la función de asignar la clase de operadores lógicos dentro del proceso del Módulo de Inferencia (Implicación, agregación, operadores AND y/o OR), y el método de conversión del Módulo Concesor, en el Sistema de Lógica Difusa. ....	172
Figura 90. Mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando un Sistema de Inferencia basado en la teoría de la Lógica Difusa, de la plancha 136-I-B. ....	173
Figura 91. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia por movimientos en masa. ....	174
Figura 92. Diagrama de torta donde se muestran los porcentajes que contienen movimientos en masa, asociados a cada una de las clases.....	175
Figura 93. Ilustración de una curva ROC para la validación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. En el eje Y, la “Sensibilidad”, y en el eje X, el valor de “1 – Especificidad”. Tomada de Vakhshoori & Zare (2016). ....	182
Figura 94. Interfaz gráfica del programa escrito por el el MSc. Vali Vakhshoori, de la Universidad de Shiraz, Irán. Los únicos datos necesarios son los pixeles asociados a movimientos en masa, y el total de pixeles del área cubierta, para cada una de las clases de susceptibilidad. ....	186
Figura 95. Gráfica de la curva ROC de Éxito (Success Rate Curve) para el mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa. El área bajo la curva (AUC), con un valor de 0.743, le concede al documento una capacidad aceptable para	

catalogar las zonas del área de estudio, de acuerdo a su grado potencial o real de ocurrencia de movimientos en masa. ....	187
Figura 96. Mapa de susceptibilidad generado, a partir del método heurístico, de la plancha 136-I-B. Este fue tomado y modificado del documento, a escala 1:100.000, de susceptibilidad a movimientos en masa de la plancha 136, Málaga .....	189
Figura 97. Principales diferencias entre el modelo heurístico y el modelo de lógica difusa .....	191

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas planas de la Plancha 136-I-B en jurisdicción de los municipios de Málaga y Molagavita. ....	34
Tabla 2. Calificación de las Unidades Geológicas Superficiales.....	42
Tabla 3. Algunos términos usados en el procesamiento de señales. La información asociada a estos es concreta, pero si a dicha información se le asocia una calificación lingüística, ésta puede resultar más familiar en un contexto de trabajo. ....	47
Tabla 4. Secuencia sedimentaria de las unidades estratigráficas, en el área de estudio. ....	89
Tabla 5. Geoformas presentes en el área de estudio (el área se encuentra representada en m <sup>2</sup> ). ....	100
Tabla 6. Área de las unidades geológicas superficiales dictadas en M <sup>2</sup> .....	135
Tabla 7. Puntos de ubicación de los movimientos en masa de tipo catálogo de la plancha 136-I-B.....	141
Tabla 8. Puntos de ubicación de los movimientos en masa de tipo inventario de la plancha 136-I-B.....	142
Tabla 9. Influencia del área asociada a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Geología”. ....	146
Tabla 10. Asignación de los valores de susceptibilidad a las UGS.....	147
Tabla 11. Área asociada a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “UGS”.....	148
Tabla 12. Rangos en grados, asociados a los valores de susceptibilidad. ....	149
Tabla 13. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Pendientes”.....	151
Tabla 14.Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Rugosidad”.....	153

Tabla 15. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Acuencia” .....	155
Tabla 16. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Morfogénesis” .....	157
Tabla 17. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Morfodinámica” .....	159
Tabla 18. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Densidad de fractura miento” .....	161
Tabla 19. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Curvatura” .....	163
Tabla 20. Términos de las clases de susceptibilidad a movimientos en masa, con su respectiva calificación y área de influencia en metros cuadrados.....	174
Tabla 21. Área de influencia asociada a los movimientos en masa, a cada una de las clases. ....	175
Tabla 22. Cantidad de pixeles considerados como “inestables”, y del área total de cada clase de susceptibilidad, en orden creciente: desde Muy Bajo (1) hasta Muy Alto (5). ....	185

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Tabla de recolección de datos para la cartografía geomorfológica .....	210
Anexo B. Formato usado para la captura de los movimientos en masa de inventario .....	211
Anexo C. Formato usado para la captura de los movimientos en masa tipo catalogo .....	212
Anexo D. Tabla de calificación en términos de susceptibilidad de las unidades morfogeneticas .....	213
Anexo E. Tabla de clasificación en términos de susceptibilidad de los depósitos cuaternarios .....	222
Anexo F. Tabla de clasificación de la resistencia de la roca según hoke. ....	223
Anexo G. Tabla de clasificacion de la textura propuesta por INGEOMINAS 2004 .....	224
Anexo H. Reglas propuestas en el presente trabajo que modelaron el sistema de lógica difusa .....	225

## RESUMEN

**TÍTULO:** ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA EMPLEANDO EL MÉTODO MATEMÁTICO DE LÓGICA DIFUSA EN UN ÁREA DE 150 KM<sup>2</sup> PERTENECIENTES A LA PLANCHA 136-I-B ESCALA 1:25.000.

**AUTORES:** Adrián Felipe Rueda Castellanos, Carlos Alberto Tavera Sanabria.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Susceptibilidad a movimientos en masa, Lógica Difusa, factores causales.

En este estudio, el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de la plancha 136-I-B fue elaborado usando un método de simulación, apoyado en la construcción de reglas a partir de la heurística, conocido como Sistema de Lógica Difusa. Para este propósito, se hizo uso del software libre FuzzyCell, desarrollado por Yanar & Akyürek (2006), que funciona como una extensión de ArcGIS con el fin de incorporar la teoría de la Lógica Difusa en sus tareas.

Se realizó un mapa de inventario de movimientos en masa, con un total de 34 eventos. Nueve parámetros condicionantes de susceptibilidad a movimientos en masa fueron tenidos en cuenta para este proyecto, acorde a la Geología, Geomorfología y características del suelo, en el área de estudio. Luego de la fase de generación y calificación de los mapas de factores causales, se realizó el procesamiento de estos utilizando un método de *soft computing* (Akgun *et al*; 2012), conocido como Sistema de Inferencia Tipo Mamdani, en el cual fueron ingresadas las variables de entrada y la de salida, junto con su respectiva información numérica y las calificaciones de acuerdo al aporte relativo a la susceptibilidad a movimientos en masa.

De esta manera, fue producido el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en formato raster, diferenciando la zona en sectores homogéneos de acuerdo al grado potencial o real de ocurrencia de movimientos en masa. El documento final fue evaluado usando la curva ROC de éxito, a partir de la comparación entre este mismo y el mapa de inventario de movimientos en masa. La medida estadística del área bajo la curva (AUC), dio un resultado de 0.743, lo cual es indicio de que el modelo de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, propuesto en este proyecto, fue exitoso.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director. Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Codirector. Jorge Leonardo Camargo Daza

## ABSTRACT

**TITLE:** LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY RELATIVE ZONATION UTILIZING THE MATHEMATICAL FUZZY LOGIC BASED MODEL IN A 150 KM<sup>2</sup> AREA, BELONGING TO THE 1:25.000 SCALED 136-I-B CHART\*.

**AUTHORS:** Adrián Felipe Rueda Castellanos, Carlos Alberto Tavera Sanabria \*\*.

**KEYWORDS:** Landslide susceptibility, Fuzzy Logic, Causative factors.

In this study, a landslide susceptibility map was developed for the 136-I-B chart, using a simulation method, based on a heuristic rule-based approach, known as a Fuzzy Logic System. For this purpose, we used FuzzyCell, a Freeware developed by Yanar & Akyürek (2006), which functions as an ArcGIS extension, allowing it to incorporate the Fuzzy Logic theory in its procedures.

A landslide inventory map using 34 events was developed. In this case study, nine landslide susceptibility conditioning parameters were considered, based on the Geology, Geomorphology and soil characteristics of the area. After the generation and qualification phase of the causative factor maps, we developed their processing utilizing a *soft computing* approach (Akgun *et al*; 2012), known as Mamdani Inference System, in which all the input and output variables were entered, along with their respective numeric information and linguistic qualifications associated with their relative contribution to landslide susceptibility.

In this manner, the landslide susceptibility map was produced in a raster format, differentiating the zone in homogeneous sectors, according to the real or potential grade of landslide occurrence. This document was validated using the Success Rate Curve, starting from the comparison between the latter and the landslide inventory map. The area under the curve (AUC) statistical method was found to be 0.743, which is an indication of the success of the landslide susceptibility zonation model, formulated in this project.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director. Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Co-director. Jorge Leonardo Camargo Daza

## INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa son fenómenos naturales que tienen grandes repercusiones sobre la vida, la propiedad humana e incluso sobre el medio ambiente. Son los desastres naturales más comunes en áreas montañosas (Kanungo *et al*; 2009), por lo que en países como Colombia, con condiciones favorables para la ocurrencia de estos, se han convertido tanto en parte de la vida cotidiana como en objeto de estudio importante para la ciencia, debido a factores como la presión por la urbanización y la preocupación por los impactos socio-económicos que acarrearán (Aleotti & Chowdhury, 1999; Champati Ray & Lakhera, 2004; como se citan ambos en Kanungo *et al*; 2009). Por tal motivo, la separación de un territorio en sectores, de acuerdo al grado potencial o real de su ocurrencia; es decir, la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, se ha vuelto una tarea muy importante para las poblaciones afectadas, ya que es un componente a tener en cuenta para la producción de sus planes de ordenamiento territorial, de desarrollo y de prevención de desastres.

El Servicio Geológico Colombiano elaboró una guía metodológica en el año 2013 (SGC, 2013) para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, a escala 1:100.000, utilizando un procedimiento basado en el conocimiento experto, conocido como método heurístico. Sin embargo, en estos momentos no hay una sistemática planteada para el desarrollo de mapas a escala 1:25.000, cuyo grado de detalle y precisión es mucho mayor. Por lo tanto, en este proyecto se propone implementar un método matemático basado en la teoría de la Lógica Difusa, como herramienta para la producción de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, a escala 1:25.000. La Lógica Difusa, entre sus ventajas, permite trabajar múltiples variables de entrada (tales como la Geología, Geomorfología y Unidades Geológicas Superficiales), no requiere de rigurosidad

matemática y es fácilmente aplicable sobre áreas grandes. Algunos autores (Akgun *et al*; 2012; Aydin & Eker, 2016; Osna *et al*; 2014) han aplicado este método de simulación con éxito, arrojando resultados bastante confiables. Sin embargo, al ser un método de simulación, debe ser validado mediante datos obtenidos con el producto final y el criterio experto de todas las variables presentes. El resultado final será un apoyo para la producción de una futura guía metodológica, a escala 1:25.000, de zonificación de susceptibilidad relativa por movimientos en masa.

## 1. JUSTIFICACIÓN

Los movimientos en masa son los desastres naturales más comunes en áreas montañosas, produciendo daños no sólo a la propiedad, sino también a la vida y a los recursos naturales (Kanungo *et al*; 2009). Por tal motivo, la elaboración de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa (*i.e.* la división-y clasificación- de un área, en zonas homogéneas, de acuerdo al grado potencial o real de ocurrencia de estos eventos) se ha hecho necesaria para la salvaguarda de los bienes y de la integridad de las personas. El Servicio Geológico Colombiano propuso en el año 2013 una metodología para su elaboración, en el proyecto “*Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2013) el cuál, a la respectiva escala y para la elaboración del mapa final, utiliza el método heurístico; es decir, una metodología basada en el conocimiento experto. Este trabajo es considerado como el documento base para la zonificación de susceptibilidad a escala 1:100.000, en otras partes del país.

Como una iniciativa del Semillero de Geomorfología de La Universidad Industrial de Santander, se propone una metodología alternativa a la propuesta por el Servicio Geológico Colombiano, que implementa un método basado en Lógica Difusa para la elaboración de un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, sobre un área de trabajo a escala 1:25.000. La elaboración de este proyecto se llevó a cabo en el área comprendida por la plancha 136-I-B. El uso de los métodos difusos ha sido ampliamente tratado en problemas de Ingeniería Geológica, en estudios como los de Gokceoglu (2002) y Nefeslioglu *et al.* (2003, 2006) (Como lo citan ambos en Akgun *et al*; 2012); sin embargo, no ha sido el caso para las investigaciones sobre temas de amenaza y susceptibilidad, debido anteriormente a problemas como la carencia de un software apropiado para su aplicación sobre

áreas grandes (Akgun *et al*; 2012) y la falta de consenso entre investigadores para el seguimiento de una metodología específica. A pesar de esto, autores como Ercanoglu & Gokceoglu (2004) afirman que dichos métodos tienen varias ventajas, entre las que resaltan la capacidad de procesar múltiples conjuntos de datos, el no requerir mucha rigurosidad en la obtención de la información requerida, la posibilidad de aplicación sobre áreas grandes (Akgun *et al*; 2012), su reproducibilidad y, una de las más importantes: expresar las no linealidades e imprecisiones asociadas a la complejidad de la susceptibilidad (Kanungo *et al*; 2009), gracias a su habilidad de simular el razonamiento humano, utilizando información tanto subjetiva como objetiva, en el proceso. Esto los diferencia de otras herramientas cuantitativas (e.g. los métodos bivariados), que son más objetivas, pero a su vez, altamente dependientes del número, calidad y confiabilidad de los datos (Ercanoglu & Gokceoglu, 2004; Zhu *et al*; 2014) y que tratan el problema como si fuera un sistema lineal (*i.e.* como un conjunto de relaciones monótonas y generalizadas) (Zhu *et al*; 2014). También, difieren de técnicas cualitativas (e.g. los métodos heurísticos) que, al depender de información puramente subjetiva, hacen difícil su comparación con otros trabajos, no son fácilmente actualizables y tienen una reproducibilidad limitada (Kanungo *et al*; 2009).

En el caso de Colombia, las zonificaciones de susceptibilidad realizadas hasta el momento se han hecho usando una sistemática para mapas a escala 1:100.000: la escogencia de la escala 1:25.000 permitirá un mayor nivel de detalle, junto con el uso de parámetros diferentes a los que podrían tenerse en cuenta para un mapa de escala más pequeña. La información generada tendrá una utilidad práctica para los municipios aledaños al sector, en la elaboración de sus planes de ordenamiento territorial y de desarrollo, así como también, para sus planes de prevención y atención de desastres; y una utilidad metodológica, porque servirá como base para la futura elaboración de una guía para la zonificación de susceptibilidad, a escala 1:25.000.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- Generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa mediante la aplicación del modelo matemático de lógica difusa a partir de los insumos de Geología, Geomorfología y Suelos que serán analizados, descritos y refinados para la plancha 136-I-B con un área de 150 km<sup>2</sup>.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Generar un mapa geológico a una escala 1:25.000 a partir del mapa geológico escala 1:100.000 de la plancha 136 por medio de la interpretación geomorfológica y control de campo.
- Generar un mapa de unidades morfogénicas escala 1:25.000 a partir de un DEM.
- Generar el mapa Morfodinámico a partir de los eventos de Movimientos en masa inventariados en campo.
- Generar un mapa de unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000.
- Generar un mapa morfométrico, en sus tres componentes (Pendiente, Acuencia y Rugosidad), a escala 1:25.000.
- Validar el mapa de susceptibilidad a partir de los movimientos registrados en la plataforma SIMMA

### 3. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio está localizada sobre la Cordillera Oriental de Colombia, y comprende la Plancha 136-I-B en jurisdicción de los municipios de Málaga y Molagavita (Figura 1) hacia el Sureste del departamento de Santander. Cubre un área de 150 km<sup>2</sup>. Geológicamente se sitúa en el extremo meridional (borde Oriental) del Macizo de Santander. El municipio de Málaga es el centro urbanístico de la plancha, el cual tiene límites prediales con cuatro municipios de la Provincia de García Rovira: por el Oriente limita con el Municipio de Enciso; al Occidente con los Municipios de Molagavita y San Andrés; por el Norte con el Municipio de Concepción y al Sur con el Municipio de San José de Miranda. Las vías principales del municipio de Málaga son las que comunican a los municipios de San Andrés y San José de Miranda las cuales atraviesan el área de estudio en sentido Norte-Sur y Este-Oeste.

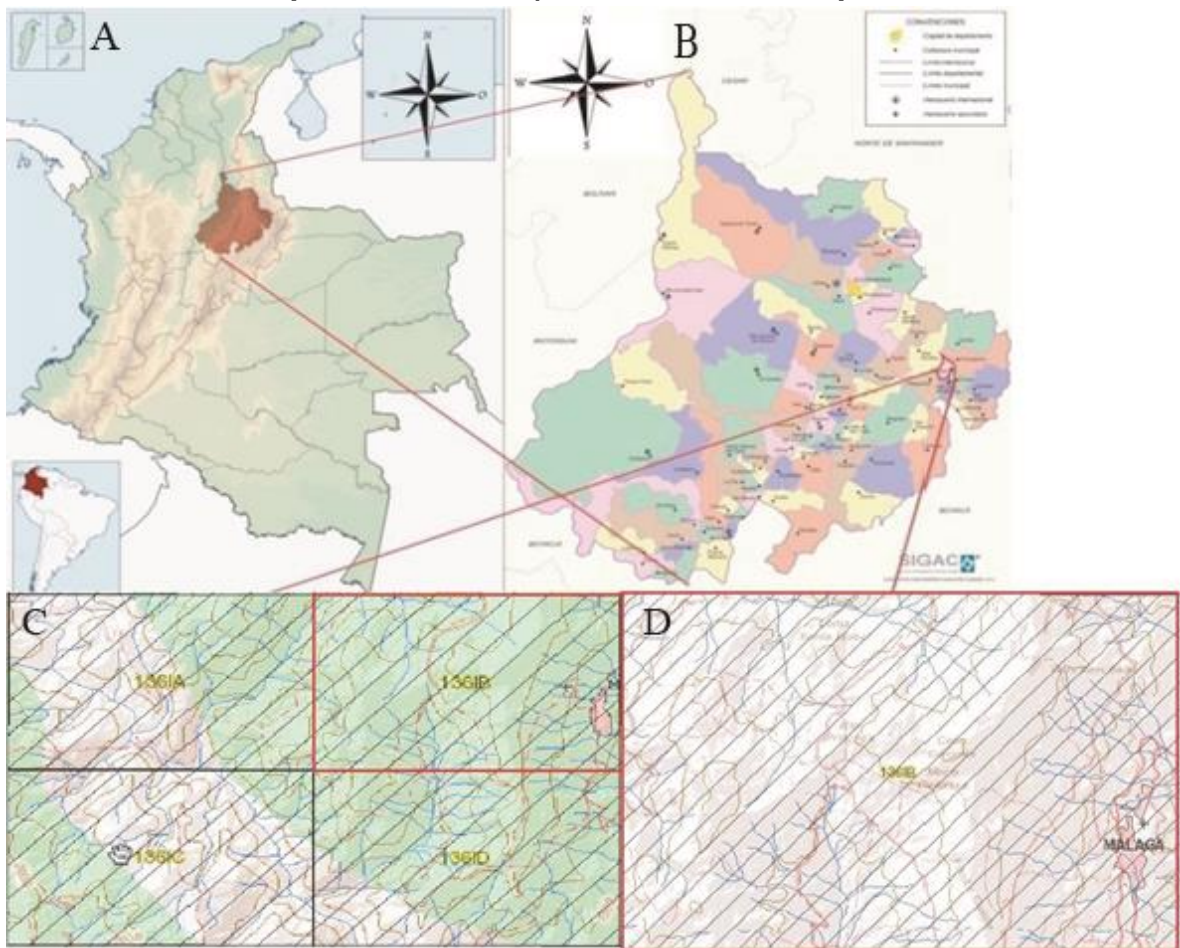
La plancha 136-I-B se encuentra referenciada con el Datum Colombia Bogotá. En la Tabla 1 se muestran los vértices de las coordenadas planas del área de estudio las cuales tienen origen Este.

**Tabla 1. Coordenadas planas de la Plancha 136-I-B en jurisdicción de los municipios de Málaga y Molagavita.**

COORDENADAS PLANAS	
X	Y
1'135.000	1'240.000
1'150.000	1'240.000
1'150.000	1'230.000
1'135.000	1'230.000

A continuación, se muestra en la Figura 1, el área de estudio correspondiente a la plancha 136-I-B:

**Figura 1. A) Mapa político de Colombia; B) Mapa político de Santander; C) Localización de la plancha 136-I; D) Localización de la plancha 136-I-B.**



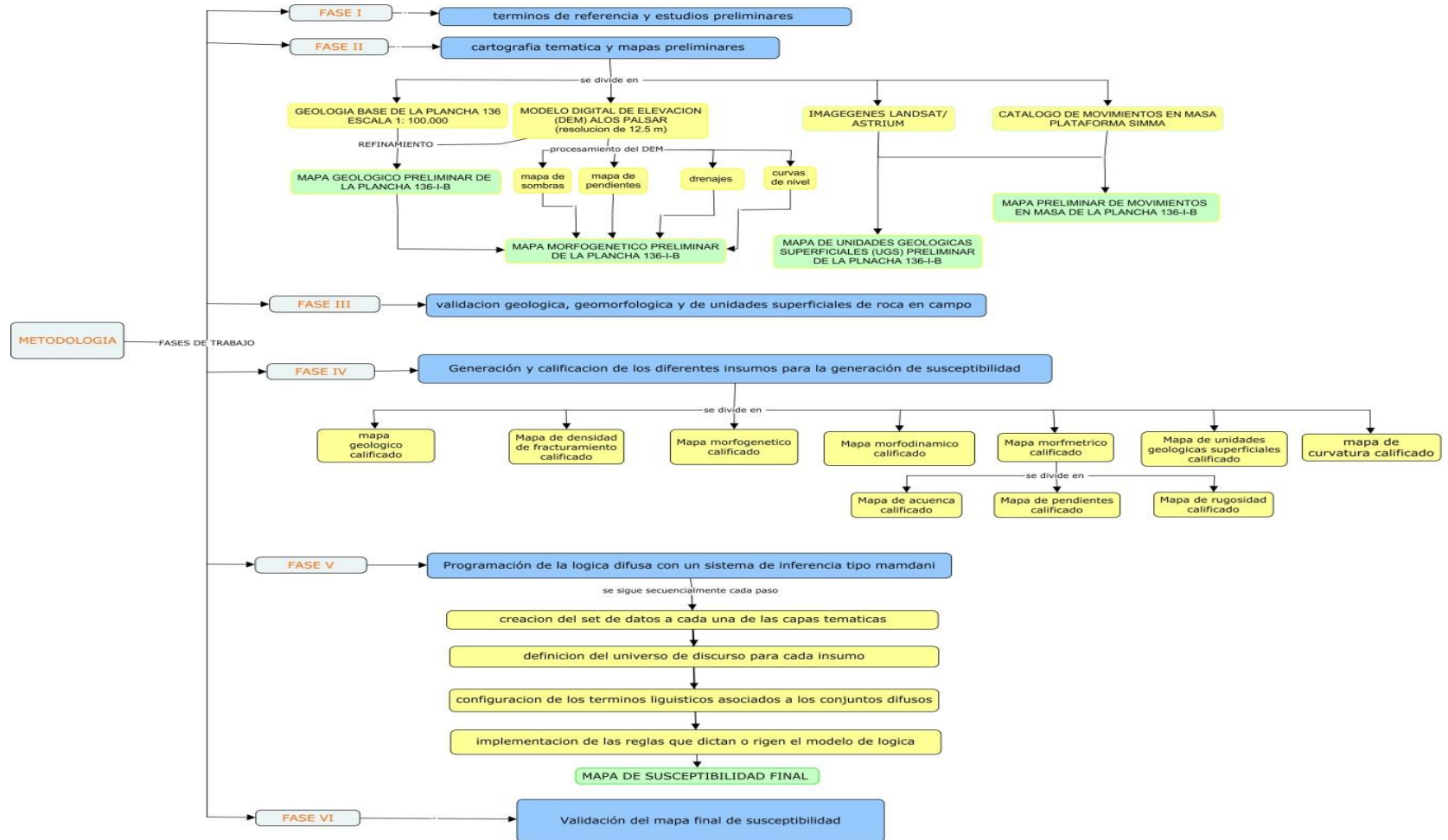
Fuente: B) Tomada tomado y modificado del IGAC; C) Tomada parcialmente de la plataforma del IGAC; D) Tomado y modificado de la plataforma del IGAC.

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en la realización de este proyecto constó de seis fases principales, en las que se llevaron a cabo actividades diferentes con el fin de analizar la susceptibilidad relativa por movimientos en masa, empleando una herramienta matemática basada en la teoría de la Lógica Difusa, a escala 1:25.000.

La fase I correspondió a una recopilación bibliográfica de los términos de referencia y los estudios preliminares, donde se recolectó información, artículos y los insumos temáticos necesarios. La fase II, consistió de la cartografía temática y la elaboración de mapas preliminares, usando insumos temáticos como un Modelo de Elevación Digital (DEM) y una plancha geológica correspondiente a la zona. La fase III correspondió a la validación geológica, geomorfológica y de unidades geológicas superficiales, en campo. La fase IV consistió de la generación y caracterización de los insumos, en donde se calificó, mediante el documento metodológico del Servicio Geológico Colombiano para la generación de la susceptibilidad (SGC, 2013), cada una de las capas temáticas. Durante La fase V se realizó la programación de la Lógica Difusa con un Sistema de Inferencia tipo Mamdani, en donde se ajustó este modelo matemático a la susceptibilidad final. Finalmente, la fase VI fue la validación del mapa final de susceptibilidad. En la Figura 2, se muestra un cuadro conceptual donde se encuentran cada uno de los ítems a realizar, en cada una de las fases del proyecto

**Figura 2. Metodología empleada para la generación de la susceptibilidad por movimientos en masa, mediante el modelo de la Lógica Difusa, de la plancha 136-I-B. Elaborada para el presente proyecto de investigación.**



#### **4.1. FASE I. TÉMINOS DE REFERENCIA Y ESTUDIOS PRELIMINARES**

En esta fase se elaboró una revisión bibliográfica acerca de estudios previos de susceptibilidad a movimientos en masa, tanto a nivel nacional como internacional, que sirvieron como base para la elaboración del proyecto, teniendo en cuenta factores geológicos, geomorfológicos y de suelos, junto con otros trabajos en los que se describen métodos basados en la teoría de la Lógica Difusa y su aplicación a la susceptibilidad por movimientos en masa a una escala 1:25.000.

Así mismo, se definieron los insumos o capas temáticas a tener en cuenta dentro de la evaluación a la susceptibilidad a movimientos en masa. Estos son: “Geología”, “Morfogénesis”, “Morfodinámica”, “Pendiente”, “Acuenca”, “Rugosidad”, “Curvatura”, “Densidad de fracturamiento” y “Unidades Geológicas Superficiales”. También se optó por trabajar el Sistema de Inferencia tipo Mamdani, con una base de reglas e insumos calificados.

#### **4.2. FASE II. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA Y MAPAS PRELIMINARES**

En esta fase se elaboraron los diferentes mapas preliminares de Geología, Morfogénesis, Unidades Geológicas de suelo (UGS) y de movimientos en masa; posteriormente validados con un trabajo de campo. Para ello se partió de unos insumos temáticos bases que proporcionaron información indispensable para la construcción de algunas de las capas temáticas. Entre estos insumos temáticos están el Modelo Digital de Elevación (DEM), la plancha geológica 136 (Málaga) (Vargas *et al*; 1984) e imágenes satelitales.

El Modelo Digital de Elevación (DEM), de uso libre que liberó el gobierno japonés (Alos Palsar) con una resolución de 12.5 m, fue procesado mediante el Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10), obteniendo los mapas de pendientes,

sombras, drenajes y curvas de nivel como base para realizar una interpretación de unidades morfogénicas a escala 1:25.000.

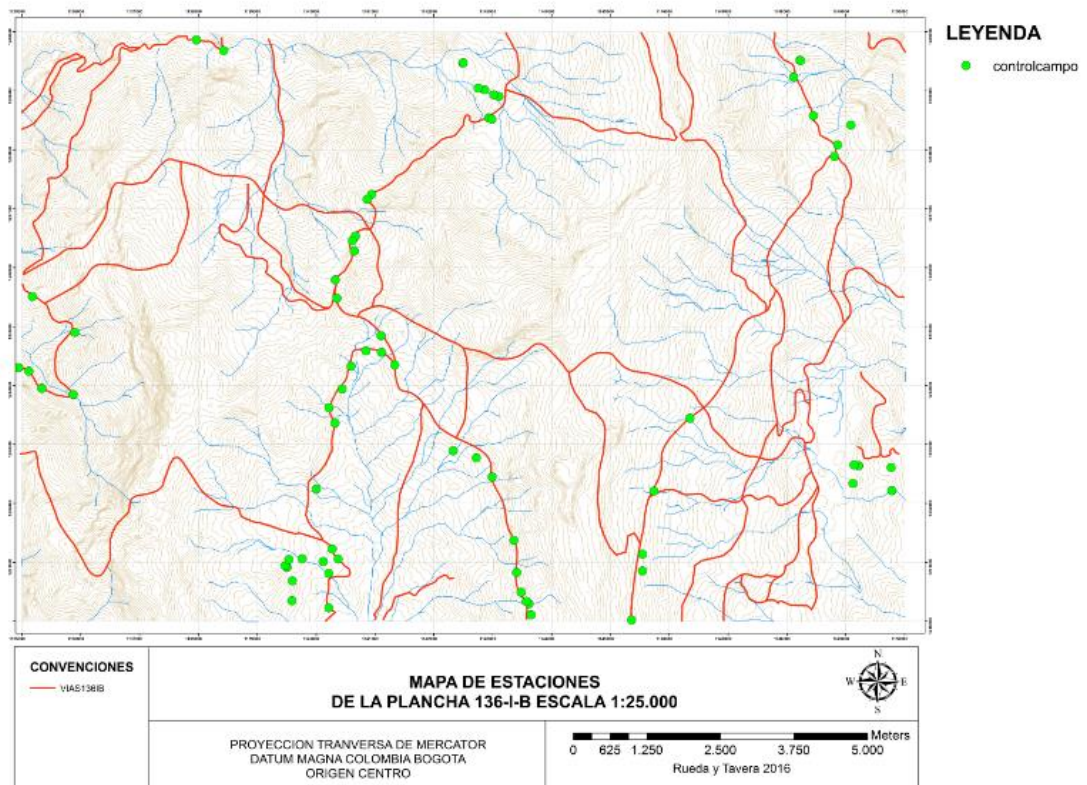
Otro insumo base fue la plancha 136 (escala 1:100.000) publicada por Vargas *et al.* (1984), con la que se conoció y estudió la geología de la zona. Para ello, se georeferenció y delimitó el área de trabajo correspondiente a la plancha 136-I-B. Posteriormente, se digitalizaron todos los atributos geológicos correspondientes (unidades geológicas, fallas, datos estructurales y vías) y teniendo como base el mapa de sombras y pendientes, se delimitaron mejor los contactos entre unidades geológicas, teniendo el mapa preliminar de Geología. Más adelante, teniendo como base los mapas de sombras y pendientes, se realizó una interpretación acerca de la Morfogénesis del área de estudio, teniendo en cuenta los parámetros dictados en el ANEXO A “*Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas*” del documento “*Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2012), produciendo así el mapa preliminar de Morfogénesis.

Finalmente, con la ayuda del insumo de imágenes satelitales Landsat/astrium, que se encontraron en la plataforma de Google-Earth, fueron desarrollados los mapas preliminares de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y de movimientos en masa. Para la elaboración de este último, se tuvo en cuenta también el registro de la plataforma SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa), el cual fue digitalizado con la ayuda del software ArcGIS 10.

### 4.3. FASE III. VALIDACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA Y DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE SUELO EN CAMPO

Esta fase se realizó entre mediados de marzo y abril del presente año. Durante 12 días, se recorrieron aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, registrando 78 estaciones de control en campo tal y como se muestra en la Figura 3, donde se ilustra el mapa de estaciones

**Figura 3. Mapa de estaciones de campo de control geológico, geomorfológico y de unidades geológicas superficiales**



En cada estación se describieron unidades litológicas, geomorfológicas y Unidades Geológicas Superficiales. También, se buscaron movimientos en masa y se corroboraron los que se encontraron en la plataforma nacional del SIMMA.

La descripción de las unidades geológicas consistió principalmente de la revisión de contactos entre formaciones, la toma de datos estructurales (actitud de los planos de estratificación), y la delimitación de depósitos cuaternarios. 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.

La descripción de las unidades morfogénicas se elaboró mediante los parámetros estipulados en el formato de recolección de datos de “Morfometría para cartografía geomorfológica” el cual se observa el en anexo A.

Los movimientos en masa encontrados se clasificaron, de acuerdo a su tamaño, en dos tipos de formato: los de inventario, con una extensión superior a los 2.500 m<sup>2</sup> (ver anexo B) y los de catálogo, con una extensión inferior a los 2.500 m<sup>2</sup> (ver anexo C).

#### **4.4. FASE IV. GENERACIÓN Y CALIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES INSUMOS PARA LA GENERACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD**

En esta fase se representó cada uno de los insumos propuestos para el análisis de susceptibilidad, en un Sistema de Información Geográfica (SIG), que son: “Geología”, “Densidad de fracturamiento”, “Morfogénesis”, “Morfodinámica”, “Morfometría” (el cual se dividió en tres componentes diferentes: “Pendientes”, “Acuena” y “Rugosidad”); “Unidades Geológicas Superficiales (UGS)” y “Curvatura”. Posteriormente, estos fueron calificados siguiendo cada uno de los parámetros propuestos en el “*Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2013).

Una vez finalizado el mapa de “Morfogénesis”, le fueron asignadas calificaciones de susceptibilidad a cada una de las geoformas que componen este mapa. Las calificaciones se encuentran en el anexo D.

El mapa de “Geología” se refinó a partir del de Morfogénesis. En este se tuvieron en cuenta las geoformas asociadas a depósitos, que posteriormente fueron relacionadas a depósitos coluviales y aluviales. La clasificación de la susceptibilidad por movimientos en masa para depósitos se encuentra en el anexo E; mientras que la calificación de las unidades geológicas (dada por la resistencia y la textura de la roca), se ilustran en los anexos F y G, respectivamente.

Al mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), una vez refinado por el control en campo, le fueron asignadas calificaciones preestablecidas. De esta manera, se calificó teniendo en cuenta la Tabla 2.

**Tabla 2. Calificación de las Unidades Geológicas Superficiales.**

<b>COD</b>	<b>Nombre</b>	<b>Calificación</b>
<b>Sr</b>	Suelo Residual	3
<b>St</b>	Suelo Transportado	2
<b>Sc</b>	Suelo Coluvial	2
<b>So</b>	Suelo Orgánico	4
<b>R</b>	Roca	1

Por otro lado, el mapa de “Morfodinámica” se obtuvo gracias a la información suministrada por las capas de “Geología”, las geoformas asociadas a depósitos en el mapa de “Morfogénesis”, y el mapa de inventario de movimientos en masa. Para ello se tomó el relieve relativo (RR) (diferencia de altitud de la geoforma, entre la parte más alta y más baja de esta, ignorando la altura sobre el nivel del mar) (SGC, 2012), junto con la inclinación de la ladera (ángulo que forman las pendientes del terreno con respecto a la horizontal) (SGC, 2012). Con esto, se

realizó un álgebra de mapas con el objetivo de hacer el cálculo del valor de RELAINCLI:

$$\text{RELAINCLI} = 0.6 * \text{relieve relativo (RR)} + 0.4 * \text{inclinación de la ladera (IL)}$$

A este insumo generado, se le agregaron las geoformas asociadas a depósitos, junto con los movimientos en masa del mapa de inventario. Siguiendo a esto, se calificaron las unidades resultantes de acuerdo a su aporte a la susceptibilidad a movimientos en masa.

Finalmente, los insumos de “Pendiente”, “Rugosidad”, “Acuena”, “Curvatura” y “Densidad de Fracturamiento” fueron procesados con el DEM (como se explica en el “*Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2013); para luego, ser calificados de acuerdo a su afectación relativa a la susceptibilidad.

#### **4.5. FASE V. PROGRAMACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA CON UN SISTEMA DE INFERENCIA TIPO MAMDANI**

En esta fase, se tomaron los insumos calificados y se ingresaron a un Sistema de Lógica Difusa para poder generar el mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa. El software utilizado en este proyecto se llama FuzzyCell, desarrollado por Yanar & Akyürek (2006). Para esto se siguió una serie de cuatro pasos que se explica a continuación.

El primer paso es la *creación del conjunto de datos para cada insumo*, en donde se organiza la información y se incorpora al software (cabe resaltar que todos estos se deben incorporar en formato raster). El segundo, es la *definición del universo de discurso y de los términos lingüísticos* para cada una de las entradas:

en este caso, como a cada insumo o capa temática le fueron asignados valores ya calificados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), se definió el universo de discurso para cada variable de 1 a 5, en términos del aporte a la susceptibilidad a movimientos en masa; a su vez, los términos lingüísticos asociados a cada insumo, fueron asignados en orden creciente con respecto a los valores de 1 a 5, como muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto. El tercer paso, consiste del *dictamen de las reglas* que representan el conocimiento de la interacción entre las variables. El cuarto, es la *definición de las propiedades del modelo*: tipos de conectores difusos, operación de implicación y de agregación, y formato de salida de variable de susceptibilidad.

#### **4.6. FASE VI. VALIDACIÓN DEL MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD**

Al ser un modelo matemático de simulación, se hace necesario comprobar qué tan efectivo es el mapa en asociar la presencia de movimientos en masa con la clase de susceptibilidad muy alta, en la zona. Por esta razón, se evaluó su rendimiento, por medio de su comparación con el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de la plancha 136 (SGC, 2014); y su respectiva validación, con el uso de la curva ROC de Éxito. La comparación con el mapa de la plancha 136 se hizo a partir de la sección abarcada por el área de estudio. Posteriormente, para la validación se hizo uso de la curva ROC de éxito para evaluar la calidad del documento final, haciendo uso de la información suministrada por el inventario de movimientos en masa, y el mismo mapa de susceptibilidad final de movimientos en masa.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. ANTECEDENTES

La Lógica es la rama de las Matemáticas encargada del estudio del Lenguaje formal (Lee, 2005). La Lógica Tradicional-o Clásica como se le conoce también- es de carácter binario: es decir, sólo toma valores de verdadero (V) o falso (F) cuando es aplicada a la solución de problemas. Considerado como el fundador del campo de la Lógica Difusa (Mendel, 1995); Lofty Zadeh (en Zadeh, 1965) propuso una herramienta para valorar conceptos cualitativos del ser humano (Portilla, 2001). En su trabajo, Zadeh (1965) argumentaba que en la vida cotidiana nos vemos en la necesidad de utilizar “clases” imprecisamente definidas que “juegan un rol importante en el pensamiento humano, particularmente en los campos de reconocimiento de patrones, comunicación de la información y la abstracción” (Zadeh, 1965, p.1).

Esta nació como una respuesta a la necesidad de tratar con sistemas de complejidad alta. Zadeh (1973) describía dos tipos de sistemas: los mecánicos, gobernados por las leyes de la Física como la Termodinámica, la Mecánica y el Electromagnetismo; y los humanísticos, aquellos cuyo objetivo de análisis está en los seres humanos y que son de carácter social, urbano, económico; entre otros (Zadeh, 1973). El hecho de que las técnicas cuantitativas que estaban siendo usadas con éxito para la resolución de problemas en los sistemas mecánicos comenzaran a usarse por analogía con los sistemas humanísticos (que son de mayor complejidad), llevó a Zadeh (1973) a reconocer que éstos métodos son intrínsecamente inadecuados para tratar con sistemas humanísticos (y con cualquier otro tipo de sistema cuyo comportamiento se acerque al del mundo real)

ya que su complejidad, y el hecho de que no estén gobernados por fórmulas matemáticas, hacen que su predicción no sea fácil.

La Lógica Difusa es una herramienta que simula el razonamiento del cerebro humano, integrando dos tipos de conocimiento: el objetivo; usado generalmente para formular problemas de Ingeniería, y el subjetivo; información que generalmente no puede cuantificarse con métodos matemáticos tradicionales (Mendel, 1995).

Está fundamentada en la utilización de variables lingüísticas (*i.e.* conceptos cualitativos con los que calificamos nuestro entorno) para construir juicios o abstracciones de la realidad, usando nuestro propio conocimiento y experiencia (Portilla, 1999). Las variables lingüísticas tienen la importante función de almacenar la información resumida con la menor precisión posible, de manera que pueda ofrecer soluciones al tratar con la complejidad de los sistemas naturales (Zadeh, 1973; Yanar & Akyürek, 2003). Un ejemplo del uso de variables lingüísticas y su asociación con el conocimiento objetivo está representado en la Figura 4, explicado por Mendel (1995): términos como “correlación” y “estabilidad” que se usan normalmente en problemas de procesamiento de señales, utilizan valores concretos que pueden ser usados para calificar y comunicar la información asociados a estos. Por ejemplo, si se normaliza la correlación de manera que su valor pueda variar entre 0 y 1, puede tomarse un valor de 0.15 para calificarla. Pero si además de esto al valor de 0.15 se le asocia una calificación lingüística, como *muy bajo*, aparece un concepto que puede resultar más familiar; así, se está *borrosificando* un elemento concreto; es decir, está siendo asignado a un *conjunto difuso*.

**Tabla 3. Algunos términos usados en el procesamiento de señales. La información asociada a estos es concreta, pero si a dicha información se le asocia una calificación lingüística, ésta puede resultar más familiar en un contexto de trabajo.**

Term	Contextual Usage
Alias	none, a bit, high
Bandwidth	narrowband, broadband
Blur	somewhat, quite, very
Correlation	Low, medium, high, perfect
Errors	large, medium, Small, a lot of, not so great, very large, small, zero
Frequency	high, low, ultra high
Resolution	low, high
Sampling	low-rate, medium-rate, high-rate, very high rate
Stability	stable (lightly damped, highly damped, over damped, critically damped)

Fuente: Tomado y modificado de Mendel (1995).

## **5.2. TEORÍA DE CONJUNTOS: CONJUNTOS CONCRETOS Y CONJUNTOS DIFUSOS**

**5.2.1. Teoría Clásica de Conjuntos.** Un conjunto concreto es una colección de elementos que pertenecen y existen a un universo, y cuyos límites están bien definidos (Duarte, 1999). Lee (2005) explica qué es un conjunto concreto de la siguiente forma: se tiene un elemento universal  $X$  que está definido como el universo de discurso, e incluye todos los posibles elementos asociados al problema. Si se define un conjunto concreto  $A$  en este conjunto universal, se puede expresar su relación de pertenencia (o no pertenencia) con las siguientes expresiones:

$$(1) A \subseteq X \text{ o } A \not\subseteq X$$

A su vez si un elemento  $x$  está incluido en el conjunto  $A$ , su pertenencia (o no pertenencia) está definida por la expresión:

$$(2) X \in A \text{ o } X \notin A.$$

Un conjunto concreto se puede representar de dos formas (Lee, 2005):

Enumerando sus elementos:

$$(3) A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n], \text{ o } \dots$$

Enunciando las condiciones de pertenencia con las que uno de sus elementos podría estar fija:

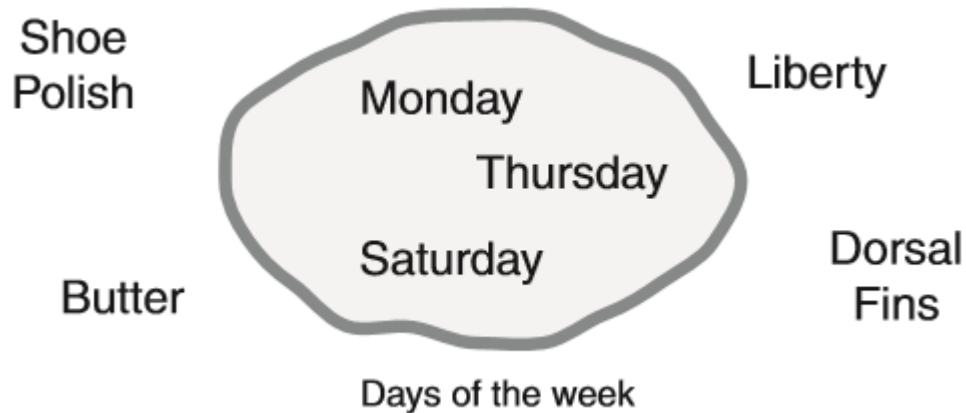
$$(4) B = [b \mid b \text{ satisface } p_1, p_2, \dots p_n]$$

La pertenencia de cualquier elemento, a un conjunto concreto, se mide gracias a la función de membrecía: esta se encarga de mapear un vector de entrada (*i.e.* el elemento del conjunto) dentro de una salida (*i.e.* la pertenencia de ese elemento al conjunto). Para un elemento  $x$ , dentro de un conjunto  $A$ , la función de membrecía se puede representar como:

$$(5) \mu_A(x) = 1. \text{ Sí y sólo si } x \in A \\ =0. \text{ Sí y sólo si } x \notin A$$

Esto quiere decir que sólo hay dos posibilidades: el elemento pertenece, o no pertenece al conjunto: por ejemplo, el conjunto de la Figura 5, “días de la semana” contiene los elementos “lunes”, “jueves” y “sábado”, y excluye cualquier otro contenido que no considere como parte de este (*e.g.* “mantequilla”, “libertad”, “zapato”).

**Figura 4. Elementos como “lunes”, están dentro del conjunto “Días de la semana”; lo cual indica una pertenencia total a este. Sin embargo, elementos como “dorsal” están por fuera del conjunto; es decir, no tienen ninguna relación al conjunto.**



Fuente: Tomada de Matlab (2016)

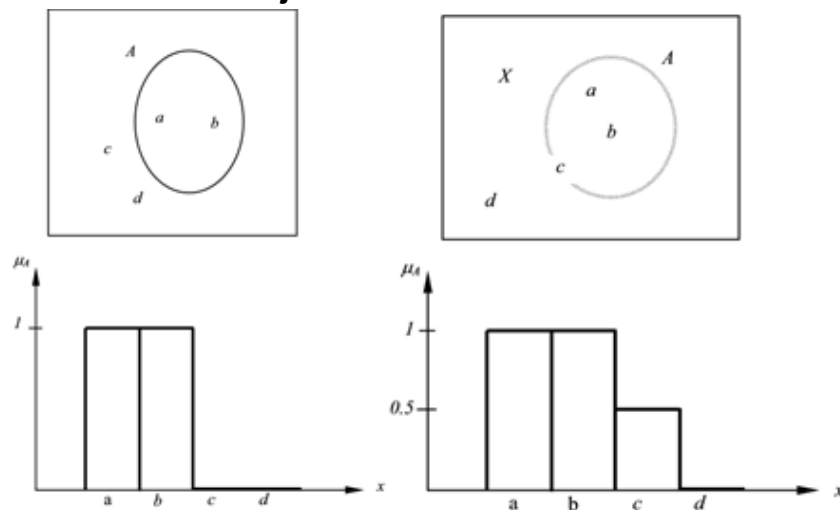
**5.2.2. Teoría de los Conjuntos Difusos.** Un conjunto difuso es una colección de elementos cuya pertenencia a éste se mide por una función de membrecía, o también llamada función de pertenencia (Portilla, 1999). Acorde a Lee (2005), la definición de un conjunto difuso se deriva directamente de la de conjunto concreto, o “*crisp set*”, siendo considerado como una generalización de este último por Zadeh (1965). La diferencia más importante con respecto a los conjuntos concretos es que los elementos de un conjunto difuso pueden pertenecer de forma parcial a éste: es decir, que su grado de membrecía no está definido por un solo valor (pertenencia o no pertenencia; 1 o 0; todo o nada) sino que puede variar entre el valor mínimo (no hay ningún grado de membrecía al conjunto), pasando por valores intermedios (pertenencia gradual) hasta llegar a un valor máximo (pertenencia total). Esta propiedad hace que los límites-también conocidos como fronteras- de los conjuntos difusos, no estén bien definidos (Duarte, 1999)., como se ve en la Figura 6.

Un conjunto difuso únicamente se puede representar con la función de membresía de los elementos que lo constituyen. Por ejemplo, si  $A$  es un conjunto difuso definido en un conjunto universal  $X$ :

$$(6) A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\}: \text{ donde } \mu_A(x) \text{ es la función de membresía de los elementos } a \text{ a ese conjunto difuso } A$$

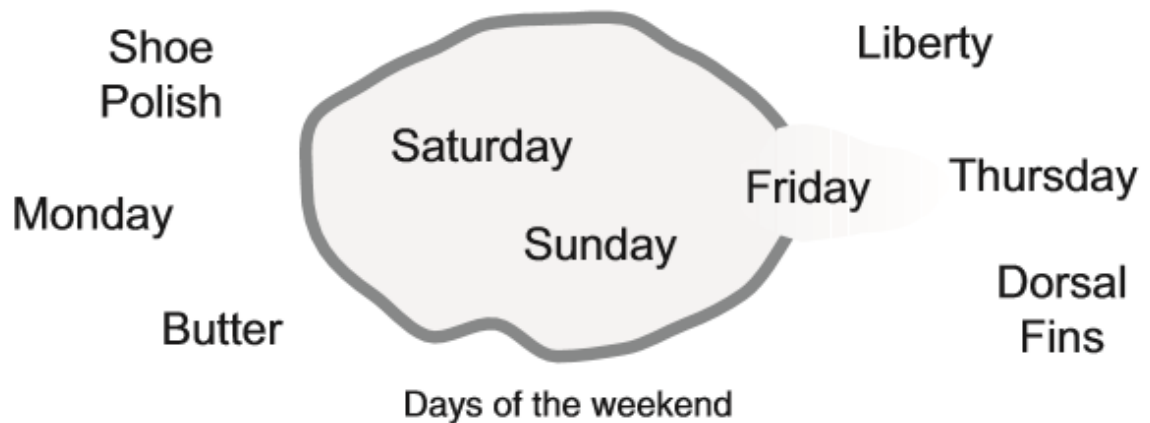
Esta representación muestra que todo conjunto difuso es, entonces, una colección de pares ordenados formados por todos sus elementos y sus respectivas funciones de membresía (Lee, 2005). Para explicar mejor estas definiciones, se muestra el siguiente ejemplo, en la Figura 7: se tiene el conjunto “Días del fin de semana”; dentro están los elementos “sábado” y “domingo”, los cuales tendrían una pertenencia total al conjunto difuso. Por fuera, están elementos como “lunes”, “polaco” o “mantequilla”, los cuales están excluidos del conjunto y no tienen ninguna pertenencia a este; sin embargo, en la frontera del conjunto está el elemento “viernes”, cuya presencia aquí denota una pertenencia parcial.

**Figura 5. Diferencias entre un conjunto concreto (izquierda) y un conjunto difuso (derecha). En el primero, los elementos pertenecen o no al conjunto; mientras que, en el segundo, hay una pertenencia parcial. Esta propiedad hace que los límites del conjunto difuso no estén bien definidos.**



Fuente: Tomada y modificada de Lee (2005).

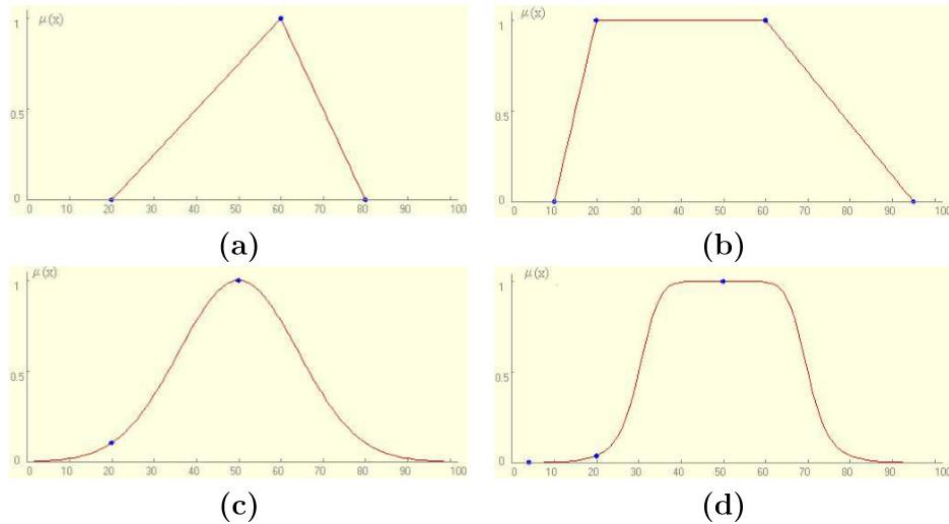
**Figura 6. Ejemplo de un conjunto difuso. Elementos como “sábado” y “dorsal” tienen una pertenencia total o nula al conjunto difuso “Días del fin de semana”; mientras que el elemento “Viernes” tiene un grado de membrecía parcial.**



Fuente: Tomada de Matlab (2016).

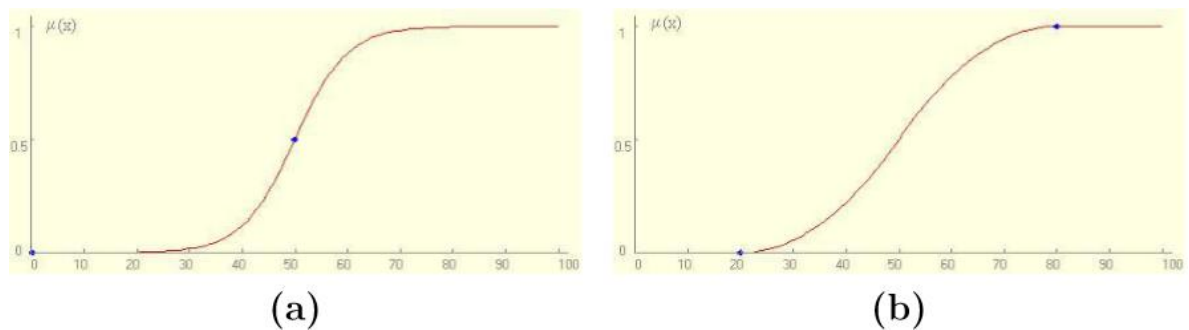
La función de membrecía, definida previamente para los conjuntos concretos, adquiere el mismo significado en los conjuntos difusos: sin embargo, en vez de mapear elementos de un espacio de entrada dentro de un espacio de salida binario (0 o 1), en este caso lo hace dentro de un rango de 0 hasta 1. Esta función puede tener diferentes formas según sea el comportamiento de los elementos de entrada, entre las que destacan la triangular, trapezoidal, gaussiana y “en forma de campana” como se observa en la Figura 8; junto con la sigmoideal y “en forma de S”, en la Figura 9. En el presente trabajo, como se ve más adelante en el capítulo “APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA PARA ESTIMACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA” se usó la función de membrecía triangular debido a su simplicidad, ya que encajaba adecuadamente con la calificación asignada a todos los parámetros; además de esto, es la función a la que se ha recurrido en los trabajos de susceptibilidad a movimientos en masa, usando sistemas de inferencia difusa (Portilla, 2001; Akgun *et al*; 2012; Aydin & Eker, 2016; Osna *et al*; 2014).

**Figura 7. Ilustración de cuatro tipos de formas diferentes para las funciones de membresía. De izquierda a derecha: a) Triangular; b) Trapezoidal; c) Gaussiana y d) En forma de campana.**



Fuente: Tomada de Yanar & Akyürek (2003).

**Figura 8. Ilustración de dos tipos de formas para la función de membresía: a) Sigmoïdal y b) “en forma de S”.**



Fuente: Tomada y modificada de Yanar & Akyürek (2003).

### 5.2.3. Operaciones De Conjuntos Concretos

**Complemento:** Que puede ser Complemento relativo:

$$(7) B - A = [x \mid x \in B, x \notin A],$$

cuando se tienen dos conjuntos concretos B y A, y se requiere los elementos que se encuentren en B, que no se encuentren en A. También existe el Complemento absoluto:

$$(8) A^l = X - A,$$

que son todos los elementos que están en el conjunto universal X y que no están incluidos en A (Lee, 2005).

**Unión:** La colección de todos los elementos que hacen parte de dos conjuntos concretos A y B, definida como:

$$(9) A \cup B = [x \mid x \in A \text{ o } x \in B] \text{ (Lee, 2005)}$$

**Intersección:** La colección de aquellos elementos en común, que están incluidos tanto en el conjunto A como en el conjunto B, definida como:

$$(10) \quad A \cap B = [x \mid x \in A \text{ y } x \in B] \text{ (Lee, 2005).}$$

#### 5.2.4. Operaciones De Conjuntos Difusos

**Complemento:** Si se tiene un conjunto difuso A, su función de membrecía se representa con la expresión  $\mu_A(x)$ . El complemento de un conjunto difuso A, denotado como  $A^l$ , se puede representar por medio de su función de membrecía,  $\mu_{A^l}(x)$ , como:

$$(11) \quad \mu_{A^l}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ (Duarte, 1999).}$$

**Unión:** Si se tienen dos conjuntos difusos A y B, se tienen dos funciones de membrecía  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ . La unión de A y B da como resultado un nuevo conjunto difuso,  $A \cup B$  (Lee, 2005) cuya función de membrecía se puede representar de la forma:

$$(12) \quad \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x).$$

Para representar la unión de dos conjuntos, hay varios operadores que se conocen como S- Normas (Duarte, 1999): el más común y uno de los más sencillos es el máximo (max), con el que la unión de dos conjuntos queda representada de la forma:

$$(13) \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

**Intersección:** Dos conjuntos difusos A y B se representan con dos funciones de membrecía  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ . La intersección de A y B da como resultado un nuevo conjunto difuso,  $A \cap B$  (Lee, 2005) cuya función de membrecía se puede representar de la forma:

$$(14) \quad \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x).$$

Para representar la intersección de dos conjuntos, hay varios operadores que se conocen como T-Normas (Duarte, 1999): el más común y uno de los más sencillos es el mínimo (min), con el que la intersección de dos conjuntos queda representada de la forma:

$$(15) \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

### 5.3. RELACIONES ENTRE LA LÓGICA Y LA TEORÍA DE CONJUNTOS

**5.3.1. Lógica Clásica y conjuntos concretos.** La Teoría de Conjuntos, la Lógica Tradicional y el Álgebra Booleana son metodologías isomorfas (Yanar & Akyürek, 2003; Duarte, 1999; Mendel, 1995): esto quiere decir que tienen una estructura subyacente similar, y que por medio de transformaciones, las definiciones que se hagan en cualquiera de las tres se puede llevar a la otra (Duarte, 1999). De esta manera, como se muestra en la Figura 10, las operaciones de intersección, unión y complemento realizadas entre conjuntos concretos tienen su equivalente en los operadores AND, OR y NOT.

Además de las operaciones, las equivalencias también existen entre los conjuntos concretos y las proposiciones enunciadas en la Lógica, como se muestra en el siguiente ejemplo, tomado de Duarte (1999): si se tiene dos proposiciones “x es A” e “y es B”, y se aplica el razonamiento lógico (*i.e.* el proceso en la lógica mediante el cuál se generan nuevas proposiciones a partir de otras) combinándolas con el conector AND; el resultado es una nueva proposición: “x es A AND y es B”. Ahora, la primera proposición “x es A” equivale a un elemento x incluido en un conjunto concreto A, representado por su función de pertenencia  $\mu_A(x)$ ; del mismo modo, se puede representar la proposición “y es B” como  $\mu_B(y)$ . Teniendo en cuenta que el operador AND equivale a la intersección (y que esta última puede representarse mediante operadores llamados T-Normas), la proposición “x es A AND Y es B” se puede interpretar como:

$$(16) \quad \mu_{A \text{ AND } B}(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

**Figura 9. Correspondencia entre la Teoría clásica de conjuntos, el Álgebra Booleana y la Lógica Clásica o Tradicional.**

Teoría de conjuntos	Álgebra booleana	Lógica tradicional
Intersección	Conjunción	AND
Unión	Disyunción	OR
Complemento	Negación	NOT

Fuente: Tomada y modificada de Duarte (1999).

Otro operador muy importante en la Lógica Tradicional y como se verá, más importante aún en la Lógica Difusa es el de implicación, ya que es sobre el cuál se hacen inferencias para formar las reglas en los que se basan los Sistemas de Lógica difusa. La implicación se usa para tratar de “encontrar una forma de interpretar proposiciones semejantes a las utilizadas en la experiencia común para describir conocimientos” (Duarte, 1999, P. 25).

Si se tienen nuevamente las proposiciones “x es A” e “y es B”, se puede usar el operador “implicación” para formular una nueva proposición: “If x es A THEN y es B”. Este enunciado se conoce en la lógica como “regla”, y está formado por una *premisa (o antecedente)* “If x es A” y una *conclusión (o consecuente)* “Then y es B” (Mendel, 1995). Por analogía, como ya se vio con los operadores AND, OR y NOT, la proposición generada usando el conector “implicación” puede ser transformada a un conjunto concreto. Por una serie de procesos matemáticos explicados en textos como Mendel (1995), se llega a la expresión para representar el nuevo conjunto mediante su función de membresía:

$$(17) \quad \mu_{A \rightarrow B}(x,y) = \max[1-\mu_A(x,y), \mu_B(x,y)] = 1-\min[\mu_A(x,y), 1-\mu_B(x,y)]$$

El operador “implicación” conecta proposiciones de la forma IF-THEN, formando de esta manera reglas de implicación (Yanar & Akyürek, 2003), y tiene su propia tabla de verdad, como se muestra en la Figura 11. Sin embargo, el uso de las reglas de implicación (Yanar & Akyürek, 2003), también conocidas como “implicaciones lógicas o IF-THEN” tiene una limitación: una implicación lógica sólo es falsa cuando la primera proposición (antecedente) es verdadera y la segunda (consecuente) es falsa, como se ilustra en la Figura 11. La tabla de verdad supone que incluso cuando el antecedente es falso, la implicación es verdadera. Aunque estos puedan ser razonamientos formalmente correctos, no necesariamente son los adecuados para hacer inferencias realmente útiles y que se ajusten a un problema real (Duarte, 1999).

**Figura 10. Tabla de verdad para el operador Implicación en la Lógica Clásica.**

P	Q	P=>Q
VERDAD	VERDAD	VERDAD
VERDAD	FALSO	FALSO
FALSO	VERDAD	VERDAD
FALSO	FALSO	VERDAD

Fuente: Tomado y modificado de Duarte (1999)

**5.3.2. Lógica Difusa y conjuntos difusos.** Al igual que en el caso de la Lógica Clásica y los conjuntos concretos, la Lógica Difusa y los conjuntos difusos permiten hacer correspondencias entre enunciados emitidos por la primera, y funciones de membrecía derivados de la segunda. Los operadores más usados son el max y el min difuso, pero existen otros como la suma algebraica difusa, el producto algebraico difuso y operador gamma difuso, usados de acuerdo a la necesidad del problema (Chi *et al*; 2002).

Al igual que los conjuntos difusos son una extensión de los conjuntos concretos, la Lógica Difusa está considerada como una extensión de la Lógica Clásica. En esta, se reemplazan las funciones de membrecía de carácter binario de la Lógica Clásica, por funciones de membrecía difusas (Mendel, 1995).

En la Lógica Difusa también se pueden formular reglas, pero estas son diferentes de las empleadas en la Lógica Clásica: a éstas se les llama “implicaciones de ingeniería” (Duarte, 1999; Mendel, 1995). A diferencia de las implicaciones lógicas usadas en la Lógica Clásica, *las implicaciones de ingeniería sólo tienen en cuenta el caso en el que tanto el antecedente como el consecuente de la regla tienen un valor de verdad*: por esta razón, como se verá más adelante en el capítulo de Sistemas de Lógica Difusa, las reglas de ingeniería usan la misma tabla de verdad de las T-normas (*i.e.* conectores AND difusos), y no la del conector “Implicación” de la Lógica Clásica (Figura 12). Esta característica permite que se tengan en cuenta las relaciones causa-efecto, y que las proposiciones tomen valores de verdad parcial, a diferencia de las implicaciones lógicas en la Lógica binaria (Yanar & Akyürek; 2003).

**Figura 11. Tablas de verdad de los operadores “Conjunción” e “Implicación” en la Lógica Clásica. Debido a que la Lógica Difusa trata de mantener las relaciones causa-efecto de sus enunciados, recurre a la tabla de verdad de la conjunción para formular “Implicaciones de ingeniería”.**

p	q	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \rightarrow q$
T	T	T	T	T
T	F	F	T	F
F	T	F	T	T
F	F	F	F	T

Fuente: Tomado y modificado de Mendel (1995).

#### 5.4. LA LÓGICA DIFUSA Y LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa son producto de la concomitancia de no sólo uno, sino de varios elementos: a estos se les conoce como “factores causales”, aunque en la literatura han recibido muchos nombres por diferentes autores (e.g. causativos, intrínsecos, condicionantes, de predisposición; etc.) (Zhu *et al*; 2014). La ocurrencia de los movimientos en masa está determinada por la relación entre factores causales de dos tipos que, según Crozier (1986) y Siddle *et al.* (1991) (como los citan ambos en Kanungo *et al*; 2009) son: factores internos; que corresponden a propiedades inherentes al suelo, que reducen con el tiempo la resistencia del material y hacen a los taludes susceptibles al movimiento (e.g. litología, geomorfología y vegetación); y factores externos, aquellos que desencadenan los movimientos gracias a la acción de los primeros (e.g. sismicidad, precipitación, uso de suelo).

Los impactos socioeconómicos que producen, la necesidad por urbanizar áreas montañosas y de entender su naturaleza compleja, junto con el avance en las

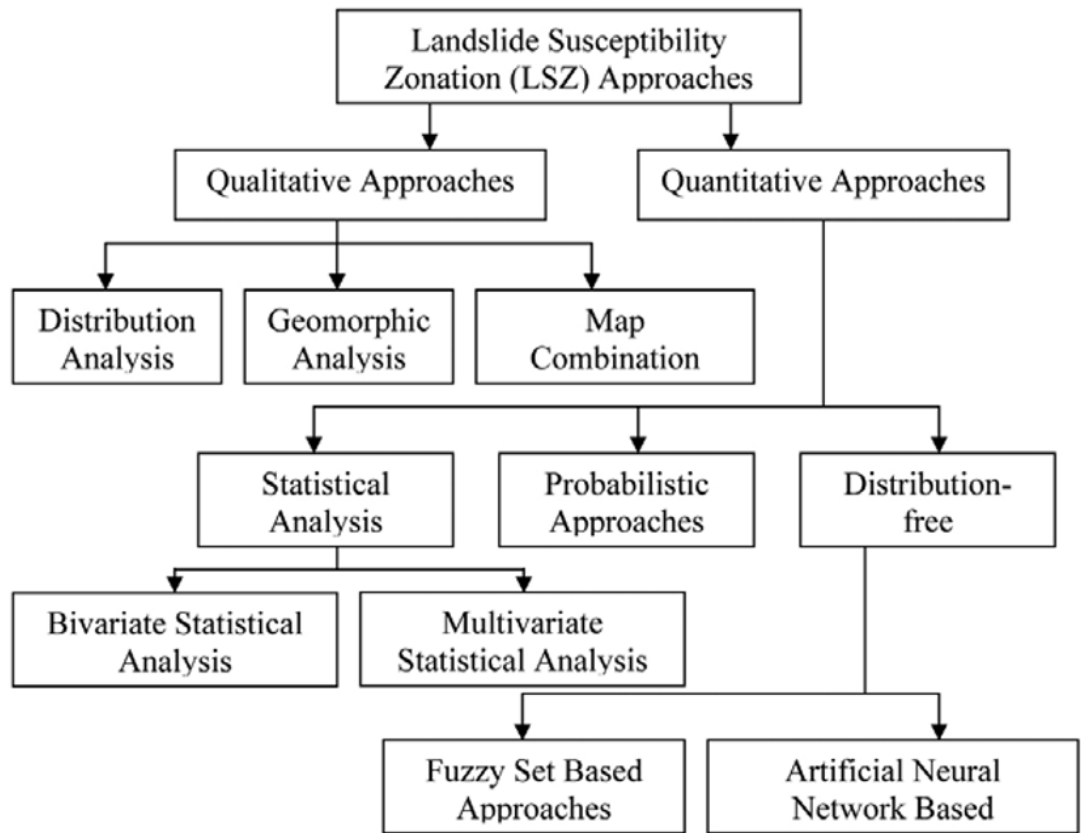
técnicas de computación y los SIG (Kanungo *et al*; 2009; Akgun *et al*; 2012) han sido clave para fomentar el estudio de estos fenómenos entre profesionales de áreas de las ciencias de la tierra, como la Ingeniería Geológica y la Geomorfología (Ercanoglu & Gokceoglu, 2004) y de ayuda supremamente grande para la elaboración de planes de ordenamiento territorial y de desarrollo (Portilla, 1999) a nivel regional. Es crucial entonces, para la planeación estratégica de actividades encaminadas al progreso de una región, la zonificación del área de estudio en unidades homogéneas que se distingan entre sí por el grado potencial o real de la ocurrencia de movimientos en masa: a ésta actividad se le conoce como Zonificación de la Susceptibilidad a Movimientos en Masa (LSZ, por sus siglas en inglés) (Kanungo *et al*; 2009).

Existen muchos métodos para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa, pero todos están fundamentados en una premisa inicial: es necesario identificar cuáles son los factores causales, y cuál es la relación de cada uno de ellos con la susceptibilidad a movimientos en masa; es decir, su grado de afectación sobre ella o su importancia relativa (Zhu *et al*; 2014). Los primeros aparecieron en la década de los 90 y autores como Akgun *et al*. (2012) y Kanungo *et al*. (2009) han propuesto su propia clasificación para organizarlos. El primero sugiere que estos pueden dividirse en tres grupos principales, que son estadísticos, de *soft computing* y por combinación de mapas índice. El segundo plantea que estos pueden clasificarse en dos grupos principales: métodos cuantitativos y métodos cualitativos (Figura 13). Dentro de los métodos cualitativos hay tres subgrupos: los de análisis de distribución (*Distribution Analysis*), en los que la susceptibilidad se halla a partir de un mapa de movimientos preexistentes; los de análisis geomorfológico (*Geomorphic Analysis*), realizados por expertos en geomorfología, basados en su propia experiencia de campo y sin descripción de las reglas que los han llevado a realizar esas inferencias; y por combinación de mapas (*Map Combination*), realizada a partir de la súper-imposición de capas temáticas, de los factores causales. Las desventajas más importantes de estos

tres procedimientos son la de su *dependencia en decisiones puramente subjetivas*; lo que hace difícil su comparación con otros trabajos de distintos autores y/o áreas, y que *no son fácilmente actualizables* cuando hay información nueva disponible (Kanungo *et al*; 2009). El segundo grupo puede dividirse en tres agrupaciones: de análisis estadísticos (*Statistical Analysis*), métodos probabilísticos (*Probabilistic Approaches*) y libres de distribución (*Distribution-free Analysis*). Los métodos libres de distribución aparecieron como una alternativa a los métodos cuantitativos tradicionales (e.g. los métodos bivariados y multivariados). Estos últimos, a pesar de ser más objetivos, tienen múltiples desventajas: *dependen mucho del número, calidad y confiabilidad de los datos* (Ercanoglu & Gokceoglu, 2004; Zhu *et al*; 2014); *hacen muchas generalizaciones y simplificaciones durante el análisis*; *no requieren de la opinión de expertos* (Akgun *et al*; 2012) y *tienen una portabilidad limitada* (es decir, los modelos aplicados por un autor en un área determinada pueden no ser útiles si se quieren adaptar a otra localización, ya sea por él/ella mismo o por otra persona (s)).

Hay tres maneras de abordar la zonificación de susceptibilidad por métodos libres de distribución: las redes neuronales, los métodos basados en Lógica Difusa y los enfoques neuro-difusos.

**Figura 12. Recuento de los métodos para la determinación de susceptibilidad a movimientos en masa.**



Fuente: Tomada de Kanungo *et al.* (2009).

Los métodos difusos pueden *procesar múltiples conjuntos de datos* de manera cuantitativa (Chi *et al.*; 2002), y se apoyan en las relaciones difusas entre los factores causales y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa (Kanungo *et al.*; 2009). El uso de los modelos basados en Lógica Difusa para hallar la susceptibilidad a movimientos en masa ha sido importante en el sentido de que son capaces de *expresar las no-linealidades e imprecisiones* asociadas a los parámetros de entrada y a la naturaleza compleja de la susceptibilidad (Ercanoglu & Gokceoglu, 2004), lo que la diferencia de otras técnicas que suponen el problema como un sistema lineal; es decir, como un conjunto de relaciones monótonas y generalizadas (Zhu *et al.*; 2014).

A su vez, ha habido variaciones en el empleo de la Lógica Difusa para hallar la susceptibilidad a movimientos en masa, y en las geociencias en general. Algunas de estas son:

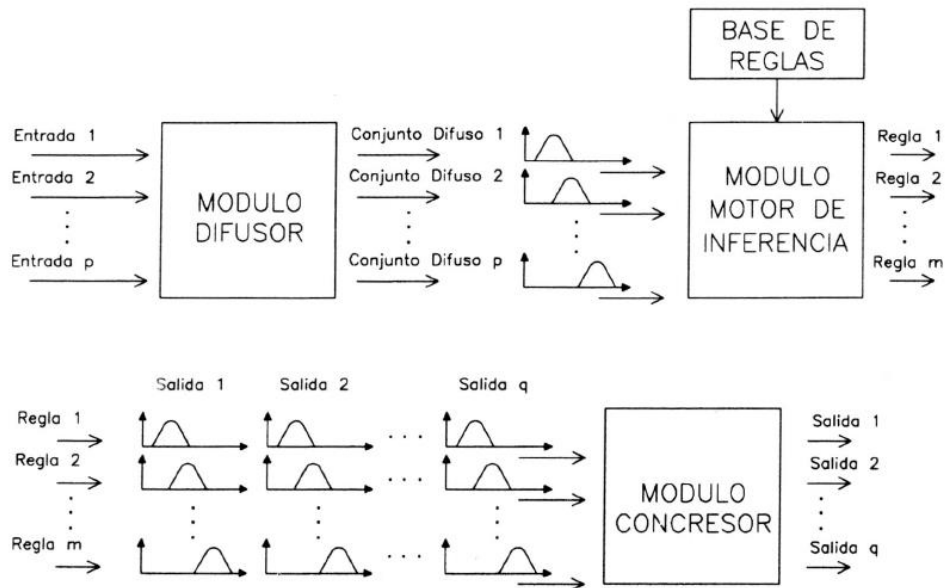
Champaty ray *et al.* (2007), a partir de una metodología propuesta por Boham - Carter (1994) y An *et al.* (1991) para la exploración mineral (como los citan ambos en Champaty ray *et al.*; 2007) determinaron las relaciones entre los factores causales y la susceptibilidad, considerando a las categorías de cada parámetro (*i.e.* factor causal) como elementos de un conjunto difuso, y a los parámetros, como los conjuntos difusos. De esta manera, asignaron funciones de membresía sin ningún tipo de restricción, mediante juicios subjetivos, de acuerdo al grado de afectación de cada categoría a la susceptibilidad final.

Chi *et al.* (2002) siguiendo un método propuesto por Chung and Fabbri (2001) (como lo citan en Chi *et al.*; 2002), determinaron las relaciones entre los factores causales y los movimientos ya ocurridos, asignando funciones de membresía mediante ratios de probabilidad. Luego, usando redes de inferencia y probando con varios operadores difusos al tiempo, compararon y determinaron cuál de ellos se ajustaba más a la realidad. Kayastha *et al.* (2013) muestra un procedimiento más detallado en el que usa las ratios de probabilidad, pero no usa la red de inferencia.

Akgun *et al.* (2012), Aydin and Eker (2016) y Osna *et al.* (2014) utilizaron una metodología basada en la aplicación de la Lógica Difusa a la Ingeniería. Esta se diferencia de las anteriores porque incluye una base de reglas de la forma “IF - THEN”, que junto con las funciones de membresía de las variables de entrada y de la variable de salida, forman un Sistema de Inferencia Difusa, o FIS (Figura 14). El uso de FIS ha sido inicialmente empleado en varios casos de estudios aplicados a la Ingeniería Geológica, por autores como (Gokceoglu, 2002; Nefeslioglu *et al.*; 2003, 2006) (como los citan todos en Akgun *et al.*; 2014), pero en

muy pocas ocasiones ha sido usado para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa. Entre sus ventajas con respecto a otros tipos de procedimientos, están que muestra el conocimiento de los expertos de forma clara, tiene en cuenta las imprecisiones objetivas, provee una base matemática fuerte, y puede usarse en áreas grandes (escalas 1:25000), ya que tolera bases geográficas grandes de datos y muchos parámetros condicionantes (Akgun *et al*; 2014).

**Figura 13. Los sistemas de inferencia están caracterizados por el uso de reglas de la forma IF-THEN, utilizadas para representar el conocimiento y la experiencia de los expertos. Está formado por cuatro bloques: Módulo Difusor, Módulo Base de Reglas, Módulo Motor de Inferencia y Módulo Concesor.**



Fuente: Tomado de Portilla (2001)

## 5.5. SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA

Un Sistema de Lógica Difusa (también conocido como Sistema de Inferencia Difusa, o FIS) es un mapeo no lineal de una entrada vectorial, a una salida escalar

(Matlab, 2016). Ingresamos valores numéricos (*crisp inputs*) y arroja valores numéricos (*crisp outputs*) (Lee, 2005). Es ampliamente usado en aplicaciones como el procesamiento de señales, control automatizado y el análisis para toma de decisiones (Mendel, 1995; Matlab, 2016).

Entre todos los tipos de sistemas de inferencia existentes en la literatura, tales como el Sugeno, Tsukamoto y el Mamdani, ha sido el último el que ha recibido la mayor aceptación, debido a que está considerado como el más intuitivo y que se adapta mejor al lenguaje humano (Maguiña, 2010). El FIS Mamdani fue desarrollado en el año 1975 por Ebrahim Mamdani, como una propuesta para tratar con algoritmos difusos (Matlab, 2016), y consiste de las funciones de membresía de las variables de entrada y de la variable de salida, junto con una base de reglas con la estructura:

(18) *If  $E_1$  es  $T_1$  AND  $E_2$  es  $T_2$  AND ... AND  $E_n$  es  $T_n$  THEN  $S$  ES  $L$* ; donde  $E_n$  y  $S$  son variables lingüísticas de entrada y de salida; y  $T_n$  y  $L$  son los términos lingüísticos respectivos.

Acorde a Akgun *et al.* (2012), su uso para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, a escalas medias, ha sido escaso en la literatura internacional (en trabajos como los de Saboya *et al.*; 2006; Juang *et al.*; 1992) (como lo citan ambos en Akgun *et al.*; 2012), y, sin embargo, ha sido bien recibido en temas de Ingeniería Geológica. Acorde a Mendel (1995) (como lo cita Portilla, 2001), está constituido por cuatro módulos:

#### Módulo difusor

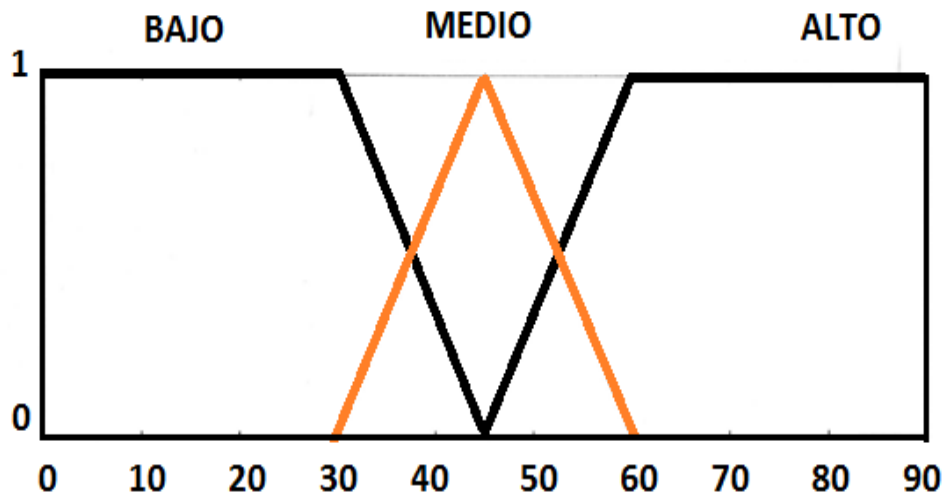
Es el primer componente del Sistema de Inferencia. Puede recibir varias entradas numéricas. Acorde a Duarte (1999), el bloque (o módulo) difusor se encarga de convertir todas las entradas en conjuntos difusos (Figura 14).

A pesar de que las entradas corresponden a datos numéricos, todas ellas deben estar agrupadas-y representadas en el Sistema de Inferencia- por uno o más enunciados; es decir, por variables lingüísticas. Como se definió en la sección 1 del capítulo “antecedentes”, una Variable Lingüística es un concepto cualitativo con el que podemos calificar nuestro entorno, con base en la experiencia propia: es importante porque permite almacenar la información, de manera en que podamos comunicarla con la menor precisión posible.

En un Sistema de Lógica Difusa, este concepto consta de cuatro elementos (Figura 15): *nombre de la variable*; el *universo de discurso* (definido como los valores numéricos, de cada variable, que pueden ser ingresados al Sistema); *términos lingüísticos* (i.e. atributos que puede adquirir la variable, representados por conjuntos difusos), y finalmente, *un significador lingüístico*, que muestra la distribución de los conjuntos difusos en el rango del universo de discurso de la variable (Portilla, 2001).

Cuando se han definido todos estos elementos para cada una de las variables lingüísticas, el Sistema de Inferencia procede a convertir estas entradas en conjuntos difusos: este proceso consiste de tomar los valores numéricos del universo de discurso y hallar el grado de pertenencia al conjunto difuso apropiado (representado por un término lingüístico), proyectando una línea vertical (desde donde se encuentra el elemento a evaluar, en la horizontal) hasta cortar el trazo del conjunto difuso: el punto de corte representa el valor de la función de pertenencia, de ese elemento, al conjunto (Figura 16).

**Figura 14. Ejemplo de una variable lingüística de entrada, en un SLD: el nombre es “ángulo de buzamiento”; el universo de discurso va de 0-90 grados; los términos lingüísticos son tres conjuntos difusos BAJO, MEDIO y ALTO; y el significador lingüístico, corresponde a la representación gráfica de todos estos parámetros.**

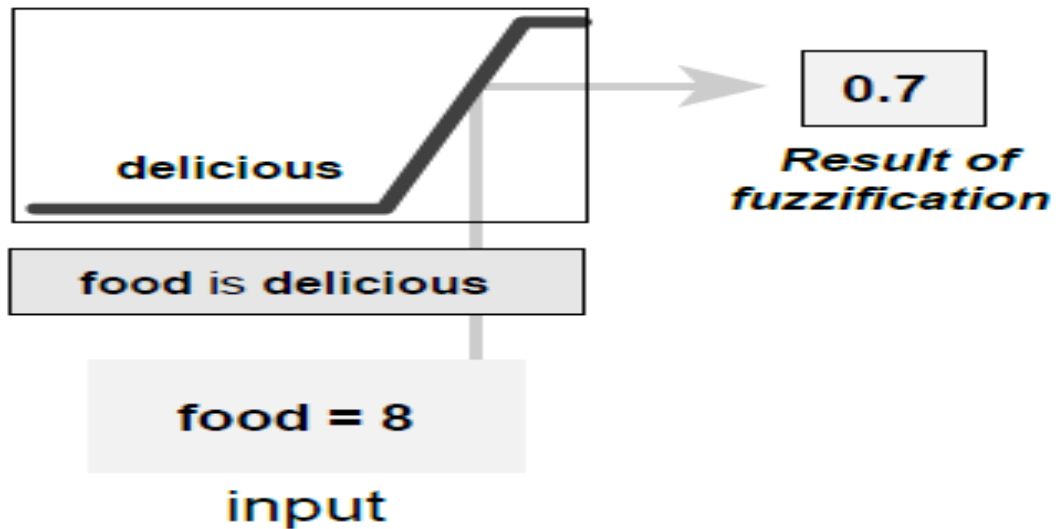


Fuente: Tomado y modificado de Portilla (2001).

#### Módulo de Base de reglas

Acorde a Portilla (2001), es un conjunto de proposiciones lógicas, elaboradas a partir de la experiencia. Las reglas que forman parte de un Sistema de Lógica Difusa son también llamadas Implicaciones de Ingeniería, y tienen como función, además de conectar todas las variables de entrada con la variable de salida, el de representar el conocimiento experto por medio de sus enunciados.

Figura 15. La variable lingüística “*food*” tiene un término lingüístico “*delicious*”. Para hallar el grado de membrecía de cualquier elemento, se proyecta una línea vertical, desde la horizontal, hasta cortar con el trazo del conjunto.



Fuente: Tomado de Matlab (2016).

**5.5.1. Módulo de Inferencia.** Se encarga de establecer qué reglas se activarán, ya que un número muy pequeño de ellas son las que en realidad se estarán empleando en el sistema. Lo hace como nosotros, los seres humanos, realizamos inferencias para entender problemas y poder tomar decisiones. El Módulo de Inferencia consta de tres pasos (Figura 17):

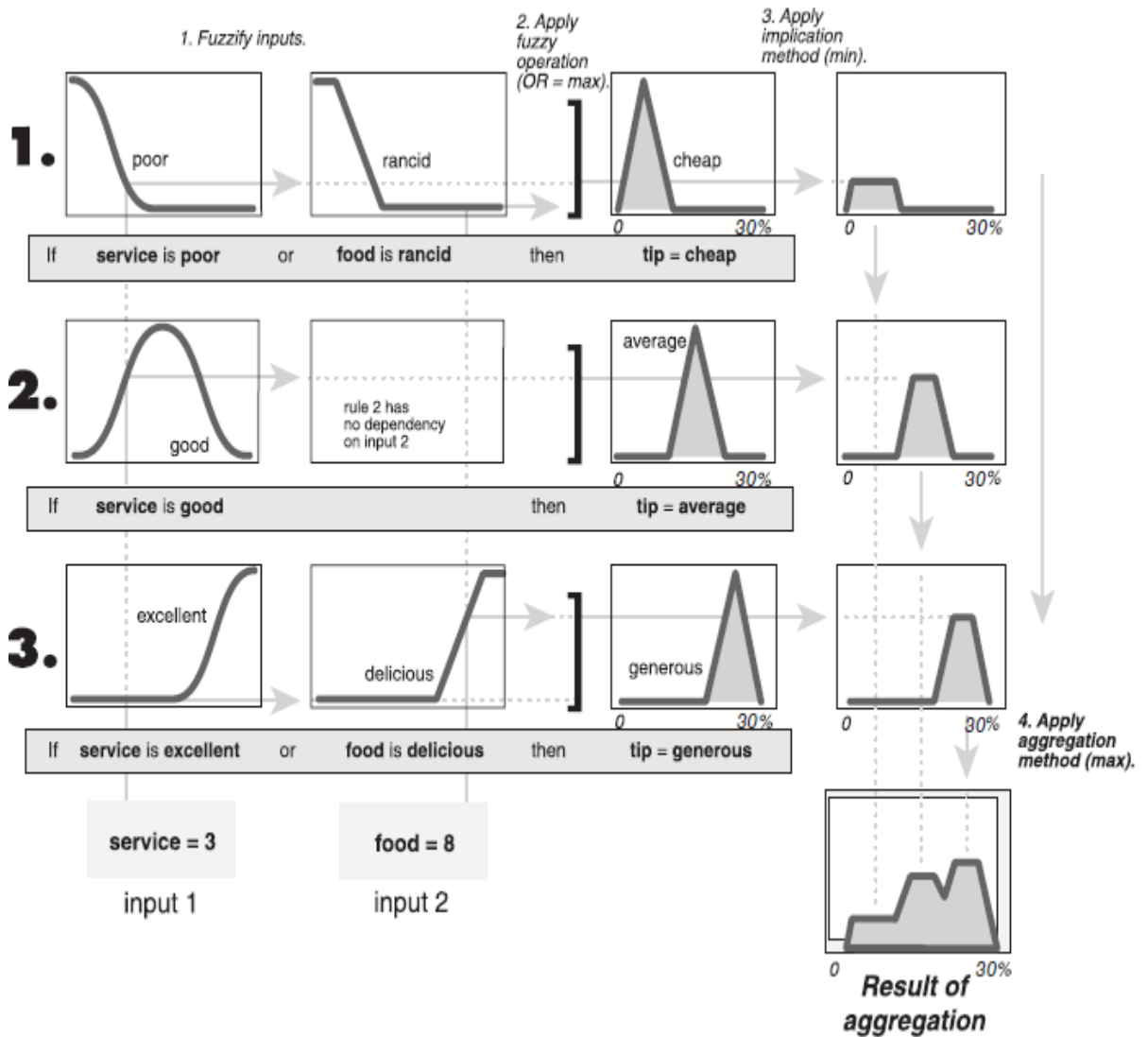
- Cálculo de la parte “If” de las reglas (Maguiña, 2010): A partir de los conjuntos difusos generados en el Módulo Difusor, y para cada una de las reglas, aplica el operador lógico que se esté usando entre los antecedentes, para formar un conjunto difuso de salida (Figura 17, paso 2).
- Cálculo de la parte “Then” de las reglas (Maguiña, 2010): Luego de esto, también para cada una de las reglas, aplica el Método de Implicación: como se mencionó en la sección “Lógica Difusa y conjuntos difusos”, para mantener la naturaleza causa-efecto de las reglas, se debe aplicar una T-norma (*i.e.* un

operador AND difuso), entre el conjunto difuso generado en los antecedentes y el conjunto difuso de salida que se esté evaluando en la respectiva regla. El operador T-norma más usado para el Método de Implicación, es el *min*, debido a que produce un conjunto difuso de salida truncado, aunque también se usa el operador *product* (Matlab, 2016).

- Agregación (Maguiña, 2010): Finalmente, luego de haber aplicado el Método de Implicación para cada regla, se suman todos los conjuntos difusos generados a partir de cada una, y se usa un Método de Agregación: este no es más que aplicar un operador S-norma (*i.e.* un operador OR difuso), para sumar todos los conjuntos difusos de salida, y dar un resultado final. El operador de agregación más comúnmente usado es el *max*, aunque también existen operadores como *sum* y el *probabilistic OR* (Matlab, 2016).

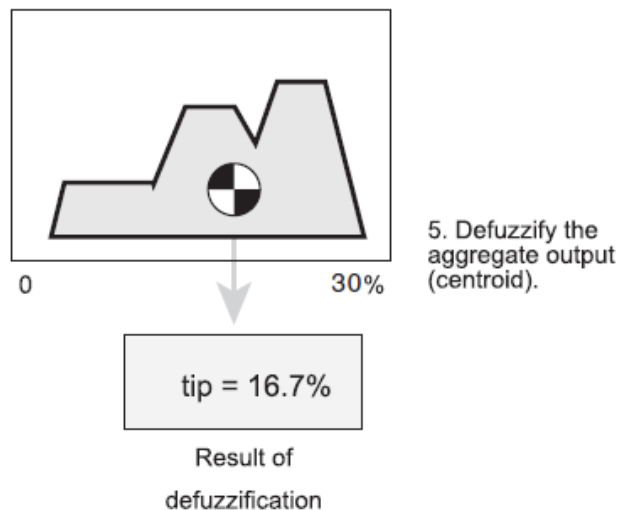
**5.5.2. Módulo Concesor.** Recibe los conjuntos difusos de salida producidos por el Motor de Inferencia; los procesa, y mediante un algoritmo, produce un valor concreto de salida (Portilla, 2001). El algoritmo más comúnmente usado corresponde al Centro de Gravedad (Figura 18).

Figura 16. Los números 1,2 y 3 en negrilla representan una regla de implicación cada uno. El Módulo de Inferencia hace uso de los operadores lógicos, del método de Implicación y el método de Agregación, para sumar todos los conjuntos difusos generados a partir de cada regla.



Fuente: Tomada de Matlab (2016)

**Figura 17. Ilustración del Centro de Gravedad, mecanismo principal del Módulo Concesor para transformar el conjunto difuso de salida (del Módulo Motor de Inferencia), a un valor concreto.**



Fuente: Tomado de Matlab (2016).

## 5.6. MAPAS E INSUMOS BASE Y TEMÁTICOS

La cartografía básica tiene una importancia muy grande para la generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, ya que proporciona información de primera mano acerca de las condiciones actuales del terreno. Esta debe ser digitalizada y, junto con la ayuda de mapas temáticos que brindan información multidisciplinaria (SGC, 2013), permiten hacer predicciones acerca de la inestabilidad de la superficie del territorio.

Los insumos base son aquellos elementos que suministran información básica acerca del territorio, y fueron usados para la elaboración y procesamiento de los mapas preliminares de Inventario de Movimientos en Masa, Geología, Morfogénesis y Unidades Geológicas Superficiales. Por otra parte, los insumos temáticos son componentes necesarios para la realización de los mapas finales (o capas temáticas). Los insumos base corresponden a el Modelo Digital de

Elevación (DEM), Imágenes Satelitales, Inventario de la Plataforma SIMMA y el Mapa Geológico de la plancha 136, Málaga; mientras que los insumos temáticos comprenden los mapas de sombra, pendientes, drenajes y curvas de nivel.

**5.6.1. Modelo Digital de Elevación (DEM).** Es una representación de las altitudes de una porción de la superficie terrestre, generada a partir de un sondeo espacial. En este trabajo de investigación, se usó un DEM liberado por la Agencia Espacial Japonesa (jaxa); producto del sensor remoto Alos Palsar, el cual posee una resolución espacial de 12,5 m.

El DEM sirvió como insumo fundamental para la generación de los mapas de sombras, pendientes, drenajes y curvas de nivel, los cuales fueron claves para la posterior elaboración de las capas temáticas a escala 1:25.000.

**5.6.2. Imágenes Satelitales.** Una imagen satelital es la representación, de forma visual, de una porción de la superficie terrestre, que ha sido recogida por un sensor remoto. El tipo de información que puede suministrar va desde la cobertura de suelo, hasta la representación de la textura y composición de las rocas del terreno.

Con la ayuda de imágenes LANDSAT & CNES/Astrium, tomadas con el software Google Earth Pro, se pudo elaborar los mapas preliminares de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y de Inventario de Movimientos en Masa.

**5.6.3. Inventario SIMMA.** La Plataforma del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) tiene, entre sus funciones, el registro, almacenamiento y administración de la información acerca de estos fenómenos, en el país. A partir de los datos suministrados para el área de trabajo, fue posible la realización del Mapa de Inventario de Movimientos en Masa, a escala 1:25.000.

**5.6.4. Mapa geológico.** El mapa geológico de la Plancha 136, Málaga, elaborado por Vargas *et al.* (1984) sirvió como una fuente de información importante para la fotointerpretación del área de estudio, a escala 1:25.000. Se usó para la elaboración del mapa preliminar de Geología; así como también, para la confección del mapa preliminar de Morfogénesis, con ayuda de los datos estructurales suministrados en el documento.

## **5.7. GEOMORFOLOGÍA**

Acorde a autores como Bloom (1998) y la British Society for Geomorphology (en [<http://www.geomorphology.org.uk/>]), es el estudio científico de los paisajes y de los procesos que les dan forma, y que tiene como objetivos no sólo organizar y sistematizar descripciones para elaborar sistemas de clasificación adecuados; sino reconocer, en estos mismos paisajes, las evidencias de los procesos que las generaron, o que han seguido haciéndolo en la actualidad. La unidad básica de esta disciplina es la “geoforma”, definida por Savigear (1968) (en SGC, 2012 p.12) como: una superficie de terreno, con características morfológicas propias de un proceso y un ambiente o paisaje particular.

El IDEAM (2013) en su documento “Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000” considera que las geoformas son el resultado de la acción combinada de procesos endógenos (también conocidos como morfoestructurales o internos), y procesos exógenos (conocidos como morfodinámicos o externos). Sin embargo, para autores como Bloom (1998) (como lo citan en IDEAM, 2013), en geoformas de escala intermedia, el impacto de factores externos ha sido tal que es posible que la gran mayoría de estas se hayan formado durante el Cenozoico, principalmente durante el Cuaternario, debido a que durante este periodo geológico la actividad tectónica no es tan significativa. A pesar de esto debe tenerse en cuenta de que estas geoformas, aun en la

actualidad, siguen siendo afectadas tanto por la “neotectónica” como por los agentes erosivos (Robertson, 2007 como lo cita el IDEAM, 2013).

El avance y uso de los SIG, y las herramientas de sensores remotos han permitido una mayor implementación de la cartografía geomorfológica en la evaluación de amenazas geológicas, particularmente de procesos denudativos como los movimientos en masa (SGC, 2012). Es por esto que, para un área determinada, la elaboración de un mapa geomorfológico a su respectiva escala de trabajo se ha vuelto un insumo clave para la zonificación de amenazas y susceptibilidad a movimientos en masa, ya que proporciona información como las formas, materiales, origen y evolución de los procesos que le han dado forma al terreno. Con esto se tienen las herramientas necesarias para hacer predicciones acerca del comportamiento de la superficie: información necesaria para la elaboración de documentos como el Plan de Ordenamiento Territorial, Planeación de Desarrollo y de Gestión de Riesgo (SGC, 2013).

A pesar de que entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y particularmente, el Servicio Geológico Colombiano, han desarrollado y puesto a disposición del público metodologías para la elaboración de mapas de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa a escalas regionales (1:1'500.000 en el año 2001; 1:500.000 en el año 2009 y 1:100.000 en el año 2013) (acorde al SGC, 2013), aún no ha sido propuesta una guía metodológica para la confección de mapas a escala regional (1:25.000). Es por esta razón que el presente proyecto de investigación, además de la generación del mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa, tiene como objetivo servir como base para la preparación de una futura guía metodológica para la fabricación de este tipo de documento, a la respectiva escala.

Para la elaboración del mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa, a escala 1:25.000, basados en la guía metodológica elaborada por el SGC (2013), se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

**5.7.1. Morfometría.** Acorde a Bloom (1998 p. 233) es la medición y el análisis matemático de varios parámetros de una geoforma, para tratar de establecer relaciones cuantitativas entre las geoformas y los procesos que les dieron origen. De acuerdo al SGC (2012) involucra aspectos como la longitud, área, forma y pendiente del terreno.

El SGC (2012) describe que los componentes de Morfometría a evaluar en un mapa geomorfológico a escala 1:100.000, en el terreno, son: relieve relativo, inclinación, longitud y forma de la ladera (pendientes), patrón de drenaje y forma de crestas y valles. A su vez, esta misma entidad propone, para la elaboración de mapas de amenaza y susceptibilidad a movimientos en masa, a escala 1:100.000, que se usen los atributos de Morfometría: Pendiente, Acuenca y Rugosidad (SGC, 2013).

- Pendiente: Acorde al SGC (2013) es el ángulo existente entre el terreno y la horizontal. Puede representarse en porcentaje o en grados (variación entre 0-90). Entre mayor sea la pendiente, mayor será la susceptibilidad a movimientos en masa. Los valores de Pendiente fueron calculados para el trabajo a escala 1:25.000 a partir del DEM.
- Acuenca: Conocida también como “área de la cuenca”, es el resultado del producto de dos parámetros: el área del pixel y el valor de “flujos acumulados”. El término de “flujos acumulados” corresponde a la sumatoria, en una celda determinada, de todas las celdas cuyo flujo de agua va en dirección pendiente abajo hacia ellas (SGC, 2013). El valor de Acuenca está relacionado con la capacidad de recoger e infiltrar agua en el terreno: por lo tanto, a mayor

magnitud de esta, mayor será la susceptibilidad a movimientos en masa. Los valores de Acuenca fueron calculados para el trabajo a escala 1:25.000 a partir del DEM.

- **Rugosidad:** La rugosidad es la variación de la pendiente en el terreno de un área (SGC, 2013). Acorde a Felicísimo (1992) (como lo citan en el SGC, 2013), este parámetro define bien los límites de taludes y laderas. Entre mayor sea la variación de la pendiente en las laderas, mayor capacidad de infiltración de agua en el talud, lo que favorecerá la susceptibilidad a movimientos en masa. Se mide por la desviación del vector normal a la superficie en cada una de las celdas. Los valores de Rugosidad fueron calculados para el trabajo a escala 1:25.000 a partir del DEM.

**5.7.2. Curvatura.** Acorde al IDEAM (2012), es el grado de concavidad y/o convexidad del terreno, medido en dirección de la máxima inclinación (o pendiente). Se deriva del Modelo Digital de Elevación (DEM) y se calcula gracias al radio de curvatura de la celda, según un plano vertical. Está relacionada con la capacidad del terreno para concentrar o escurrir la mayor cantidad de agua en la ladera: razón por la cual contribuye a la susceptibilidad a procesos denudativos (IDEAM, 2012)

**5.7.3. Morfogénesis.** Acorde al SGC (2012), la Morfogénesis describe el origen del paisaje; es decir, las causas y procesos que modelaron el terreno para dar ese resultado final. Tiene en cuenta tanto los procesos endógenos que formaron el relieve, como los procesos exógenos que lo han modificado, en diferentes proporciones e intensidades a lo largo del tiempo geológico. “La información morfogenética es representada en forma de unidades geomorfológicas” (como lo cita el SGC, 2013 p. 61), y es un factor importante a tener en cuenta para la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que permite calificar cada unidad geomorfológica- de acuerdo a su posible contribución a la inestabilidad de los

taludes- en función de atributos como sus procesos genéticos, el modelado del relieve y su ambiente de formación (SGC, 2013). Las unidades morfogénicas usadas en este proyecto de investigación, fueron tomadas ANEXO A “*Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas*” del documento “*Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2012), a escala 1:100.000. Sin embargo, fueron adecuadas y adaptadas exitosamente a la escala de trabajo.

**5.7.4. Morfodinámica.** Acorde al SGC (2012), es la parte de la Geomorfología que estudia los procesos geodinámicos externos (o exógenos); principalmente denudativos. Estos procesos, causados por los llamados “agentes morfodinámicos”, como el agua de escorrentía, las olas, los glaciares y el viento, son los responsables del modelado del relieve y de su configuración actual. Es importante para la evaluación de la susceptibilidad a procesos denudativos y de erosión, debido a que permite conocer cómo es la evolución de estos en un área determinada, y posibilita la toma de decisiones en el futuro. Otros atributos a tener en cuenta para la elaboración de un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, aparte a los relacionados a criterios geomorfológicos, son:

**5.7.5. Geología.** En el presente trabajo, el mapa de unidades geológicas fue caracterizado a partir de la combinación de dos tipos de calificaciones, previamente hechas, para cada una de las unidades rocosas en términos de su susceptibilidad. Estas fueron:

- Resistencia: Acorde al SGC (2013) es la capacidad de los cuerpos rocosos de soportar la deformación (e.g. compresión, impacto y penetración por otras unidades rocosas) y que está en función de la composición química y las propiedades mineralógicas de los materiales que las componen. Para la evaluación de la resistencia en los mapas de susceptibilidad a movimientos en

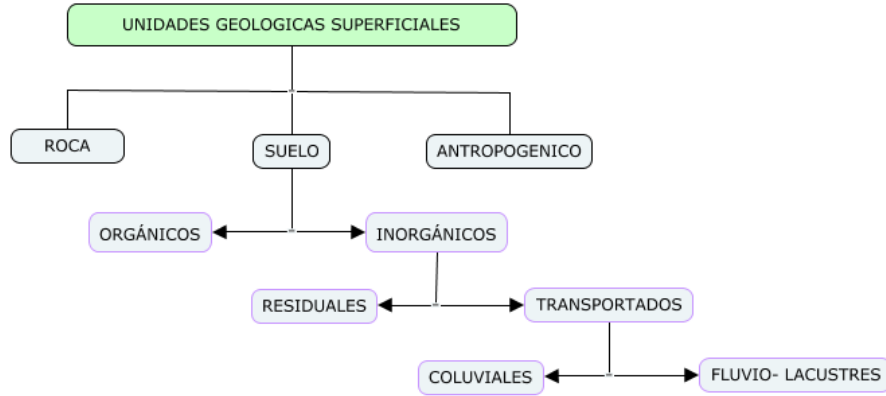
masa a escala 1:100.000, se usa la tabla de resistencia a la compresión simple de Hoke (1996) (como lo cita el SGC, 2013). A mayor resistencia a la deformación simple de un volumen de roca, menor será la susceptibilidad a movimientos en masa.

- Textura: Corresponde a los aspectos geométricos que están presentes en la roca, como el tamaño y la forma de los granos o cristales. Para la evaluación de la textura en los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:100.000, se usa la calificación propuesta por el SGC (2013).

**5.7.6. Densidad de fracturamiento.** Acorde al IDEAM (2012) corresponde a la distribución de las discontinuidades estructurales y/o mecánicas de las rocas, en el terreno. Es importante para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa, debido a que las zonas de mayor deformación tectónica; es decir, con presencia de fallas geológicas y plegamientos, son más propensas a experimentar inestabilidad de sus laderas.

**5.7.7. Unidad Geológica Superficial.** El factor “Unidad Geológica Superficial” (UGS) corresponde a la expresión en el terreno de las unidades de suelo, y varía según el grado de meteorización de este. El Semillero de Geomorfología de la Universidad Industrial de Santander propone un sistema de clasificación (Figura 19), debido a que considera la variable UGS como un atributo importante a tener en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, en mapas a escala 1:25.000. Como se muestra en la Figura 19, el sistema propone que las unidades geológicas superficiales se clasifiquen en tres grupos: Roca, Antropogénica y Suelos. El último, a su vez, se divide en Orgánicos e Inorgánicos. El grupo Inorgánicos se divide en Residuales y Transportados. Finalmente, el Grupo Transportados se divide en Coluviales y Fluvio-lacustres.

**Figura 18. Sistema de clasificación de Unidad Geológica Superficial, propuesto por el Semillero de Geomorfología de la Universidad Industrial de Santander.**



Fuente: Elaborada durante el presente trabajo de investigación.

## 5.8. MOVIMIENTOS EN MASA

Son movimientos hacia abajo y hacia afuera de materiales (*i.e.* rocas, suelos, detritos o una combinación de los tres) formadores de talud (Cruden & Varnes, 1996). Acorde al Proyecto Multinacional Andino (PMA: GCA, 2007), son procesos denudativos que modelan la superficie de la tierra. Dependen no sólo de factores geológicos, sino también hidrometereológicos, físicos y químicos entre la corteza terrestre, la atmósfera y la hidrosfera. Además de ocurrir en áreas montañosas, los movimientos en masa también lo pueden hacer en sitios de bajo relieve; por ejemplo, en excavaciones para carreteras y edificaciones, y fallas en taludes asociados a minas a cielo abierto y canteras (Cruden & Varnes, 1996).

En la literatura científica se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa, y la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales y el modo de movimiento (PMA: GCA, 2007); sin embargo, también pueden incluir factores como el grado de deformación interna del material, el grado de saturación, la rata

del movimiento, y el contenido de agua, aire o hielo del material (PMA: GCA, 2007; Cruden & Varnes, 1996). Los sistemas de clasificación de movimientos en masa más usados son los de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) como lo cita el (PMA: GCA, 2007). La primera tiene en cuenta cinco tipos: Caída, Vuelco, Deslizamiento, Propagaciones y Flujos. En la Figura 20 se muestra un sistema de clasificación elaborado por el PMA: GCA (2007), a partir de la revisión bibliográfica de la documentación más importante acerca de movimientos en masa, en habla hispana e inglesa. Es importante anotar que esta clasificación, a diferencia de la Varnes (1978) (en Cruden & Varnes, 1996) ubica a los movimientos de Reptación (*Creep*) en un grupo independiente; mientras que la anterior lo posiciona dentro de los movimientos de Flujo.

**Figura 19. Clasificación de movimientos en masa según el Proyecto Multinacional Andino (PMA: GCA, 2007). A diferencia del sistema de clasificación de movimientos en masa de Varnes (1978) (en Cruden & Varnes, 1996), este considera a los movimientos de Reptación como independientes de los de Flujo**

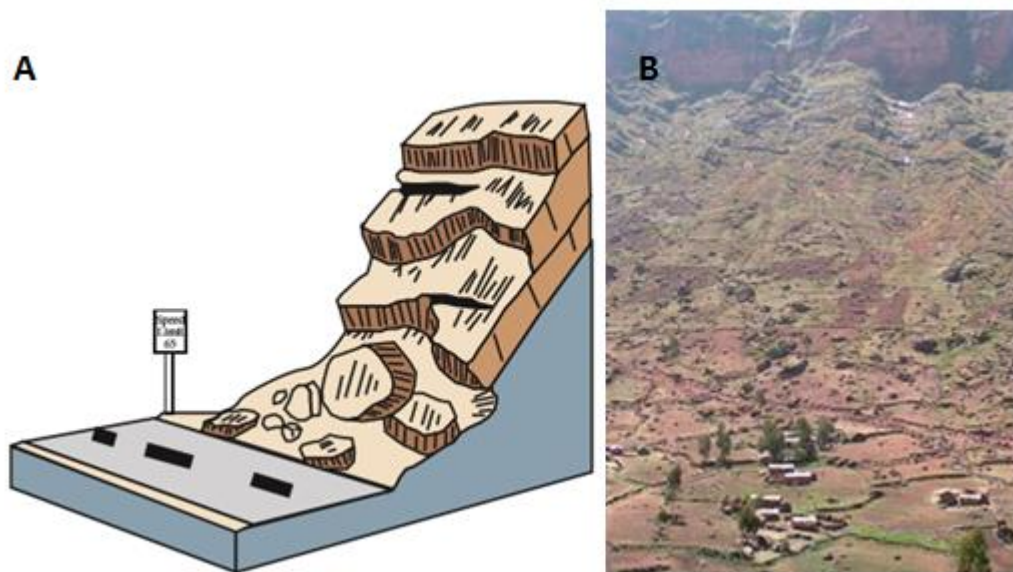
<b>Tipo</b>	<b>Subtipo</b>
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

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

**5.8.1. Caída (Fall).** Son movimientos abruptos de materiales geológicos que se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de la superficie de esta haya un desplazamiento cortante apreciable (PMA: GCA, 2007). El movimiento ocurre por caída libre, rebote (*bouncing*) y rodamiento (*rolling*) (Cruden & Varnes, 1996). El

material puede ser suelo o roca, y acorde a Cruden & Varnes (1996) (en PMA: GCA, 2007) las caídas tienen velocidades que van desde muy rápidas a extremadamente rápidas (*i.e.* mayor a  $5 \cdot 10^1$  mm/s). A diferencia de fenómenos como los flujos, el movimiento de caída no es masivo: esto quiere decir que no hay interacción mecánica entre varios fragmentos en movimiento, a pesar de que pueda haberla entre fragmentos individuales a lo largo de una trayectoria (PMA: GCA, 2007). En la Figura 21 se muestra un dibujo esquemático y una foto.

**Figura 20. A) Dibujo esquemático de una caída de roca. B) Fotografía de un movimiento de caída en la comunidad Chullpa Khasa, Provincia de Ayopaya, Departamento de Cochabamba, Bolivia.**

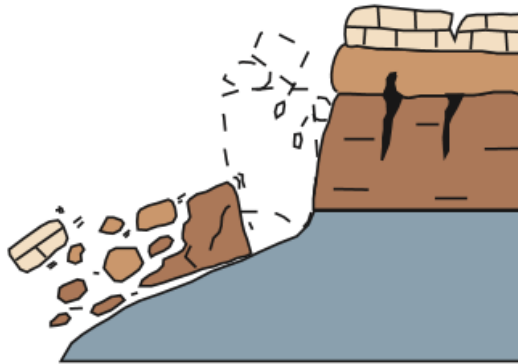


Fuente: A) Tomada y modificada de Cruden & Varnes (1996); B) Tomada y modificada de PMA: GCA (2007).

**5.8.2. Volcamiento (Topples).** Es un movimiento caracterizado por la rotación de una o más unidades alrededor de un eje de pivote; el cual se encuentra por debajo de esta(s) (Cruden & Varnes, 1996). Puede producirse ya sea por la acción de la gravedad, fuerzas ejercidas por los empujes de las unidades adyacentes o por la

presión de fluidos en grietas (PMA: GCA, 2007). Acorde al PMA: GCA (2007) pueden ser de tres tipos: en bloque, producido por la pérdida de estabilidad en roca relativamente competente y posterior rotación de bloques a partir de un punto en su base; flexural, que involucra roca más frágil y que se desencadena por el doblamiento de columnas de rocas más delgadas y, finalmente, de vuelco flexural de macizo rocoso, que se da a gran escala y está asociado a estratos densamente diaclasados y con buzamientos altos (Figura 22).

**Figura 21. Dibujo esquemático de un Volcamiento**



Fuente: Tomada y modificada de Cruden & Varnes (1996).

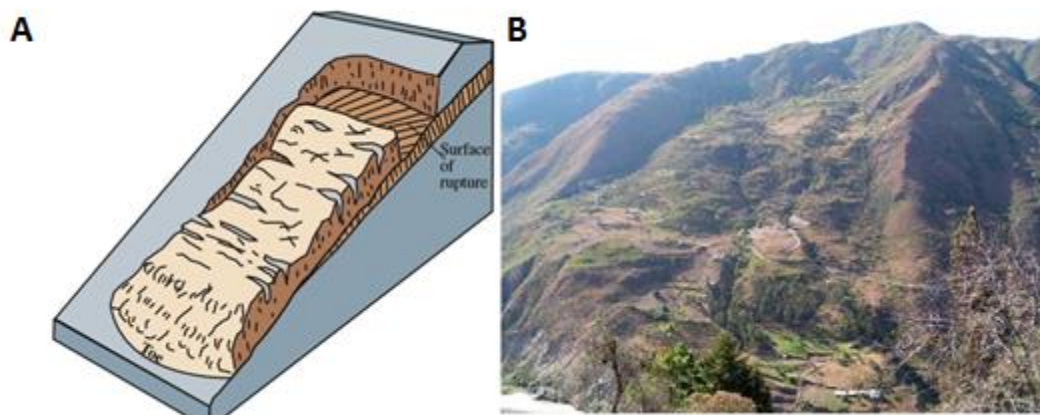
**5.8.3. Deslizamiento (Slide).** Es un tipo de movimiento en masa en el que el material que se desliza, está separado de un material infrayacente -más estable- por una zona de debilidad distintiva (Cruden & Varnes, 1996). El desplazamiento ocurre a lo largo de una superficie de ruptura, o de una zona delgada donde ocurre una gran deformación cortante (PMA: GCA, 2007) (Figura 23). Varnes (1978) (en PMA: GCA, 2007) los clasifica de acuerdo a la forma de superficie de falla en dos tipos:

- **Traslacionales:** La masa del movimiento se desplaza por una superficie plana (e.g. diaclasas o planos de estratificación). Suelen ser más superficiales que los rotacionales. Su ocurrencia se favorece cuando la dirección de la

discontinuidad es paralela a la del talud. Su velocidad puede variar desde rápida a extremadamente rápida (PMA: GCA, 2007).

- Rotacionales: La masa del movimiento se desplaza por una superficie de falla curva y cóncava hacia arriba (Cruden & Varnes, 1996). El movimiento del deslizamiento se da a lo largo de un eje paralelo a la superficie del suelo, y es de carácter rotacional (Cruden & Varnes, 1996). Acorde a PMA: GCA (2007) es característica en su morfología la presencia de un escarpe principal conectado por un contrapendiente con la superficie de la cabeza. A diferencia de los deslizamientos traslacionales, las velocidades son menores a 1m/s

**Figura 22. A) Dibujo esquemático de un deslizamiento traslacional; B) Fotografía de un deslizamiento rotacional en el Cerro Mizhquiyacu, Ecuador.**

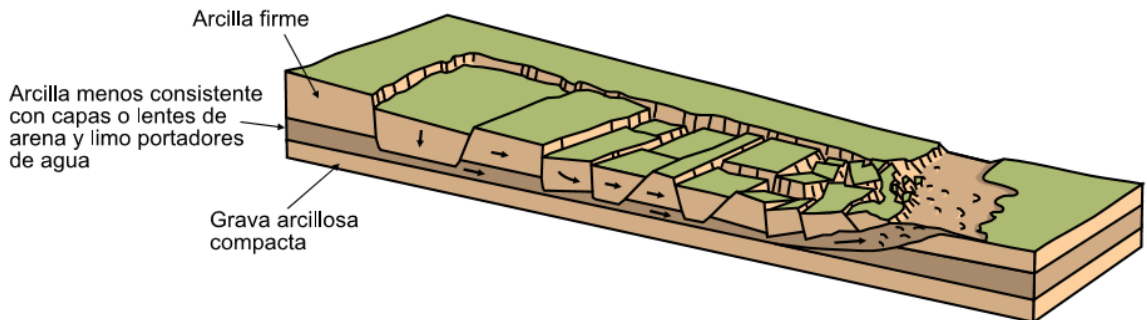


Fuente: A) Tomada y modificada de Cruden & Varnes (1996); B) Tomada y modificada de PMA: GCA (2007).

**5.8.4. Propagación lateral (Lateral spread).** Se diferencian de otros tipos de movimiento porque ocurren predominantemente por deformación interna de material (i.e. expansión) (en PMA: GCA, 2007), además del hecho de que ocurren en pendientes suaves o terrenos planos (Cruden & Varnes, 1996).

Acorde a Varnes (1978) (en PMA: GCA, 2007) hay dos tipos de propagación lateral: una en la que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla (típico de masas rocosas) y otro que ocurre en suelos cohesivos, que suprayacen a materiales que han experimentado licuefacción o materiales en flujo plástico. En los primeros, los estratos superiores se pueden fracturar y separar en bloques; luego el material blando fluye hacia las grietas entre los bloques, siendo el movimiento extremadamente lento. En cambio, en los segundos el movimiento es extremadamente rápido y peligroso (inducido por terremotos) (Figura 24).

**Figura 23. Ilustración de un movimiento de Propagación Lateral, en un entorno donde un suelo cohesivo (Arcilla firme) suprayace a material de menor consistencia**



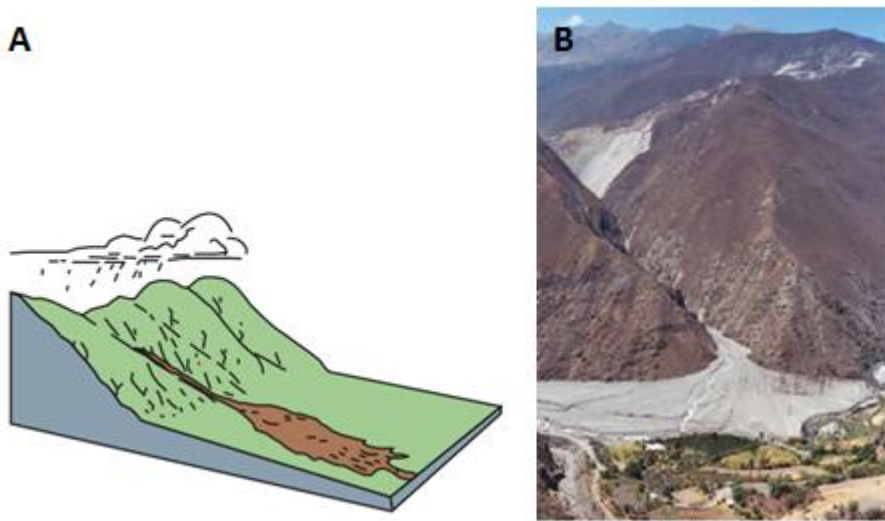
Fuente: (Tomada y modificada de PMA: GCA, 2007).

Flujo (Flow): Son movimientos cuyo desplazamiento exhibe el comportamiento de un fluido. Su velocidad y grado de saturación son variables. En muchos casos se originan a partir de un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978) (como lo citan en PMA: GCA, 2007) (Figura 25)

Los flujos se han clasificado en función de diferencias entre algunas de sus propiedades, como materiales de composición, velocidad de desplazamiento, humedad y confinamiento lateral. En publicaciones como la de Hungr et al. (2001)

(en PMA: GCA, 2007), la descripción de los principales tipos de Flujo está basada en los sistemas de clasificación como las de (Varnes, 1978; Hungr et al; 2001; Hungr, 2005) (como lo citan en PMA: GCA, 2007). En ellas, resaltan la importancia de que se haga la distinción entre los tipos de Flujo, ya que cada clase tiene un potencial destructivo diferente que hace que se deba estudiar la amenaza asociada a ellos de forma distinta.

**Figura 24. A) Dibujo esquemático de un Flujo de Detritos.; B) Fotografía de un Flujo de Detritos, en la Cuenca del Río Checas, Perú.**

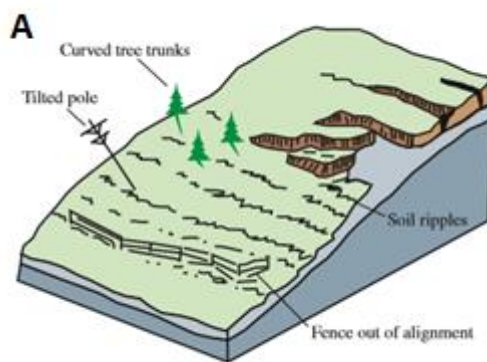


Fuente: A) Tomada y modificada de Cruden & Varnes (1996); B) Tomada y modificada de PMA: GCA (2007).

**5.8.5. Reptación (Creep).** Son movimientos del terreno donde no se distingue una superficie de falla; caracterizados por ser lentos e imperceptibles. Se producen por un esfuerzo de cizalla lo suficientemente fuerte como para producir deformación permanente, pero sin dar paso a la fractura por cizalla (Cruden & Varnes, 1996). Pueden ser de dos tipos: Estacionales, cuando están asociados a cambios climáticos o de humedad en el terreno, o verdadera, cuando el

desplazamiento ocurre relativamente lento en el tiempo (PMA: GCA, 2007). Se pueden identificar por la presencia de árboles torcidos, vallas dobladas y óndulas y crestas en el suelo (Cruden & Varnes, 1996) (Figura 26).

**Figura 25. A) Dibujo esquemático de un movimiento de Reptación; B) Fotografía de un movimiento de Reptación de una ladera, compuesta por esquistos cloríticos meteorizados del Grupo Cajamarca, carretera Ibagué, Armenia.**



Fuente: A) Tomada y modificada de Cruden & Varnes (1996); B) Tomada y modificada de PMA: GCA (2007).

## 6. MARCO GEOLÓGICO

El área de la plancha 136-I-B está ubicada en la parte oriental del departamento de Santander, en el área de la Provincia de García Rovira. Fisiográficamente está localizada en la Cordillera Oriental, en la región meridional al Macizo de Santander. Estratigráficamente, la región es representativa de la transgresión de la base del Cretácico sobre el Macizo de Santander (Vargas *et al*; 1981). En ésta, afloran la Formación Floresta (del Devónico), Cuarzomonzonita de Santa Bárbara del Jura- Triásico, la Formación Girón del Jurásico, y las formaciones Rio Negro, Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho, La Luna y Colón-Mito Juan, del Cretácico Temprano. Tectónicamente acorde a Julivert (1960), el área se caracteriza por un “estilo tectónico de plegamiento y fractura (...)” (p.29); y “pliegues por lo general poco apretados aun cuando se presentan pocas inversiones (...)” (p.29) que, combinados y que junto a la aparición de replegamientos le dan una cierta complicación al estudio de ésta (Julivert, 1960). Como estructuras más sobresalientes, están la Falla del Servitá y el Sinclinal de Málaga

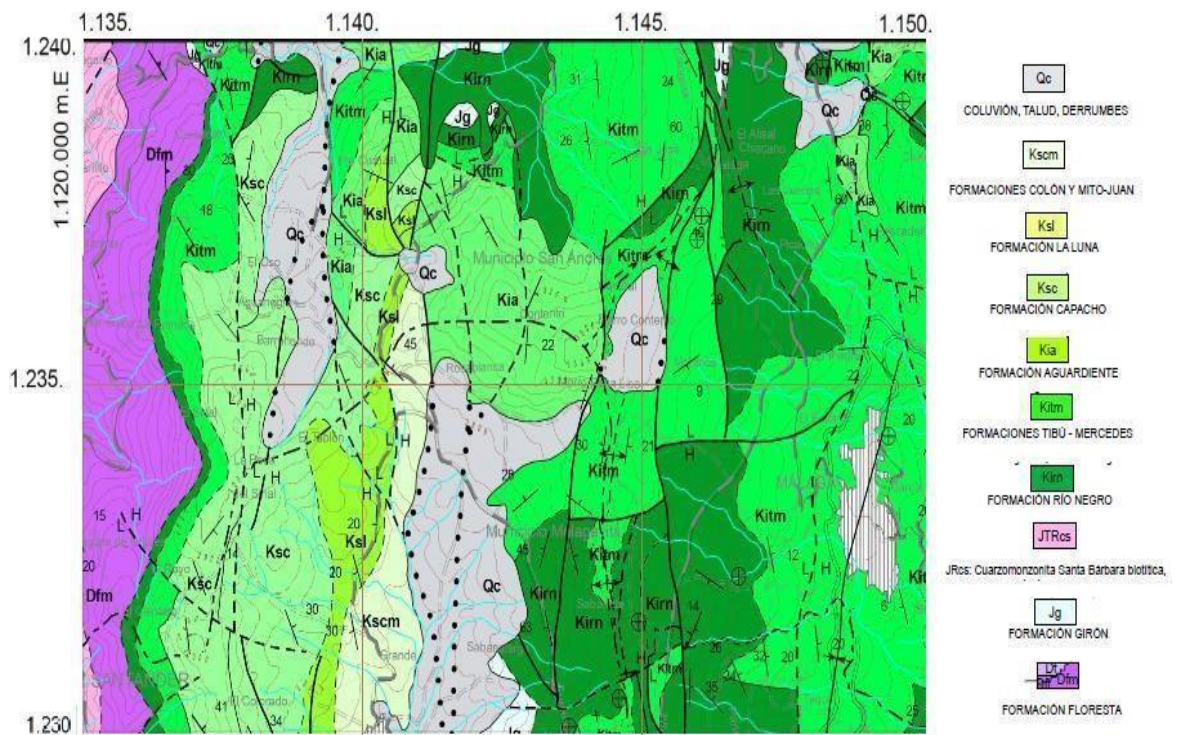
### 6.1. ESTRATIGRAFÍA

Las unidades estratigráficas que se encuentran en la plancha 136-I-B comprenden rocas ígneas y sedimentarias con edades que van desde el Devónico hasta el Cretácico, así como sedimentos del Cenozoico. La secuencia sedimentaria suprayace a rocas metamórficas que hacen parte del macizo de Santander de edad pre-devónica. (Figura 27)

La secuencia sedimentaria, de la más antigua a la más reciente, en el área de estudio viene dada de la siguiente manera: (Dfm) Formación Floresta, (JTRcs)

Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, (Jg) Formación Giron, (Kirn) Formación Rio Negro, (Kitm) Formación Tibú-mercedes, (Kia) Formación Aguardiente, (Ksc) Formación Capacho, (Ksl) Formación La luna, (Kscm) Formación Colon-Mito juan y (Qc) Coluvion, talud, derrumbes. Las discontinuidades presentes en el registro estratigráfico son dos: Una entre las formaciones Floresta y Girón y la otra entre las formaciones Girón y Rio Negro (Tabla 3).

**Figura 26. Mapa geológico de la zona de estudio.**



Fuente: Tomada parcialmente de Vargas *et al.* (1984).

**Tabla 4. Secuencia sedimentaria de las unidades estratigráficas, en el área de estudio.**

<b>PERIODO</b>	<b>UNIDAD ESTRATIGRÁFICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>AUTOR</b>
<b>Cuaternario</b>	Aluviones y Coluviones	fragmentos de roca heterométricos de diferente tamaño y composición mineralógica	
<b>Cretácico Tardío</b>	Formación Colón-Mito Juan:	Lodolitas grises oscuras a negras, ricas en foraminíferos, piritosas, levemente calcáreas, y algunas capas de calizas lumaquéllicas (Royero & Clavijo, 2001)	(Liddle, 1928) (como se citan en Vargas <i>et al</i> ; 1981)
			(Hedberg & Sass, 1937; p.81-82) (como se citan en Richards, 1968).
			(Notestein <i>et al</i> ; 1944) (como se citan en Royero & Clavijo, 2001). Sutton (1946) Richards (1968)
<b>Cretácico Tardío</b>	Formación La Luna:	Calizas y lutitas calcáreas fértidas, con abundante materia orgánica, en paquetes delgados de color gris oscuro a negro (como aparece citado en el Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela, en [ <a href="http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm">http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm</a> ])	(Garner, 1926; Hedberg & Sass, 1937) (como se citan en [ <a href="http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm">http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm</a> ])
			(Notestein <i>et al</i> ; 1944) (como se citan en Vargas <i>et al</i> ; 1981),
<b>Cretácico Temprano</b>	Formación Capacho:	Calizas de colores gris oscuro, intercalada con shale negro, calcáreo; shale calcáreo y micáceo, de colores gris oscuro a negro, intercalado con calizas; coquinas masivas, intercaladas con shale parcialmente calcáreo, de color gris oscura a negro. Acorde a Renz (1959) (como aparece en	(Sievers, 1888; Notestein <i>et al</i> ; 1944; Sutton, 1946; Rod & Maync, 1954; Renz, 1959) como se citan en Richards (1968).

PERIODO	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	AUTOR
		Richards, 1968)	
Cretácico Temprano	Formación Aguardiente:	Areniscas calcáreas, de color gris a verde claro, de grano fino a grueso, localmente glauconíticas, con estratificación cruzada e intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas. (acorde a la información encontrada en el Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela, en [http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm])	Sutton (1946)  (Notestein <i>et al</i> ; 1944) (como se citan en [http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm])
Cretácico Temprano	Formación Tibú-Mercédes:	Calizas grises, cristalinas y muy fosilíferas; intercalaciones entre calizas bioclásticas, de color marrón a gris, con shale negro físil (Richards, 1968).	(Sievers, 1888; Notestein <i>et al</i> ; 1944) (como se citan en el Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela, [http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm]). Richards (1968).
Cretácico Temprano	Formación Rio Negro:	Areniscas arcósicas de grano grueso, con lentes de conglomerados tamaño guijarro. En el área de la Concesión Barco, consta de arenisca cuarzosa conglomerática, de color gris, con tamaño de grano variable y parcialmente calcárea (Richards, 1968).	(Richards, 1968)  (Hedberg, 1931) (como se cita en Vargas <i>et al</i> ; 1981)  (Hedberg & Sass, 1937; Sutton, 1946; Miller, 1962) (como se citan en Richards, 1968)

PERIODO	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	AUTOR
Jurásico	Formación Girón:	Según Royero & Clavijo (2001) está compuesta por: "Areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm" (p.25).	Langenheim (1959) <hr/> (Hetner, 1892) como se cita en Vargas <i>et al.</i> (1981). <hr/> (Julivert, 1958; Navas, 1963 y Cediél, 1968) (como se citan en Vargas <i>et al.</i> (1981)
	Cuarzo-monzonita de Santa Bárbara	Unidad de cuarzomonzonita biotítica de grano grueso, inequigranular, de color rosado-naranja a gris violáceo, que constituye la masa principal del Batolito de Santa Bárbara. Contiene feldespatos potásicos de color rosado-naranja a rojo grisáceo; plagioclasa blanca, cuarzo gris y biotita (en porcentajes de 2-3%). Acorde a Ward <i>et al.</i> (1973)	Ward <i>et al.</i> (1973)
Devónico	Formación Floresta	Areniscas de color gris oscuro, ferruginosas y de grano fino, en 150 m de espesor; arcillas pizarrosas multicolores, con niveles fosilíferos hacia la parte superior, en	(Botero, 1959) como se cita en Vargas <i>et al.</i> (1981). (A.A Olson y T. Ramírez) como se cita en Vargas <i>et al.</i> (1981). (Caster, 1939) como se cita en Ward <i>et al.</i> (1973).

PERIODO	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	AUTOR
		500 m de espesor; paquete de arcillas pizarrosas de color negro, y areniscas de color gris claro y amarillo, de grano fino, en 30 m de espesor; y un conglomerado cuarzoso fino, de 30 m de espesor. Según Botero (1959) (en Vargas <i>et al</i> ; 1981)	(Cediél, 1969; Mojica & Villaroel, 1984) como se citan en Royero & Clavijo (2001).

## 6.2. GEOLOGÍA EN CAMPO

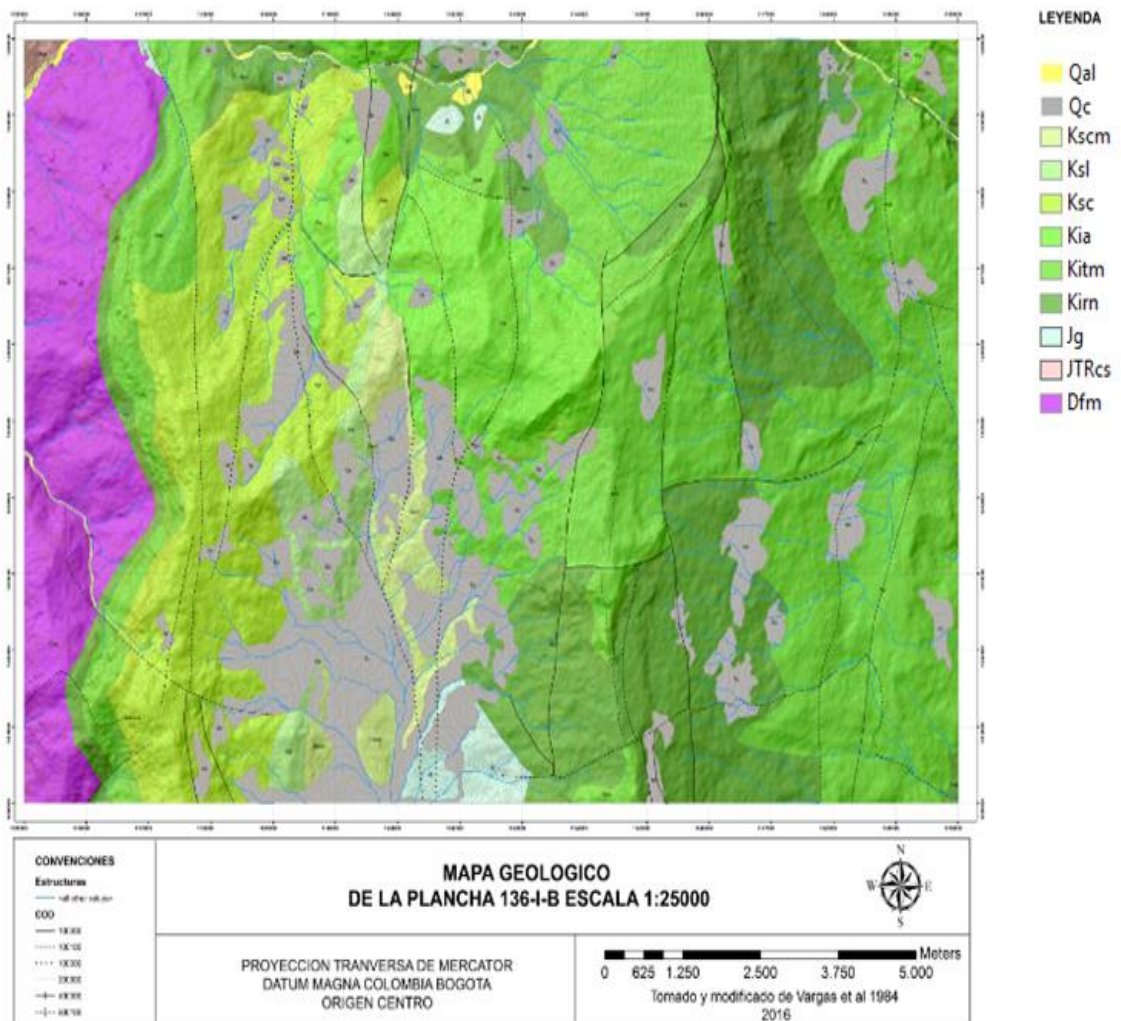
Los estudios de Geología son de suma importancia para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, ya que proporcionan información acerca de las estructuras, textura y composición de las unidades rocosas, y en la práctica, permiten hacer la delimitación entre contactos litológicos y de depósitos cuaternarios. Además de esto, son un complemento a los análisis geomorfológicos, ya que la toma de datos estructurales proporciona una buena herramienta para la elaboración del mapa de unidades morfogénicas.

En el presente trabajo, se realizó una cartografía a escala 1:25.000 mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales y un modelo digital de elevación (DEM), tomando como base la cartografía temática de la plancha 1:100.000, propuesta por Vargas *et al.* (1981).

El trabajo de campo consistió de la delimitación, y corroboración, de los diferentes contactos entre unidades geológicas, junto con la delimitación de los depósitos cuaternarios (Qc y Qal); esto con el objetivo de brindar un grado de mayor detalle

y, posteriormente, ingresarlo al Sistema de Lógica Difusa. Es importante resaltar que la caracterización de unidades no dio para la subdivisión de subunidades o miembros dentro de cada formación. A continuación, se observa el mapa geológico elaborado en campo con un grado de mayor detalle (Figura 28).

**Figura 27. Mapa geológico de la plancha 136-I-B a escala 1:25000.**



### **6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

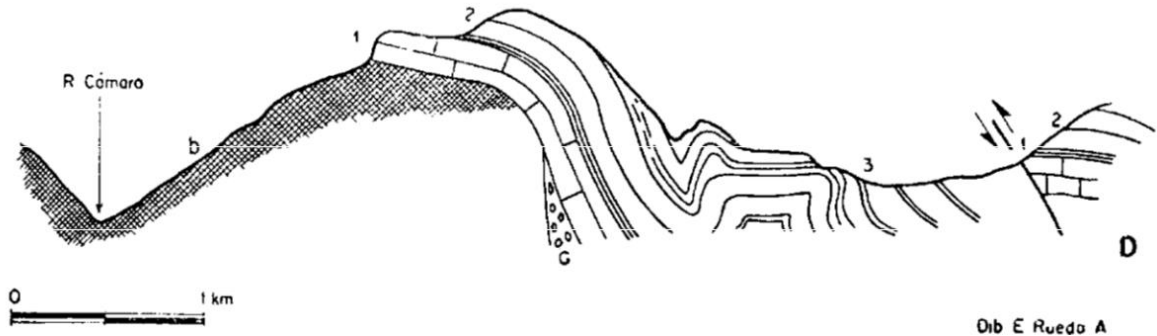
El área de estudio que abarca la sección de la Plancha 136-I-B, Málaga, a escala 1:25000 se ubica en la Provincia de García Rovira, en el departamento de Santander, Cordillera Oriental.

La Provincia de García Rovira está ubicada al E del borde oriental del Macizo de Santander. En el borde oriental, el basamento del macizo aflora debido a la erosión de la secuencia mesozoica. Sin embargo, acorde a Julivert (1960) en el sector en que el Chicamocha atraviesa el macizo, este adquiere una significación tectónica, representada como un pliegue de fondo recubierto por la Formación Girón y el Cretácico.

Esta provincia está recorrida por los ríos Guaca (o Cámara) y Servitá: estos corren en sentido N-S, y forman los valles con el mismo nombre. Los valles ocupan una posición sinclinal y están separados por una zona anticlinal compleja (Julivert, 1960). Es así como se diferencian dos zonas sinclinales, al E y al W, separadas por una zona anticlinal en el borde oriental del Macizo; que según Julivert (1960) le imprimen un estilo tectónico muy diferente a la parte occidental de este.

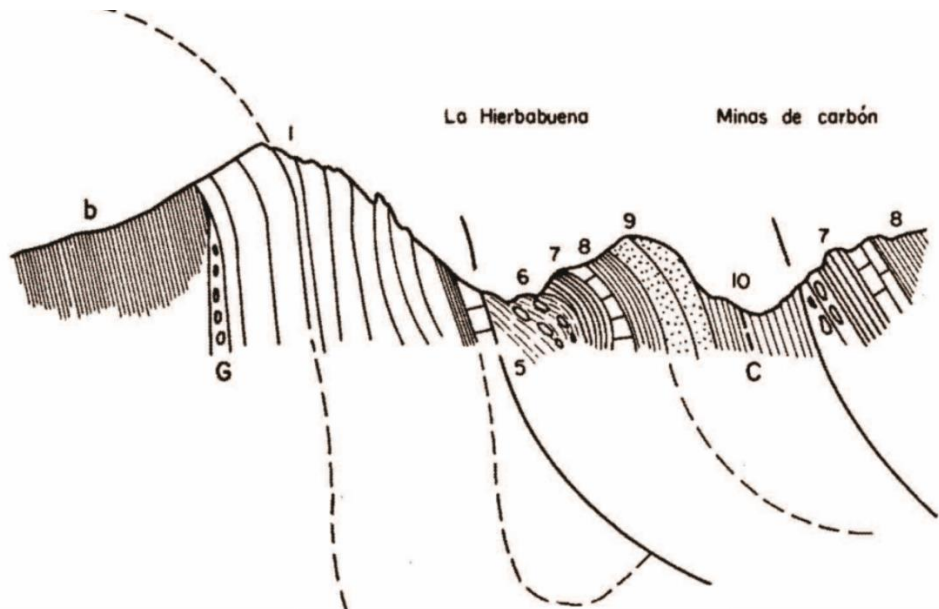
La zona sinclinal recorrida por el río Guaca (o Cámara), que comprende a los municipios de Guaca, San Andrés y Molagavita, limita al W con el Macizo y al E con un Sistema de Fallas inversas que hacen aparecer la unidad Girón. Está caracterizado porque la secuencia cretácica está replegada y fracturada, pudiéndose ver en áreas como la margen derecha del Río Congreso y en las minas de carbón de Molagavita (Julivert, 1960) (Figura 29 y Figura 30).

**Figura 28. Corte por la vertiente S del río Congreso. En este se muestran algunas características de la zona sinclinal en la que está localizada el Valle del río Guaca: b representa el basamento del Macizo de Santander; c representa la Formación Girón y 1, 2 y 3 representan paquetes rocosos de la secuencia cretácica que aflora.**



Fuente: Tomada de Julivert (1960).

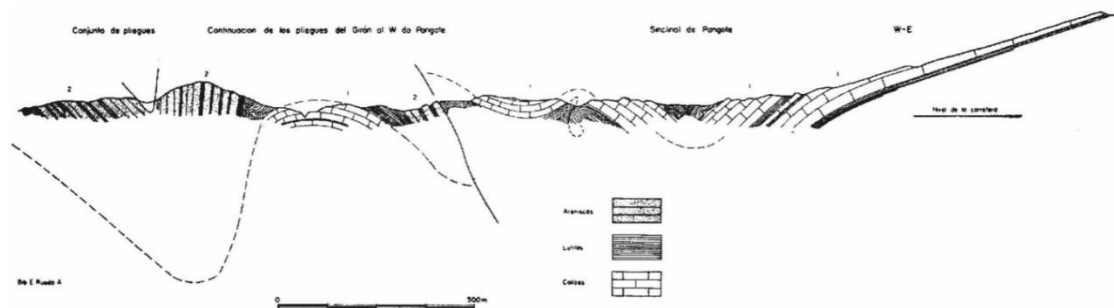
**Figura 29. Corte en la zona de Molagavita: b representa el basamento del Macizo de Santander; G representa la Formación Girón y los números 1-8, la secuencia del cretácico que aflora en las Minas de Carbón.**



Fuente: Tomada de Julivert (1960).

La zona divisoria anticlinal, que se encuentra entre las dos zonas sinclinales limitándolas por medio de fallas, se extiende desde el Río Chicamocha hacia el S hasta llegar al Páramo del Almorzadero. Es un área elevada a modo de anticlinorio que a su vez está dividida en dos zonas: una occidental que está relacionada con las estructuras del área de Guaca-San Andrés, caracterizadas por pliegues apretados al W y la presencia del Sinclinal de Pangote al E; y una zona oriental, en la que el Sinclinal de Pangote es sucedido por un anticlinal asimétrico, y este a su vez, por un sinclinal que es cortado por la Falla de Miranda, estructura que limita esta zona con la del Valle de Servitá (como lo cita Julivert, 1960) (Figura 31).

**Figura 30. Esquema de la zona occidental de la zona divisoria anticlinal: hacia el W se tiene el conjunto de pliegues apretados, relacionados con el área de Guaca-Molagavita (zona divisoria del Valle del río Cámara); mientras que, hacia el E, se tiene el Sinclinal de Pangote.**



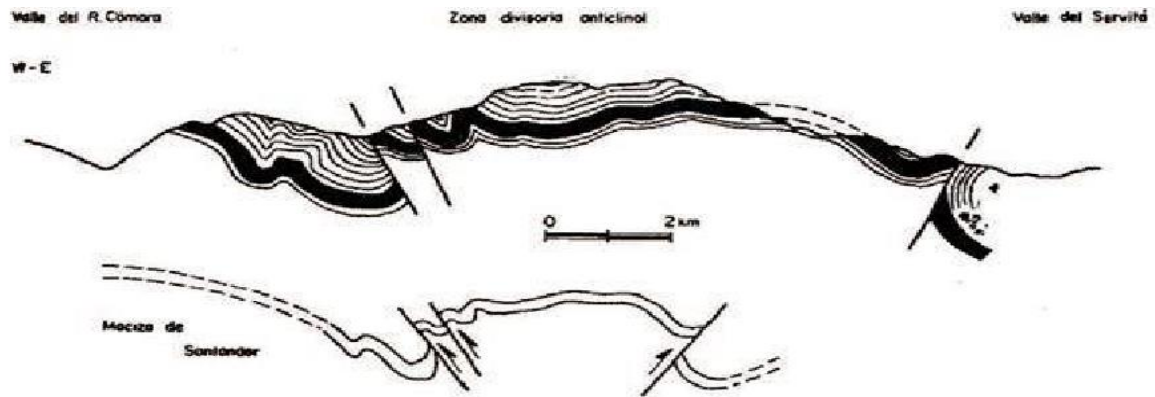
Fuente: Tomada de Julivert (1960).

Finalmente, la zona sinclinal que corresponde al Valle de Servitá, que limita al W con la Falla de Miranda. Julivert (1960) indica que sólo ha sido estudiada la zona al W del río Servitá, donde existen replegamientos locales y aparece casi toda la serie cretácica.

En resumen: la región se caracteriza por un estilo tectónico de pliegues poco apretados y fallas (Julivert, 1960 p.33). “La región estudiada está formada por dos

zonas en posición sinclinal, separadas por un área compleja, pero en conjunto con carácter anticlinal” (Julivert, 1960 p.30) (Figura 32).

**Figura 31. Representación esquemática de la geología estructural del área de García Rovira: dos zonas en posición sinclinal, separadas por un área de carácter anticlinal.**



Fuente: Tomada de Julivert (1960).

## **7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

La Geomorfología de la zona de estudio abarca diferentes unidades morfológicas en superficie, las cuales exhiben distintos factores topográficos y geométricos que integran un entorno geológico. Como se menciona en el SGC (2012), los procesos naturales encargados de construir y modificar el paisaje, se clasifican como endógenos y exógenos. Los periodos de intensidad, dinámicos a través del tiempo, de los procesos que actúan en la corteza modelan y dan forma a los diferentes elementos geológicos, formando así ambientes geológicos específicos.

Los atributos de Geomorfología tenidos en cuenta en la realización de este trabajo, para la generación de los diferentes insumos fueron Morfogénesis, Morfodinámica y la Morfometría

### **7.1. MORFOGÉNESIS**

La Morfogénesis es la rama de la Geomorfología que se encarga de estudiar y analizar el origen de cada una de las diferentes unidades geomorfológicas, correspondiendo a cada uno de los elementos básicos que componen el paisaje, los cuales están clasificados y definidos por criterios geométricos, genéticos y topográficos dependiendo de la intensidad y de los tipos de procesos que lo modelaron y le dieron forma al paisaje. A continuación, se muestra el área de estudio, y se ilustra cómo se clasificaron 4 tipos de ambientes diferentes (Denudacional, fluvial, estructural y antropogénico); obteniendo así, 170 polígonos agrupados en 31 geoformas diferentes, en un área de 150 km<sup>2</sup>, a escala 1:25.000 (Figura 33). Los ambientes con mayor cantidad de geoformas se muestran a continuación (Figura 34).

Figura 32. Mapa geomorfológico de la plancha 136-I-B a escala 1:25000.

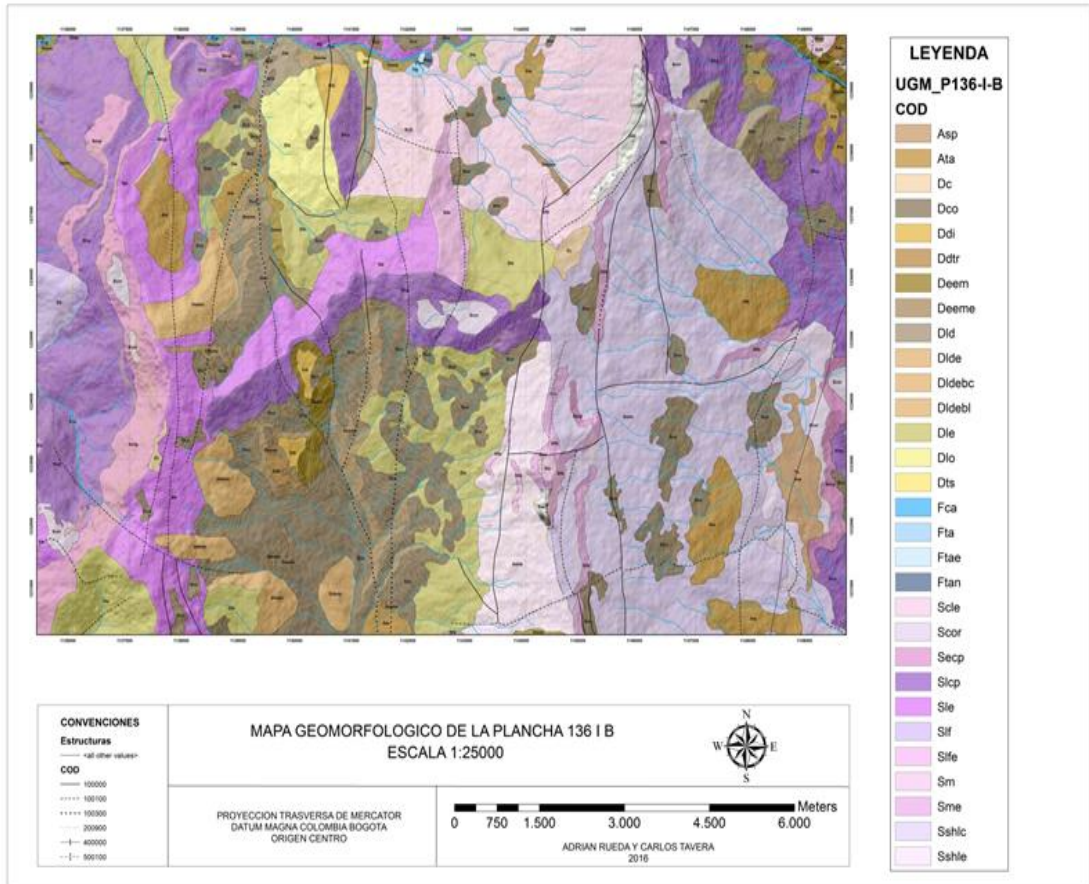
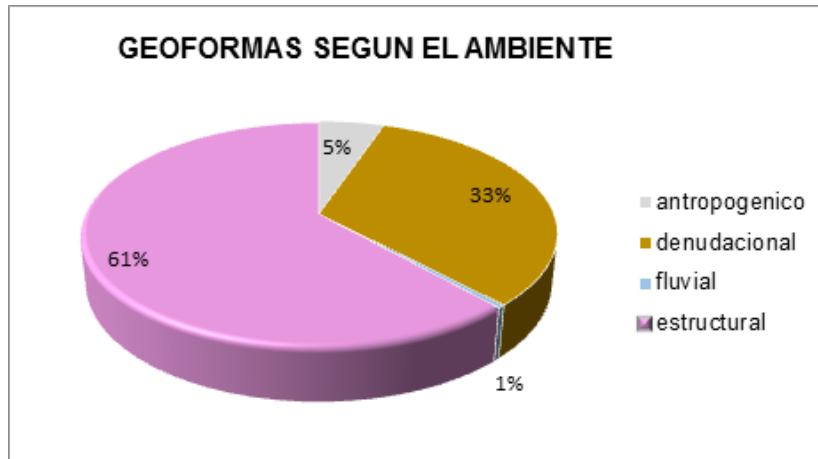


Figura 33. Diagrama circular donde se muestran el porcentaje de cada ambiente de formación según la cantidad de geoformas en el área de trabajo.



A continuación, se muestra cada una de las geoformas presentes en el área de estudio, asociadas a su ambiente junto con el área total que abarca en la zona (Tabla 4).

**Tabla 5. Geoformas presentes en el área de estudio (el área se encuentra representada en m<sup>2</sup>).**

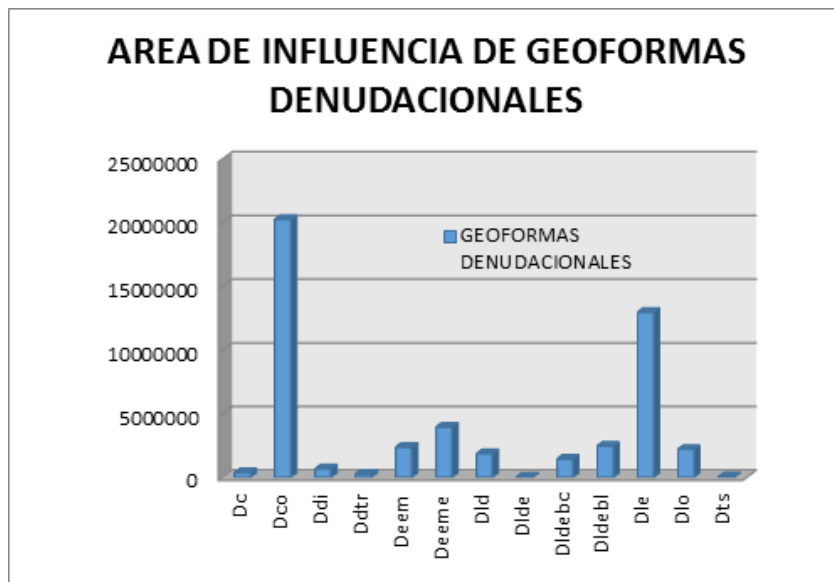
AMBIENTE	COD	UNIDAD	AREA EN METROS CUADRADOS [m <sup>2</sup> ]	
<b>ANTROPOGENICO</b>	Asp	superficies de explanación	1'330.261,7	
	Ata	terrazas agrícolas	6'529.111,6	
<b>DENUDACIONAL</b>	Dc	cima	384.544,7	
	Dco	cono o lóbulo coluvial o de solifluxión	20'270.366,1	
	Ddi	cono de deslizamiento indiferenciado	682.608,9	
	Ddtr	cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	272.762,6	
	Deem	eskarpe de erosión mayor	2'380.231,8	
	Deeme	eskarpe de erosión menor	3'966.486,6	
	Dld	loma denudada	1'866.772,1	
	Dlde	lomo denudado	46.972,0	
	Dldebc	lomo denudado bajo de longitud corta	1'463.595,4	
	Dldebl	lomo denudado bajo de longitud larga	2'486.496,1	
	Dle	ladera erosiva	12'982.912,4	
	Dlo	ladera ondulada	2'224.812,2	
	Dts	terrazas sobre elevadas	53.123,9	
	<b>FLUVIAL</b>	Fca	cauce activo	530.132,8
		Fta	terrazza de acumulación	56.544,6
Ftae		eskarpe de terraza de acumulación	27.872,4	
Ftan		terrazza de acumulación antigua	30.337,6	
<b>ESTRUCTURAL</b>	Scle	ladera estructural de cuesta	11'481.611,9	
	Scor	cornisa estructural	4'642.529,3	
	Secp	eskarpe contra pendiente	6'347.708,0	
	See	eskarpe estructural	654.779,0	

AMBIENTE	COD	UNIDAD	AREA EN METROS CUADRADOS [m <sup>2</sup> ]
	Slcp	ladera contrapendiente	24'045.198,9
	Sle	ladera estructural	12'274.029,1
	Slf	lomo de falla	1'440.677,3
	Slfe	escarpe de línea de falla	3'322.108,1
	Sm	meseta estructural	103.150,2
	Sme	escarpe de meseta	138.445,3
	Sshlc	ladera en contra pendiente de sierra homoclinal	23'097.264,1
	Sshle	ladera a favor de la pendiente de sierra homoclinal	4'769.123,8

## 7.2. GEOFORMAS DE TIPO DENUDACIONAL

Las geoformas de tipo denudacional están controladas principalmente por procesos exógenos, como lluvia y viento, que dan paso a la erosión, transporte y sedimentación, dándole forma al relieve. Dependiendo del grado de meteorización que esta presenta, puede generar laderas y depósitos, entre otras. Estas abarcan aproximadamente el 33% del área total, correspondiente a 49,8 km<sup>2</sup>. Las geoformas denudacionales con mayor área de influencia son los conos de solifluxión (Dco) y las laderas erosionadas (Del). A continuación, se muestra un histograma donde se agrupan en función del área (Figura 35). Se identificaron 105 geoformas asociadas a 13 unidades geomorfológicas.

**Figura 34. Área de influencia de las geofomas de tipo denudacional en la plancha 136-I-B.**

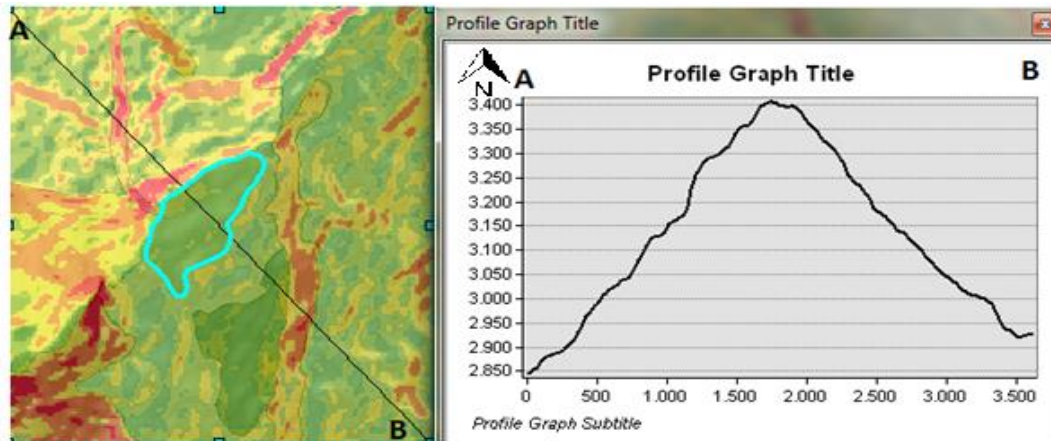


**7.2.1. Cima (Dc).** Superficie amplia, ubicada en la parte superior de la montaña, la cual exhibe un pendiente de plano a inclinado; limitada por laderas con inclinaciones más abruptas. Su origen está establecido por procesos de meteorización y erosión intensa.

En el área de estudio se observan 2 cimas: la primera de ellas ubicada hacia el nor-occidente del municipio de Málaga, con un área aproximada de 285 m<sup>2</sup>; y la segunda de ellas, hacia el nor-occidente del municipio de Molagavita, con un área aproximada de 13.700 m<sup>2</sup>.

Esta geofoma se presenta a 3200 msnm en un tipo de relieve montañoso, y un índice de relieve bajo, en una superficie plana. Generalmente, no presenta ningún tipo de canal, ni tampoco ningún patrón de drenaje. Se observa una cima localizada hacia el noroccidente del municipio de Málaga (Figura 36). La otra cima está ubicada hacia el nor-orienté del caserío de los Ortices, a 3000 msnm, con un índice de relieve bajo, y una ladera que va de plana, a ligeramente inclinada.

**Figura 35. Diagrama esquemático de una cima denudacional ubicada hacia el noroccidente de municipio de Málaga.**



**7.2.2. Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).** Estructura en forma alomada baja, relacionada con procesos de transporte y deposición. Su superficie está constituida por bloques y fragmentos heterométricos. En el área de estudio, en gran parte de la superficie se encontraba esta geoforma, más que todo hacia el sector sur, cubriendo el casco urbano del municipio de Molagavita y sus alrededores (Figura 37).

En el área de la plancha, se encuentran 58 conos o lóbulos coluviales y de solifluxión, con un área aproximada de 20,3 km<sup>2</sup>, ubicadas heterogéneamente en toda la región de trabajo. La mayoría de ellas se encuentran en la parte centro-sur, en las zonas de menor altura topográfica. Cabe resaltar que el municipio de Molagavita se encuentra sobre una de ellas, la cual está limitada hacia el occidente por una ladera estructural (Sle), y hacia el oriente por una ladera erosionada (Dle).

Los conos -lóbulos coluviales- se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno va de muy baja a baja, ya que al ser depósitos de fragmentos, el principal agente de transporte es la gravedad.

En la plancha 136-I-B, predomina en estas geoformas un tipo de relieve acolinado, con un índice de relieve bajo; una inclinación de la ladera que varía de inclinada a suave (entre los 5 y los 10 grados), y de longitud larga y forma convexa. Las características del drenaje de estas geoformas son principalmente en V cerrado, con una densidad moderada y una frecuencia alta. En la mayoría de estos conos, está desarrollado un patrón de drenaje detritico.

**7.2.3. Lomo desnudo bajo de longitud corta (Dldebc).** Son sistemas o conjuntos de lomos, ubicados a diferentes alturas (tomando como referencia el nivel base local), con índice de relieve relativo menor a 250 m y longitud del eje principal también menor a 250 m. Son geoformas alargadas, perpendiculares al drenaje principal. El eje del lomo puede indicar velocidades de los flujos que han modelado el paisaje. En campo, se encontró un sistema de lomos, los cuales en su mayoría se encontraban cubiertos por vegetación tipo pasto y rastrojo.

En el área de estudio, se encuentran 2 lomos desnudos bajos de longitud corta con un superficie aproximada de 1,5 km<sup>2</sup>, ubicados hacia el nor-oeste del casco urbano del municipio de Molagavita. Estos se encuentran en zonas donde predominan los conos o lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco), ubicados de manera paralela al sistema de drenajes.

Están ubicados donde la pendiente y la rugosidad del terreno son moderadas a inclinadas. También cabe resaltar que las formaciones que dan lugar a estas geoformas son las formaciones Capacho y Colón-Mito Juan.

Presentan un tipo de relieve acolinado, con un índice de relieve bajo; inclinación de la ladera muy abrupta (entre los 21 a 30 grados), junto con una longitud corta a moderadamente larga y una forma convexa. Las características del drenaje de estas geoformas son principalmente en “V cerrado”, con una densidad y frecuencia muy bajas.

Se observa un ambiente denudacional, en donde se ven un conjunto de geoformas denudacionales en las cercanías de Molagavita (Figura 37)

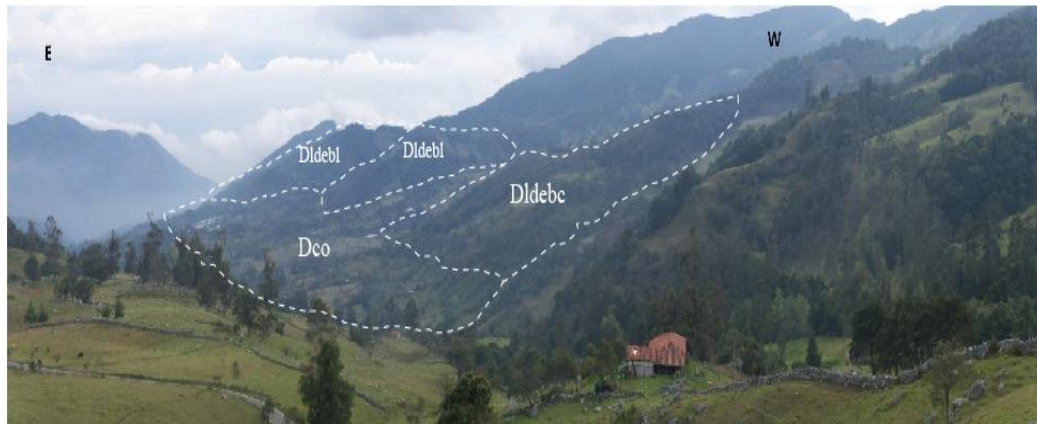
**7.2.4. Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl).** Al igual que el Dldebc, son conjuntos de lomos con un índice relativo menor a 250 m, y una longitud del eje principal mayor a 1000 m. Son geoformas alargadas, perpendiculares al drenaje principal. El eje del lomo es indicador de las velocidades de los flujos que han modelado el paisaje.

En el área de estudio, se encuentran 3 lomos denudados bajos de longitud larga con una superficie aproximada de 2,4 km<sup>2</sup>, ubicados hacia el nor-oeste del casco urbano del municipio de Molagavita. Estos se encuentran en zonas donde predominan los conos o lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco), ubicados de manera paralela al sistema de drenajes.

Están ubicados donde la pendiente y la rugosidad del terreno son moderadas a inclinadas (dadas por las diferentes unidades geológicas). También cabe resaltar que las formaciones que dan lugar a estas geoformas son las formaciones Capacho, Colón-Mito Juan y La Luna.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve bajo; una inclinación de la ladera muy abrupta (entre los 21 a 30 grados), y longitud larga y forma convexa. Las características del drenaje de esta geoformas son principalmente en "V cerrado", con una densidad baja y una frecuencia muy baja. Se observa un ambiente denudacional, en donde se ve un conjunto de geoformas denudacionales, entre ellas un Dldebl (Figura 37).

**Figura 36. Se observa al municipio de Molagavita sobre un cono o lóbulo coluvial y de solifluxion, en conjunto con dos Dldebl y un Dldebc.**



**7.2.5. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi).** Estructura de morfología baja, cóncava a convexa y en forma de cono o lóbulo, que presenta un relieve irregular. Ubicado en donde las pendientes son escalonadas. Su origen está relacionado a procesos de movimientos en masa, con desplazamiento en zonas con alta deformación.

En el área de estudio se encuentran 3 conos de deslizamiento indiferenciado con un área aproximada de 682.608 m<sup>2</sup>, ubicadas heterogéneamente en toda la region de trabajo. El cono de deslizamiento indiferenciado de mayor extensión, se encuentra hacia la parte norte del área de estudio, sobre la vía San Andrés – Pangote, el cual se encuentra limitado hacia el occidente por una ladera ondulada (Dlo); hacia el oriente, por una ladera en contrapendiente (Slcp); y hacia el norte, por un escarpe de erosión menor.

Los conos de deslizamiento indiferenciado se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno va de moderada a alta, en zonas cercanas a las fallas. En el área de estudio, estas geofomas presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve moderado a alto; una inclinacion de ladera muy inclinada a abrupta (no mayor a los 30 grados), y finalmente, una longitud larga y una forma

cóncava a convexa. Estas geoformas no presentan características del drenaje. Se observa en la vía Málaga-Molagavita, aproximadamente a 4 km del casco urbano de Molagavita, un cono de deslizamiento indiferenciado (Figura 38).

**Figura 37. Movimiento indiferenciado de origen denudacional encontrado en el área de estudio**



**7.2.6. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr).** Estructura con forma suavemente ondulada. Su origen está relacionado al movimiento de rocas a lo largo de una superficie de falla. Esta es una geoforma asociada a un movimiento en masa controlado por segmentos de debilidad (e.g. planos de estratificación) y alto fracturamiento. En campo, se encontraron en las formaciones La Luna y Tibú-Mercedes, en zonas de poca vegetación con una muy alta meteorización del terreno.

En el área de estudio se encuentran 2 conos o lóbulos de deslizamiento traslacional con un área aproximada de 272.762 m<sup>2</sup>: el primero de ellos ubicado en la vía Málaga – Molgavita, a 4 km antes de llegar al casco urbano de este

municipio: este deslizamiento surgió hace un poco mas de 5 años, llevando consigo algunas cabezas de ganado; la segunda se ellas se encuentra en la parte superior izquierda de la plancha, en la cercanias de la Vereda “Pescadero”, frente a la escuela de dicha vereda.

Los conos o lóbulos de deslizamiento traslacional se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno va de muy alta a escarpada.

En el área de estudio, estas geoformas presentan un tipo de relieve montañoso con un indice de relieve alto; una inclinacion de ladera escarpada a muy escarpada (mayor a 45 grados), y una longitud larga y una forma cóncava a convexa. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad baja y una frecuencia muy baja. Se observa frente a la escuela de la Vereda “Pescadero”, un cono o lóbulo de deslizamiento traslacional, junto con una Scle (Figura 39).

**Figura 38. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr) junto con una ladera estructural de cuesta (Scle).**



**7.2.7. Escarpe de erosión mayor (Demm).** Ladera de pendiente muy inclinada y de altura variable, que puede formarse por distintas causas: dentro de ellas, pueden ser por tectónica, por abrasión o por procesos gravitacionales. Tienen una geometría cóncava, convexa o recta. En la zona de estudio, estos escarpes se encontraban cubiertos por una vegetación bastante espesa, y la mayoría de ellos estaban asociados a la Formación Tibú-Mercedes.

En el área de estudio se encuentran 8 escarpes de erosión mayor, con un área aproximada de 2,4 km<sup>2</sup>, ubicadas heterogéneamente en toda la plancha. La mayoría de estos se encuentran en zonas aledañas a los cauces activos (Fca), donde la topografía y el relieve son bajos.

Los escarpes de erosión mayor se ubican donde la pendiente y la rugosidad del terreno son moderadas a inclinadas, dadas por las diferentes unidades geológicas. Cabe resaltar que las unidades estratigráficas que dan lugar a estas geoformas, son las formaciones Aguardiente, Rio Negro y Colón-Mito juán.

Generalmente, en el área de estudio estas geoformas presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve bajo; una inclinación de ladera muy escarpada (mayor a los 45 grados), y una longitud moderadamente larga, y forma rectilínea. Las características del drenaje de estas geoformas son principalmente en "V cerrado", con una textura gruesa. Se observa un escarpe de erosión mayor junto a una Del (Figura 40).

**Figura 39. Escarpe de erosión mayor en el kilómetro 16 via Pangote - Málaga a el margen derecho de la carretera**

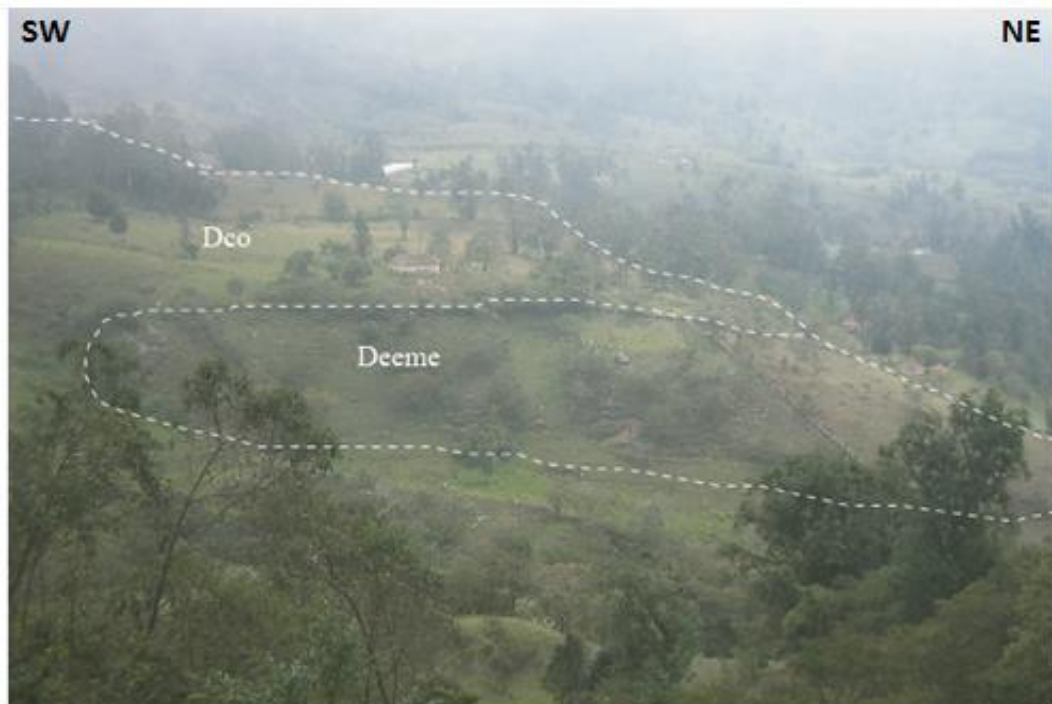


**7.2.8. Escarpe de erosión menor (Deeme).** Al igual que el escarpe de erosión mayor, es una ladera de pendiente abrupta, con una altura variable pero mucho menor a la del Deem. Puede formarse por socavación fluvial lateral, o por procesos de erosión. En campo, estas geoformas se encuentran cubiertas por vegetación tipo pasto, cerca de los Dco.

En el área de estudio se encuentran 10 escarpes de erosión menor, con un area aproximada de 3,9 km<sup>2</sup>, ubicadas heterogéneamente en toda la region de la plancha. La mayoría de estos escarpes se encuentran en la parte central, en las cercanías del municipio de Molagavita y se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno es moderada a inclinada, dadas por los procesos de meteorización y erosión diferencial. También cabe resaltar que las formaciones que dan lugar a estas geoformas son Colon - Mito Juan y La Luna.

Mayoritariamente, en el área de estudio estas geoformas presentan un tipo de relieve montañoso con un índice de relieve muy bajo a bajo; una inclinación de ladera muy escarpada (mayor a los 45 grados), y una longitud corta y una forma rectilínea a convexa. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con un patrón de drenaje subparalelo, y una textura fina. Se observa un escarpe de erosión menor (Figura 41).

**Figura 40. Escarpe de erosión menor hacia nor-oeste del municipio de Molagavita.**

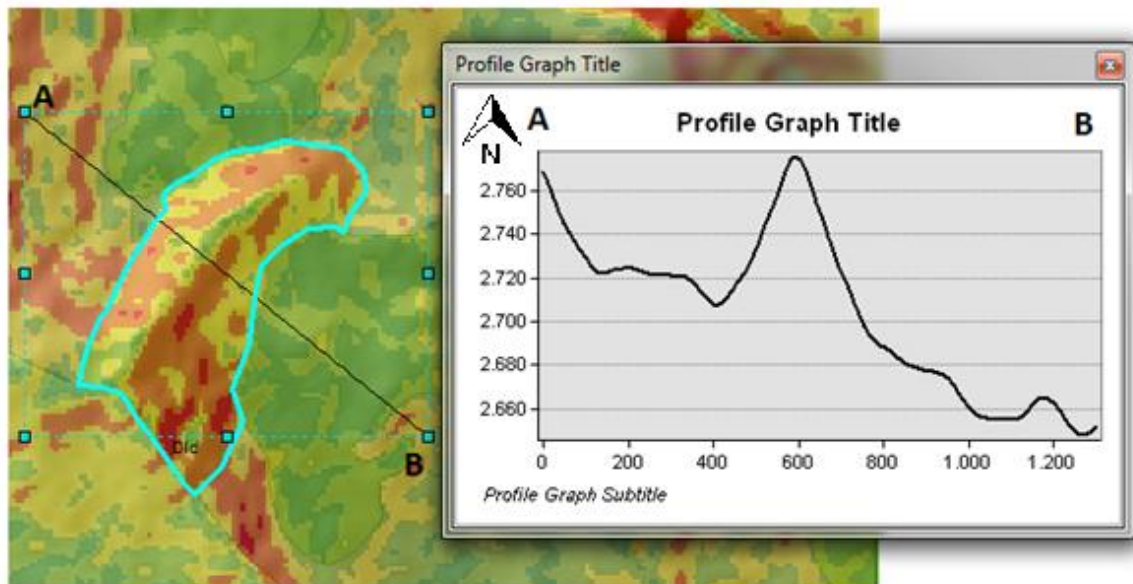


**7.2.9. Loma desnuda (Did).** Prominencia topográfica menor a 200 metros sobre su nivel base local, con una morfología alargada, de pendientes muy inclinadas. Su origen está asociado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial. Gran parte de esta geoforma en el área de estudio, se encontraba cubierta por vegetación tipo bosque y pasto.

En la plancha, se encuentran 5 lomas desnudas que ocupan un área aproximada de 1,86 km<sup>2</sup>, ubicadas en la cercanía del límite norte de la región de estudio. Estas están ubicadas donde la pendiente es moderada a alta.

Presentan un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve bajo; una inclinación de ladera, que va de inclinada a muy inclinada (entre 11 a 15 grados), y una longitud moderadamente larga, con forma irregular. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad baja y una frecuencia muy baja. Se observa un esquema de una loma desnuda, ubicado hacia el nor-occidente del municipio de Málaga (Figura 42).

**Figura 41. Esquema de una loma desnuda en el área de estudio.**



**7.2.10. Lomo desnudo (Dide).** Son conjuntos de lomos posicionados a diferentes alturas. La inclinación y orientación del eje del lomo pueden arrojar información acerca de diferentes velocidades de los flujos, causantes de la erosión.

En el área de estudio, se encuentra un lomo denudado con una superficie aproximada de 46, 972 m<sup>2</sup>, ubicado en todo el borde nor-occidental. Este está ubicado donde la pendiente varía de moderada a alta.

Esta unidad presenta un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve moderado a alto; pendiente de la ladera inclinada a muy inclinada (entre 11 a 15 grados), junto con una longitud corta y una forma irregular. No presenta ninguna característica del drenaje, ya que carece de ellos.

**7.2.11. Ladera erosiva (Dle).** Corresponden a zonas del relieve alargadas inclinadas, de forma cóncava o convexa, los cuales presentan procesos erosivos como cárcavas, surcos y soliflucción. En el área de trabajo, al norte, el municipio de Pangote está ubicado sobre una ladera erosiva, la cual está cubierta por vegetación de tipo arbusto.

En el área de estudio se encuentran 9 laderas erosivas bajas con una superficie aproximada de 12,9 km<sup>2</sup>, ubicados de manera heterogénea a lo largo de toda la plancha. La ladera erosiva de mayor extensión, se encuentra hacia el oriente del casco urbano del municipio de Molagavita, limitada hacia el norte por una ladera estructural en contrapendiente (Slcp); hacia el oriente por una ladera a favor de la pendiente de sierra homoclinal (Sshle) y al occidente por un conjunto de conos- o lóbulos- coluviales o de soliflucción (Dco). Estas laderas se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno son moderadas.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve alto; una inclinación de ladera abrupta a muy abrupta (entre los 16 a 30 grados), junto con una longitud larga y una forma cóncava a convexa. Las características del drenaje son principalmente en "V cerrado", con una densidad moderada y una frecuencia alta. Se observa como se encuentra una Dle en conjunto con una ladera en contrapendiente (Slcp) y un escarpe en contra pendiente (Secp) (Figura 43).

**Figura 42. Vista de una Slcp via San Andrés-Málaga, 100 metros despues del desvio que va hacia la Laguna de Ortices.**

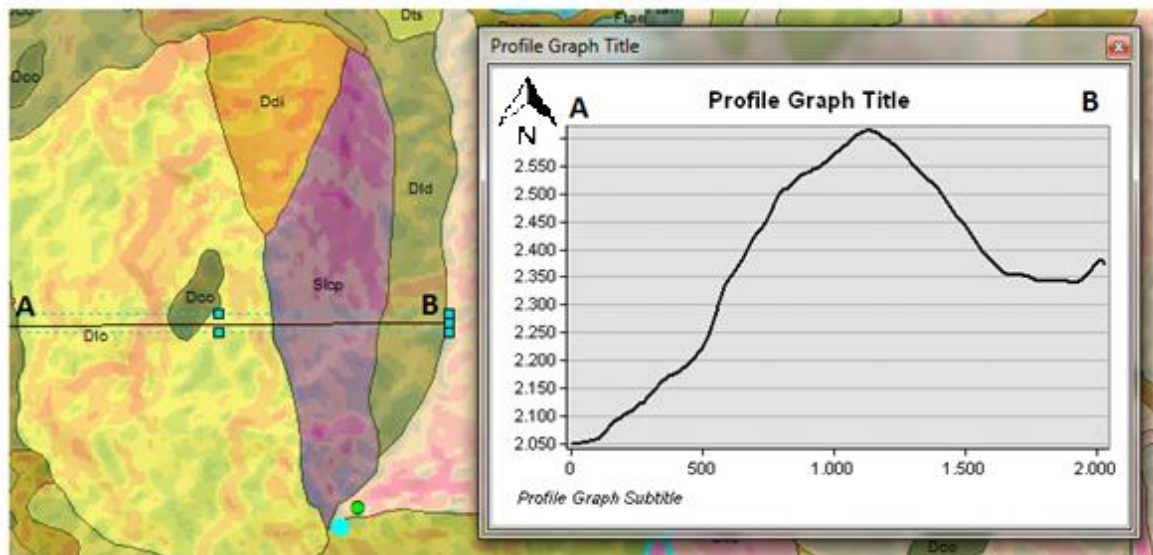


**7.2.12. Ladera ondulada (Dlo).** Superficie alomada con una pendiente escarpada, con una longitud que varía de corta a muy larga. Estas laderas se forman en depósitos coluviales, e indican cómo cambian los diferentes procesos de erosión.

En el área de estudio, se encuentran una ladera ondulada con una superficie aproximada de 2,2 km<sup>2</sup>, ubicada hacia el nor-occidente de la plancha, en la cercanías de la via San Andrés-Pangote. Esta se encuentra limitada hacia el nor-occidente por una Dld; hacia el norte por un Ddi y hacia el oriente, por una Slcp. Está ubicada donde la pendiente y la rugosidad del terreno son moderadas a inclinadas.

Presentan un tipo de relieve acolinado o alomado, con un índice de relieve bajo; una inclinacion de ladera abrupta a muy abrupta (entre los 16 a 30 grados), junto con una longitud moderadamente larga y una forma convexa a irregular. Se observa un diagrama esquemático y de perfil de una ladera ondulada, ubicada en el kilómetro 26 vía Pangote-Málaga (Figura 44).

Figura 43. Diagrama esquemático de una ladera ondulada, con una vista en perfil y planta.



**7.2.13. Terrazas sobreelevadas (Dts).** Superficie plana alomada, con pendientes suaves a ligeramente inclinadas, que aparecen como consecuencias de antiguos procesos fluviales con una altura mayor al nivel del cauce local. Corresponden a zonas donde los procesos de erosión tienen mayor impacto que los procesos de depositación.

En el área de estudio se encuentra una terraza sobreelevada, con una superficie aproximada de 53,123 m<sup>2</sup>, ubicada hacia el sur-oeste del casco urbano del municipio de Pangote. Esta geoforma se encuentra limitada hacia el norte por un cauce activo (Fca) y un escarpe de erosión menor (Deeme); hacia el occidente, por una ladera estructural de cuesta (Scle) y hacia el sur, por una loma desnuda (Dld).

Estas terrazas están ubicadas en donde la pendiente y la rugosidad del terreno son muy bajas a bajas, dadas por los diferentes procesos de acumulación y erosión en la cercanía de los ambientes fluviales.

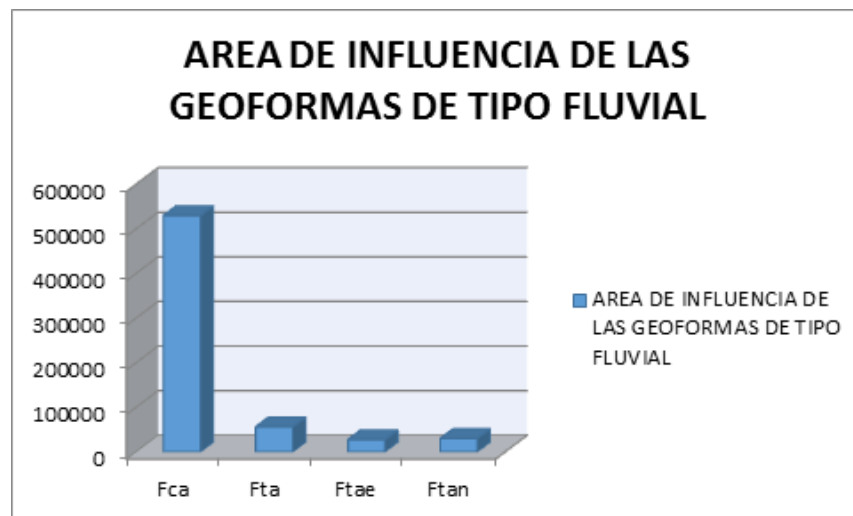
Presentan un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve bajo; una inclinación de ladera plana a suave (menor a los 5 grados), junto con una longitud muy corta y una forma rectilínea, Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad baja y una frecuencia muy baja.

### 7.3. GEOFORMAS DE TIPO FLUVIAL

Las geoformas de tipo fluvial están controladas principalmente por corrientes de agua que ayudan al proceso de meteorización y favorecen la erosión, transporte y sedimentación, siendo las zonas aledañas a los ríos las más afectadas. Dichas geoformas abarcan aproximadamente el 1% del área total, correspondiente a 6,7 km<sup>2</sup>.

Las geoformas fluviales con mayor área de influencia son los cauces activos (Fca) y las terrazas de acumulación (Fta). A continuación, se muestra un histograma donde se agrupan en función del área (Figura 45). Se identificaron 7 geo formas asociadas a 4 unidades geomorfológicas.

**Figura 44. Área de influencia de la geoformas de tipo fluvial en la plancha 136-I-B.**



**7.3.1. Cauce aluvial (Fca).** Canal de forma irregular, elaborado por los diferentes procesos de erosión de las corrientes estacionales dentro de los macizos rocosos, dependiendo de factores como la pendiente, resistencia del lecho y carga de sedimentos. En la región de estudio, los Fca más importantes corresponden a los drenajes principales, que llevaban consigo diferentes materiales particulados de gran tamaño, como relictos de los procesos de mayor intensidad que tuvo en el pasado.

En el área de estudio, se encontraron cuatro cauces activos con una superficie aproximada de 530 km<sup>2</sup>. Los cauces se forman sobre sedimentos aluviales de morfología baja. Estos son los principales afluentes que alimentan a los municipios de Málaga, Molagavita y Pangote, siendo los principales causantes de las geoformas de tipo fluvial, ya que su intensidad de caudal varía a través del tiempo, así como sus procesos de erosión, transporte y sedimentación. El terreno por donde pasan los cauces exhibe curvatura cóncava y rugosidad muy baja a baja. Entre todos, el de mayor área se influencia dentro de la plancha 136-I-B, se encuentra en las cercanías del municipio de Pangote, hacia la parte sur. Se observa un cauce fluvial activo (Figura 46).

**Figura 45. Cauce fluvial activo a 800 m del cruce de la vía San Andrés-la Laguna de Ortices, margen izquierdo de la carretera**

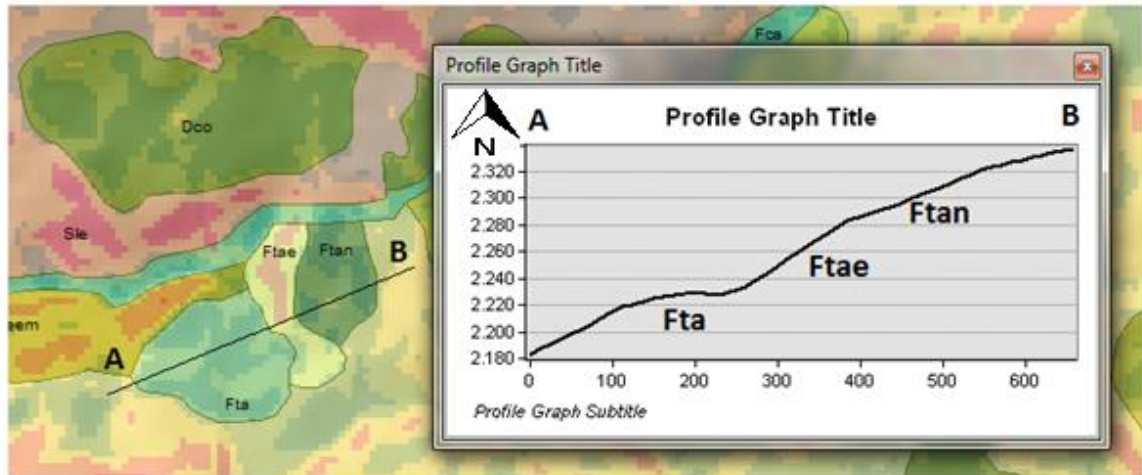


**7.3.2. Terraza de acumulación (Fta).** Superficie cercana a los cauces fluviales, de superficie larga y con una pendiente suave, limitada por escarpes de diferentes tamaños a lo largo del cauce. Su origen está marcado por procesos diferenciales de erosión y acumulación. Sus depósitos están constituidos por gravas, arenas y arcillas. En la región de estudio, estas terrazas son muy prominentes y están cubiertas por vegetación de tipo pasto, cerca al municipio de Pangote.

En la región de estudio, se encontró 1 terraza de acumulación con una superficie aproximada de 5600 m<sup>2</sup>, hacia el sur-occidente del municipio de Pangote, delimitado hacia el oeste por un escarpe de erosión menor (Deeme); hacia el este por un escarpe de terraza de acumulación (Ftae) y hacia el sur, por una ladera estructural de cuesta (Scle).

Presenta un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve muy bajo; una inclinación de la ladera plana a suave (menor a 5 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Las características del drenaje de esta geoformas son principalmente en “V cerrado”, con una densidad baja y una frecuencia baja. Esta terraza se encuentra delimitada por los drenajes que la rodean y la separan de las otras geoformas adyacentes a ella. Se observa una terraza de acumulación al sur de un cauce activo (Fca) (Figura 47).

**Figura 46. Diagrama de un ambiente fluvial donde se observa una terraza de acumulación, seguido de un escarpe de terraza y una terraza antigua al sur occidente del municipio de Pangote.**



**7.3.3. Escarpe de terraza de acumulación (ftae).** Plano de alta prominencia con una pendiente inclinada a abrupta, que bordea y limita las terrazas de acumulación. Los procesos de erosión y depositación le dan geometría a estas terrazas.

En la región de estudio, se encontró 1 escarpe de terraza de acumulación con una superficie aproximada de 27872 km<sup>2</sup>, hacia el sur occidente del municipio de Pangote. Está delimitado hacia el oeste por una terraza de acumulación (Fta); hacia el este, por una terraza de acumulación antigua (Ftan) y hacia el sur por una ladera estructural de cuesta (Scle).

Presenta un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve muy bajo; una inclinación de ladera muy abrupta a escarpada (entre los 30 y 45 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Esta geoforma no presenta ninguna característica de drenaje. Se muestra el esquema de un escarpe de terraza de acumulación (Figura 47).

**7.3.4. Terraza de acumulación antigua (ftan).** Geoforma con superficie elongada y pendientes inclinadas, limitada por escarpes abruptos, los cuales se posicionan en zonas de mayor altura a comparación de las terrazas de acumulación. Su origen está relacionado con la profundización del cauce, junto con los procesos de erosión y transporte.

En la región de estudio se encontró 1 terraza de acumulación antigua, con una superficie aproximada de 30337 m<sup>2</sup>, hacia el sur-occidente del municipio de Pangote. Está delimitada hacia el oeste por un escarpe de terraza de acumulación (Ftan); y hacia el sur-este, por una ladera estructural de cuesta (Scle).

Presenta un tipo de relieve alomado, con un índice de relieve muy bajo; una inclinación de ladera plana a suave (menor a 5 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Esta geoforma no presenta características de drenaje.

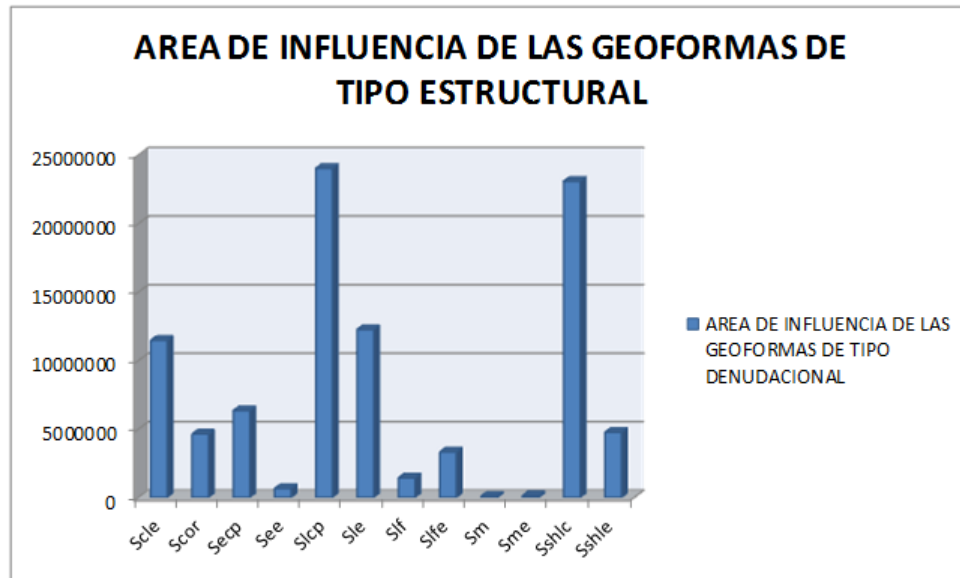
Se observa un diagrama representativo de una terraza de acumulación antigua, al sur de un cauce activo (Fca), en las cercanías del municipio de Pangote (Figura 47).

#### **7.4. GEOFORMAS DE TIPO ESTRUCTURAL**

Las geoformas de tipo estructural están regidas principalmente por los movimientos internos de la tierra. Son resultado de los diferentes tipos de esfuerzos, ya sean compresivos o extensivos, dando así lugar a los fallamientos y plegamientos. Dichas geoformas abarcan aproximadamente un 61% del área total, correspondiente a 92,3 km<sup>2</sup>. Las geoformas estructurales con mayor superficie de influencia, son las laderas estructurales en contrapendiente (Slcp) y las laderas en contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc). A continuación, se muestra un histograma donde se agrupan las geoformas de tipo estructural en

función del área (Figura 48). Se identificaron 46 geoformas, asociadas a 12 unidades geomorfológicas.

**Figura 47. Área de influencia de las geoformas de tipo estructural en la plancha 136-I-B**



**7.4.1. Ladera estructural de cuesta (Scle).** Superficies elongadas y alargadas, de morfología alomada definida por basculamiento, en 10 a 20 grados, de capas de rocas resistentes y blandas que son consecuencia de la dinámica de la zona.

En el área de estudio se encontraron dos laderas estructurales de cuesta, con una superficie aproximada de 11,5 km<sup>2</sup>: una de ellas ubicadas en la Vereda “Pescadero”; y la otra, hacia el este del municipio de Pangote. Cabe resaltar que hacia esta vereda, cerca a la escuela, se encontró esta geoforma junto con un movimiento en masa. La geometría que da lugar a un Scle estaba cubierta por vegetación tipo rastrojo alto y pasto. Las pendientes y rugosidad en las cuales se forman estas geoformas están dadas por calificaciones de media y alta.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve moderado; una inclinación de ladera muy abrupta (entre 21 a 30 grados), junto con una longitud larga y una forma convexa. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad alta y una frecuencia alta. El grado de meteorización es moderado. Se observa en la Vereda “Pescadero”, hacia las cercanías de la escuela, una ladera estructural de cuesta

**7.4.2. Cornisa estructural (Scor).** Geoforma de superficie planar, con una pendiente suave a ligeramente inclinada. Ubicada en las hombreras que se presentan en forma escalonada en las laderas en contrapendiente, su geometría está dada por procesos de erosión diferencial (alternancia entre afloramientos de rocas duras y blandas).

En el área de estudio se encuentran 8 cornisas estructurales con un superficie aproximada de 4,6 km<sup>2</sup>, ubicadas heterogéneamente a lo largo de toda la plancha. La mayoría de ellas se encuentran en laderas estructurales de contrapendiente (Slcp). Cabe resaltar que el municipio de Málaga se encuentra ubicado sobre una cornisa estructural, con un área aproximada de 2,5 km<sup>2</sup>, limitada hacia el occidente por una ladera en contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc); hacia el oriente, por un escarpe en contrapendiente (Secp), y hacia el norte, por un escarpe de línea de falla (Slfe).

Las cornisas se ubican en donde la pendiente y la rugosidad del terreno es muy baja a baja. Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy bajo; una inclinación de ladera plana a suave (menor a 5 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad moderada y una frecuencia media. En la mayoría de estas cornisas está desarrollado un patrón de drenaje dendrítico. Se observa al municipio de Málaga sobre una cornisa estructural (Figura 49).

**Figura 48. Municipio de Málaga, ubicado sobre una cornisa estructural.**



**7.4.3. Escarpe en contrapendiente (Secp).** Superficies de extensión larga a muy larga, con una pendiente abrupta definida por planos en contra del terreno. El sector del municipio de Málaga se encuentra limitado por un Secp hacia el extremo oriental del casco urbano.

En el área de estudio se encuentran 7 escarpes en contrapendiente, con una superficie aproximada de 6,5 km<sup>2</sup>, ubicados heterogéneamente a lo largo de la plancha. El de mayor extensión se encuentra ubicado hacia el nor-oriental de la Laguna de Ortices, con una superficie aproximada de 4,2 km<sup>2</sup>, en dirección NE – SW. Estas geofórmulas están ubicadas donde la pendiente y la rugosidad van de muy inclinadas a escarpadas.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy alto; una inclinación de ladera muy escarpada (mayor a 45 grados), junto con una longitud moderadamente larga a larga, y una forma rectilínea. Las características del

drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad baja y una frecuencia muy baja. En la mayoría de estos escarpes, está desarrollado un patrón de drenaje subparalelo. Se observa un escarpe en contrapendiente, ubicado al nor-orientes de la Laguna de Ortices (Figura 50).

**7.4.4. Ladera en contrapendiente (Slcp).** Geoforma de alta prominencia y basta extensión, con pendientes suavemente inclinadas a muy inclinadas, definida por planos dispuestos en contra del terreno.

En la región de estudio se encontraron 7 laderas en contrapendiente, con una superficie aproximada de 24,1 km<sup>2</sup>, ubicadas de manera heterogénea a lo largo de toda la plancha. La ladera en contrapendiente de mayor extensión está ubicada en el borde occidental de la zona, con un área aproximada de 9,1 km<sup>2</sup> en sentido N-S. También cabe destacar que en el sector del municipio de Málaga, se encuentra limitada por una Slcp hacia el extremo norte del casco urbano.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve alto; una inclinación de ladera abrupta a muy abrupta, junto con una longitud muy larga y una forma convexa. Las características del drenaje son principalmente en “V cerrado”, con una densidad moderada y una frecuencia alta. En la mayoría de estas laderas en contrapendiente está desarrollado un patrón de drenaje subparalelo. Se ilustra el comportamiento geomorfológico de una ladera en contra pendiente (Figura 50).

**7.4.5. Lomo de falla (Slf).** Geoforma de alta prominencia, de superficie escarpada, con laderas muy cortas y localizadas a lo largo de una falla de rumbo, formada por el efecto combinado del desplazamiento lateral y la geometría del plano de falla, que determina la expulsión de un bloque del terreno.

En el área de estudio se encuentra 1 lomo de falla con una superficie aproximada de 1,4 km<sup>2</sup>, ubicado hacia el borde occidental, en la parte media de la plancha, este se encuentra en dirección W-E. Esta geoforma se ubica donde la pendiente es muy inclinada a escarpada.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve alto; una inclinación de ladera abrupta (entre 16 y 20 grados), junto con una longitud moderadamente larga a larga, y una forma convexa. Esta geoforma no presenta características de drenaje. Principalmente está cubierta por vegetación de tipo bosque y rastrojo alto. Se observa un lomo de falla ubicado hacia el nor-orienté de la Laguna de Ortices (Figura 50).

**Figura 49. Escarpe estructural en contrapendiente, ubicado al nor-orienté de la Laguna de Ortices, en conjunto con una ladera en contrapendiente y un lomo de falla.**



**7.4.6. Escarpe estructural (See).** Superficies verticales a subverticales a lo largo de planos preferentes, dispuestos de manera paralela a la superficie del terreno. En el área de estudio, se identificaron dos escapes estructurales, con una superficie total de 655 m<sup>2</sup>: el primero ubicado hacia la región norte, limitando hacia el este con un Sshlc y hacia el oeste, con Scleel; el segundo de ellos, ubicado hacia el oeste de Málaga, en la parte superior de la montaña, limitado hacia el oeste por un Sshle; hacia el este, por un Sife y hacia el norte, por un Sme.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve alto; una inclinación de ladera muy escarpada (mayor a 45 grados), junto con una longitud moderadamente corta y una forma rectilínea. Estas geoformas carecen de drenaje.

**7.4.7. Ladera estructural (Sle).** Superficie larga con pendiente ligeramente inclinada a muy inclinada, con una morfología irregular, definida por planos paralelos a favor de la pendiente.

En la región de estudio se encontraron 5 laderas estructurales, con un superficie aproximada de 12,3 km<sup>2</sup>, ubicadas de manera heterogénea a lo largo de toda la plancha. La de mayor extensión está ubicada hacia el oeste del municipio de Molagavita, con un área aproximada de 4,2 km<sup>2</sup>, en sentido N-S.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve alto; una inclinación de ladera muy abrupta, junto con una longitud muy larga y una forma convexa. Las características del drenaje son principalmente en “V abierto”, con una densidad baja y una frecuencia muy baja. En la mayoría de estas laderas estructurales, está desarrollado un patrón de drenaje subparalelo.

**7.4.8. Escarpe de línea de falla (Slfe).** Plano vertical a subvertical, de superficie escarpada con una pendiente abrupta, en las cercanías de una zona de falla producto del truncamiento de estructuras topográficas y geológicas, afectadas por procesos de erosión acentuada.

En el área de estudio se encuentran 10 escarpes de línea de falla, con una superficie aproximada de 3,3 km<sup>2</sup>, ubicados heterogéneamente en toda la plancha. El de mayor extensión está ubicado hacia el nor-occidente del municipio de Málaga, con un área aproximada de 439 m<sup>2</sup>, con una dirección NW–SE. Estas

geoformas están ubicadas donde la pendiente y la rugosidad es muy inclinada a escarpada.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy alto; una inclinación de ladera muy escarpada (mayor a 45 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Estas geoformas no presentan características de drenaje. Se observa un escarpe de línea de falla hacia el oeste del municipio de Málaga (ver Figura 51).

**7.4.9. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc).** Geoforma de superficie subvertical con una extensión larga a muy larga, de forma cóncava a irregular, generada por los estratos dispuestos en contra de la pendiente relacionada a una estructura homoclinal.

En el área de estudio se encuentra 1 ladera de contrapendiente de sierra homoclinal, con una superficie aproximada de 23,1 km<sup>2</sup>, ubicada hacia el oeste del casco urbano del municipio de Málaga. Siendo esta contenedora de otras geoformas debido a su gran extensión, es la más grande de todas. Cabe resaltar que el municipio de Málaga se encuentra ubicado sobre una cornisa estructural, que a su vez se encuentra en una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal, la cual está limitada hacia el occidente por una ladera a favor de la pendiente de sierra homoclinal, y hacia el oriente, por una cornisa estructural y una ladera en contrapendiente.

Exhibe un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy alto; una inclinación de ladera abrupta a muy abrupta (no mayor a 30 grados), junto con una longitud muy larga a extremadamente larga, y una forma convexa. Las características del drenaje de esta geoformas son principalmente en "V cerrado", con una densidad alta y una frecuencia media. En esta ladera está desarrollado

un patrón de drenaje, paralelo a subparalelo. Se observa al municipio de Málaga, limitando con una Sshlc (ver Figura 51).

**Figura 50. Escarpe de línea de falla hacia el oeste del municipio de Málaga.**



**7.4.10. Meseta estructural (Sm).** Geoforma de superficie plana, de longitud corta limitada por escarpes muy inclinados a abruptos, producto de procesos de meteorización y erosión.

En el área de estudio, se encuentra 1 meseta estructural, con una superficie aproximada de 103 m<sup>2</sup>, ubicada hacia el occidente del casco urbano del municipio de Málaga, en la parte superior de la montaña, en cercanías del sitio geográfico conocido como “El Alto de Miranda” (ubicado en la plancha). Está ubicada donde la pendiente y la rugosidad son bajas y muy bajas.

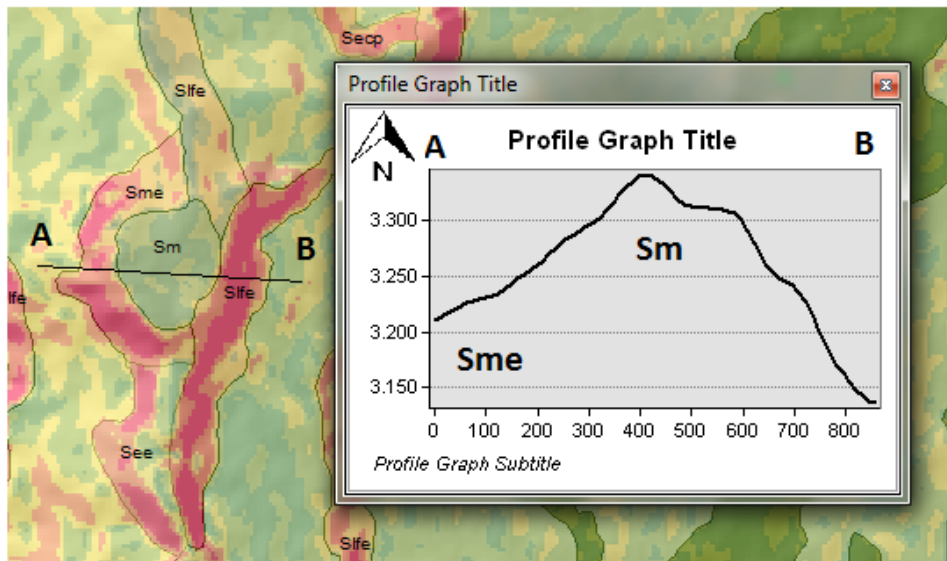
Exhibe un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy bajo; una inclinación de la ladera plana a suave (menor a 5 grados), junto con una longitud corta a muy corta, y una forma rectilínea. Esta meseta no presenta características de drenaje. Se observa una meseta estructural al occidente del casco urbano del municipio de Málaga (Figura 52).

**7.4.11. Escarpe de meseta (Sme).** Superficie subvertical a vertical de corta extensión, y pendientes muy inclinadas que limitan o bordean las mesetas estructurales. Su origen está ligado a procesos de erosión deferencial.

En el área de estudio, se encuentra 1 escarpe de meseta con una superficie aproximada de 138 m<sup>2</sup>, ubicado hacia el occidente del casco urbano del municipio de Málaga, en la parte superior de la montaña, en cercanías del sitio geográfico conocido como “El Alto de Miranda”, ubicada en la plancha 136-I-B. Esta está ubicada donde la pendiente y la rugosidad son altas a escarpadas.

Presentan un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve bajo; una inclinación de ladera escarpada (entre 31 y 45 grados), junto con una longitud corta y una forma rectilínea. Esta no presenta características de drenaje. Se observa una meseta estructural al occidente del casco urbano del municipio de Málaga (Figura 52).

**Figura 51. Diagrama de una meseta estructural en conjunto con un escarpe de meseta.**



**7.4.12. Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle).** Superficie de alta extensión con una pendiente muy inclinada, definida por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente, y relacionada con una estructura homoclinal.

En el área de estudio, se encuentra 1 ladera estructural de sierra homoclinal con una superficie aproximada de 4,8 km<sup>2</sup>, ubicada hacia el este del municipio de Molagavita. Esta geoforma es la segunda con mayor extensión en la plancha. Limita hacia el occidente con una ladera erosionada (Del); hacia el oriente, con una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal; hacia el norte con un cono o lóbulo coluvial o de soliflucción (Dco); y hacia el sur, con un escarpe de erosión menor (Deeme).

Presenta un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy alto; una inclinación de ladera muy abrupta (no mayor a 30 grados), junto con una longitud muy larga a extremadamente larga, y forma convexa. Las características del drenaje de son principalmente en “V cerrado”, con una densidad y frecuencia alta.

En la mayor parte de esta unidad, está desarrollado un patrón de drenaje paralelo a subparalelo. Se observa hacia el oriente del municipio de Molagavita, una Sshle (Figura 53).

**Figura 52. Se observa una ladera estructural de sierra homoclinal hacia el oriente del casco urbano del municipio de Molagavita.**

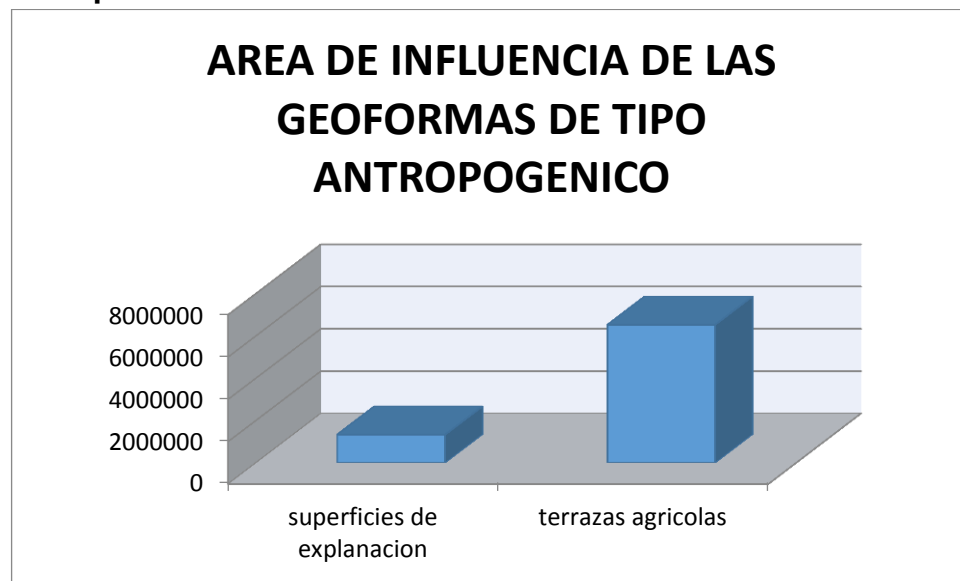


## 7.5. GEOFORMAS DE TIPO ANTROPOGÉNICO

Las geoformas de tipo antropogénico están dictadas por la acción del hombre para la adecuación de vivienda o de zonas donde se puedan desarrollar actividades agrícolas y agropecuarias. En el área de estudio se encontraron tan solo dos geoformas de tipo antropogénico, con una superficie total de 7,9 km<sup>2</sup>

correspondiente al 5% del área total. Las geoformas con mayor área de influencia, de este tipo, son las terrazas agrícolas (Ata). Se encontraron 12 unidades geomorfológicas, asociadas a 2 geoformas. A continuación, se muestra el área de influencia de dichas geoformas (Figura 54).

**Figura 53. Área de influencia de las geoformas de tipo antropogénico en la región de la plancha 136-I-B.**



**7.5.1. Superficies de explanación (Asp).** Planos de allanamiento, desarrollados sobre laderas y sustrato rocoso de materiales incosolidados, con el fin de adecuar el terreno para la construcción o con fines de estabilización de laderas, mediante la explanación o terráceos que disminuyen la pendiente del terreno.

En la región de estudio se encontraron dos superficies de explanación, correspondientes a los municipios de Málaga y Molagavita, con una superficie aproximada de 1,3 km<sup>2</sup>. Estas exhiben un tipo de relieve montañoso, con un índice de relieve muy bajo; inclinación de ladera muy baja (no mayor a 7 grados), con una longitud muy corta y una forma rectilínea. Estas geoformas no poseen un sistema o patrón de drenaje. Se observa el casco urbano del municipio de Molagavita, que corresponde a una superficie de explanación (Figura 49).

**7.5.2. Terrazas agrícolas (Ata).** Geoformas de forma escalonada, con superficies anchas construidas por el hombre, usando la misma tierra del lugar para actividades agrícolas o plantaciones forestales.

En el área de estudio, se encontraron 10 superficies de explanación, con una superficie aproximada de 6,5 km<sup>2</sup>. En esta región es bastante común observar terrazas agrícolas, ya que la economía del sector se basa en la ganadería y la agricultura. Se observa una terraza agrícola (Figura 55).

**Figura 54. Terraza agrícola ubicado a 3 km del cruce a la avenida de Molagavita al margen izquierdo de la carretera.**

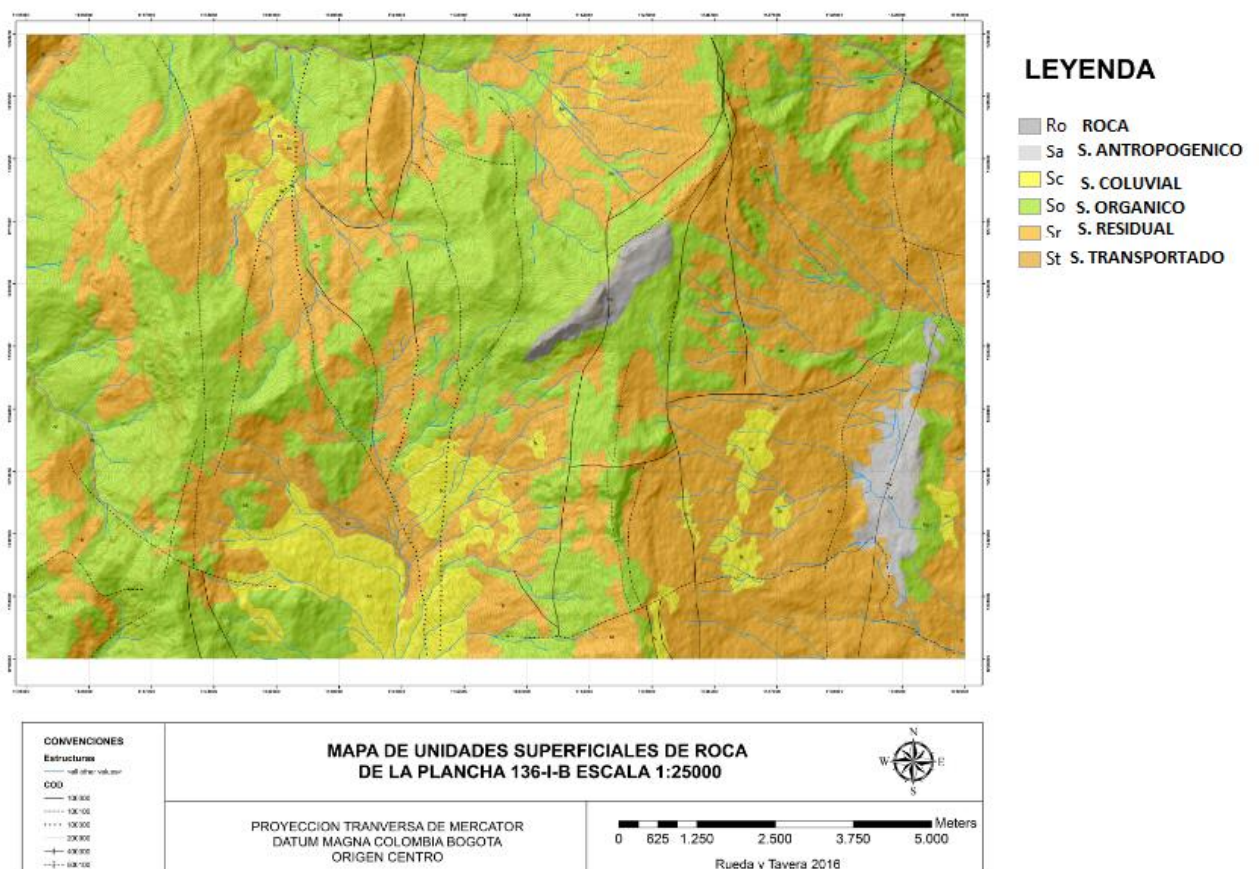


## **7.6. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES**

El estudio de las Unidades Geológicas Superficiales en campo, es un factor de suma importancia para el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa, ya

que permite ver el proceso de meteorización y erosión de la roca en superficie y conocer las principales propiedades de cada unidad. Este estudio se realizó en la plancha 136-I-B, tomando como base principal la fotointerpretación de imágenes landsat, con las que se permitió realizar una caracterización de 66 unidades diferentes, asociadas a 6 tipos de suelos (Figura 56); dentro de los cuales están los de tipo orgánico, residual, coluvial, transportado, antropogénico y roca.

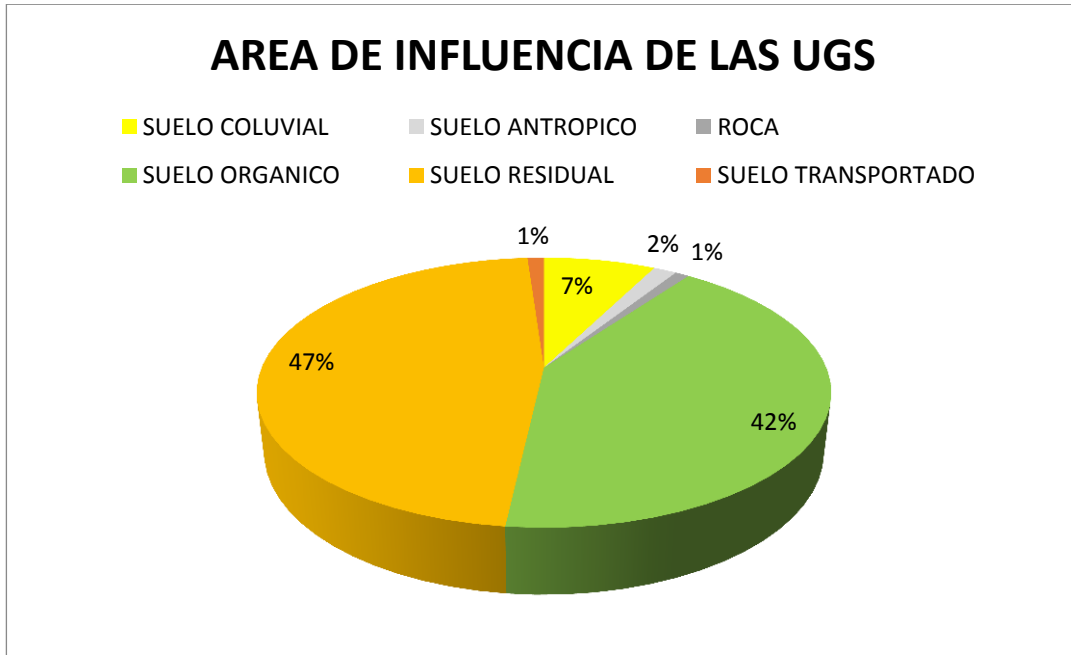
**Figura 55. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de la plancha 136-I-B escala 1:25000**



A continuación, en la figura 57 se observa el área de influencia de las unidades geológicas superficiales en donde se muestra que el tipo de suelo con mayor área de influencia en el área de trabajo es el suelo de tipo residual con un 47% y de manera descendente los suelos orgánicos con 42%, residual con 7%, antrópico

con 2% y finalmente el transportado y la roca con un 1% para cada uno de ellos. En la tabla 5 se muestran cada uno de las unidades geológicas superficiales asociados al área dictada en m<sup>2</sup>

**Figura 56. Diagrama de torta con los porcentajes de los diferentes tipos de UGS**



**Tabla 6. Área de las unidades geológicas superficiales dictadas en M<sup>2</sup>**

TIPO DE UGS	COD	AREA EN METROS CUADRADOS
SUELO COLUVIAL	Sc	11'283.186,29
SUELO ANTROPICO	Sa	2'330.759
ROCA	Ro	1'417.083,6
SUELO ORGANICO	So	62'596.057
SUELO RESIDUAL	Sr	70'619.265,22
SUELO TRANSPORTADO	St	1'656.218,58

**7.6.1. Suelos antrópicos.** Los suelos antrópicos se presentan en su mayoría en lugares de asentamiento humano, por lo general en lugares de pendiente plana a suavemente inclinada (no mayor a 7 grados), los cuales tienen intervención del hombre, adaptando el terreno para la vivienda y el bien de la comunidad. En el área de estudio, estos sitios hacen referencia a los municipios de Málaga y Molagavita (Figura 58).

**Figura 57. Municipio de Málaga, como parte del suelo de tipo antropogénico.**



**7.6.2. Suelos transportados.** Los suelos transportados corresponden también a los depósitos aluviales, que han sido arrastrados por los cauces activos, o depositados por llanuras de inundación. A manera general, este tipo de suelo no posee ningún grado de compactación. Está compuesto de bloques heterométricos angulares a subangulares, que se disponen a lo largo de ríos y quebradas en la zona. Se aprecia un suelo transportado cerca del municipio de Pangote (Figura 59).

**Figura 58. Suelo de tipo transportado que se encuentra al sur del municipio de Pangote.**



**7.6.3. Suelo coluvial.** Suelos compuestos principalmente por materiales heterométricos, con una matriz mucho más fina. La formación de estos suelos se debe a los procesos gravitacionales que ubican todos los clastos de manera desordenada. En el área de estudio, estos presentan una capa muy fina de materia orgánica, dispuesta en la parte superior donde crece vegetación de pasto y rastrojo. Se observa un suelo de tipo coluvial (Figura 60).

**Figura 59. Suelo de tipo coluvial sobre la vía Málaga- Molagavita, a dos kilómetros del casco urbano del municipio de Molagavita**



**7.6.4. Suelo residual.** Los suelos residuales se forman cuando la velocidad de meteorización supera la velocidad de erosión de la roca, acumulándose todo el material no consolidado en la zona in situ, generando pérdida de la resistencia y estructura de la roca, produciendo porosidades y permeabilidades que, al unirse con la materia orgánica, permite el crecimiento de vegetación. Este tipo suelo se genera en zonas donde la pendiente va de plana a ligeramente escarpada, y en el área de estudio está caracterizado por la presencia de erosión laminar, cubierta de pasto natural. Se muestra un tipo de suelo residual en conjunto con un tipo de suelo orgánico (Figura 61).

**7.6.5. Suelo orgánico.** Los suelos de tipo orgánico se presentan de manera heterogénea a lo largo de toda la región de estudio. Está caracterizado por

encontrarse en una roca altamente meteorizada, mezclada con materia orgánica. También, por el tipo de vegetación que crece sobre él, desde rastrojo alto hasta bosque natural primario. Este tipo de suelo es el que predomina en la plancha 136-I-B. Está localizado en todo tipo de pendientes, desde suave hasta escarpadas. Las zonas más densas de este tipo de suelo se presentan en la zona de alta montaña. Se observa un tipo de suelo orgánico, limitando con un suelo residual al nor-oeste del municipio de Málaga (Figura 61).

**Figura 60. Suelo de tipo orgánico en zona de alta montaña, junto con suelo residual en la cercanía de la Vereda Pescadero.**



**7.6.6. Roca.** Comprende el macizo rocoso de la región de estudio, y se presenta donde la roca exhibe un grado muy débil de meteorización y transporte. Esta unidad es la menos susceptible a los movimientos en masa, debido a su compactación. Está localizado en zonas de pendiente abrupta a escarpada, en donde se observaba claramente el rumbo y el buzamiento, producto de un control estructural fuerte en la zona. Se observa un macizo rocoso ubicado en la vía Pangote-Málaga, al margen izquierdo de la carretera (Figura 62)

**Figura 61. Macizo rocoso ubicado en la vía Pangote-Málaga, hacia el margen izquierdo de la carretera.**



## **7.7. MORFODINÁMICA**

En el área de estudio, agentes morfodinámicos como el agua y el aire modelan la superficie del terreno, y como resultado, tienen influencia sobre procesos denudacionales, como la erosión y los movimientos en masa (SGC, 2012). Es así que las geoformas denudacionales están directamente relacionadas con los procesos exógenos (morfodinámicos), pudiéndose observar en los mecanismos de degradación, transporte y sedimentación de materiales, que les dieron origen.

El trabajo en campo en relación a la Morfodinámica, consistió de buscar movimientos en masa, además de corroborar los ya reportados en la plataforma nacional del SIMMA. Se registró un total de 34 movimientos en masa; de los cuales 13 de ellos corresponde a movimientos de inventario y 21, a catálogo. A continuación, se muestran todos los movimientos de catálogo e inventario, respectivamente, de la plancha 136-I-B reportados en la plataforma SIMMA e inventariados en campo (Tabla 6 y Tabla 7).

**Tabla 7. Puntos de ubicación de los movimientos en masa de tipo catálogo de la plancha 136-I-B.**

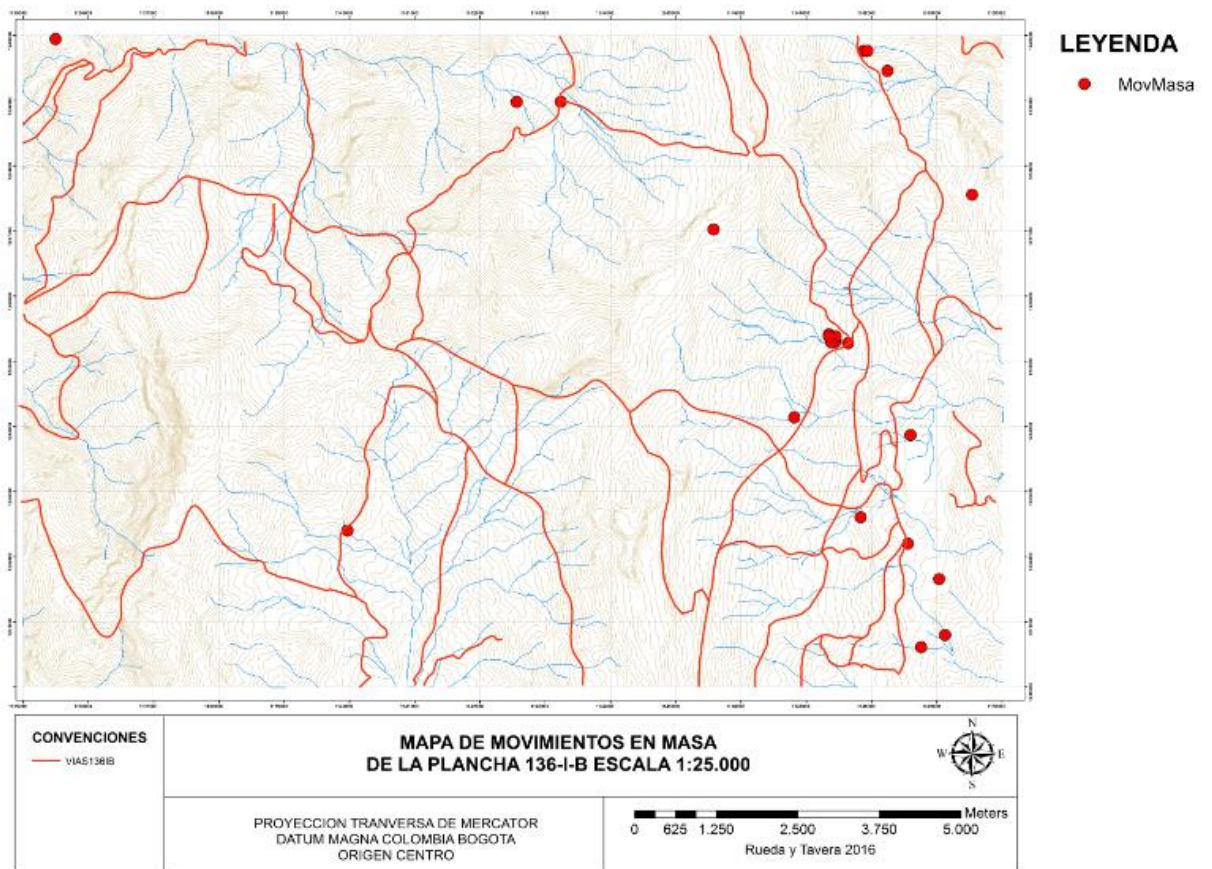
<b>MOVIMIENTOS EN MASA DE CATALOGO DE LA PLANCHA 136-I-B</b>			
<b>Código</b>	<b>Tipo</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>29794</b>	Deslizamiento	1'148.759,882	1'230.609,640
<b>25143</b>	Deslizamiento	1'147.640,973	1'235.277,177
<b>24060</b>	Deslizamiento	1'148.597,463	1'233.866,402
<b>9723</b>	Deslizamiento	1'147.347,077	1'235.380,026
<b>8239</b>	Deslizamiento	1'147.347,077	1'235.380,026
<b>7157</b>	Deslizamiento	1'147.414,647	1'235.380,210
<b>7057</b>	Deslizamiento	1'147.380,807	1'235.380,118
<b>6630</b>	Deslizamiento	1'149.126,452	1'230.795,821
<b>10053</b>	Deslizamiento	1'147.346,985	1'235.413,986
<b>6543</b>	Deslizamiento	1'147.449,336	1'235.312,274
<b>6275</b>	Deslizamiento	1'147.449,336	1'235.312,274
<b>6265</b>	Deslizamiento	1'147.414,740	1'235.346,140
<b>6041</b>	Deslizamiento	1'147.380,992	1'235.312,088
<b>5023</b>	Deslizamiento	1'147.438,440	1'235.292,996
<b>4908</b>	Deslizamiento	1'147.449,151	1'235.380,304
<b>4413</b>	Deslizamiento	1'147.377,727	1'235.292,831
<b>3055</b>	Deslizamiento	1'147.346,985	1'235.413,986
<b>2935</b>	Deslizamiento	1'147.346,985	1'235.413,986
<b>2216</b>	Deslizamiento	1'147.346,985	1'235.413,986
<b>1624</b>	Deslizamiento	1'147.347,077	1'235.380,026
<b>6994</b>	Deslizamiento	1'147.346,985	1'235.413,986

**Tabla 8. Puntos de ubicación de los movimientos en masa de tipo inventario de la plancha 136-I-B.**

<b>MOVIMIENTOS EN MASA DE INVENTARIO DE LA PLANCHA 136-I-B</b>				
<b>Codigo</b>	<b>Tipo</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Descripción</b>
<b>29884</b>	flujo	1'139.969,061	1'232.399,2 30	Estado activo, severidad leve, intercalaciones de chert laminado gris oscuro con lutitas grises con baja fisilidad.
<b>29881</b>	Flujo	1'142.564,136	1'238.520,7 03	Depósito coluvial que descansa sobre rocas cretácicas, de las formaciones Aguardiente, Tibú y Río Negro, es el mismo Qc de la estación San Luís.
<b>29878</b>	Reptación	1'143.238,776	1'238.983,4 38	Depósito coluvial, compuesto de bloques y cantos heterométricos, angulares y subangulares, de arenisca de grano medio a grueso.
<b>29891</b>	Reptación	1'145.578,538	1'237.023,1 29	Suelo residual arcilloso, color amarillo- ocre, blando, con relictos de la roca original que son lodolitas grises. Formación Kir.
<b>25876</b>	Deslizamiento	1'149.033,739	1'231.655,1 96	Intercalaciones de arcillolitas, fisiles, oscuras, carbonosas, sueltas, en paquetes de hasta 2 metros.
<b>25863</b>	Deslizamiento	1'146.815,083	1'234.138,0 95	Depósitos de coluvión
<b>25864</b>	Deslizamiento	1'147.874,846	1'239.764,1 17	En el sector predominan depósitos de coluvión matriz-soportados, medianamente compactos.
<b>25865</b>	Deslizamiento	1'147.936,328	1'239.764,2 86	Depósito de coluvión
<b>25868</b>	Deslizamiento	1'147.832,946	1'232.604,4 64	Depósito de coluvión
<b>25866</b>	Deslizamiento	1'148.244,255	1'239.457,8 31	Depósito de coluvión
<b>25867</b>	Deslizamiento	1'149.539,687	1'237.556,3 07	El terreno está conformado por intercalaciones de lodolitas, arcillolitas y niveles delgados de areniscas cuarzosas.
<b>30010</b>	Caída	1'135.495,846	1'239.946,5 4	Formación Floresta, compuesta por lutitas grises parduzco oscuro, suelo detrítico de tono parduzco grisáceo y de grano fino.
<b>1199</b>	Deslizamiento	1'148.556,020	1'232.198,9 13	Intercalaciones de arcillolitas, fisiles, oscuras, carbonosas, sueltas, en paquetes hasta de 2 metros.

A continuación, se muestra el mapa de los movimientos en masa de la plancha 136-I-B (Figura 63).

**Figura 62. Representación geográfica de los movimientos encontrados en campo y registrados en la plataforma nacional SIMMA.**



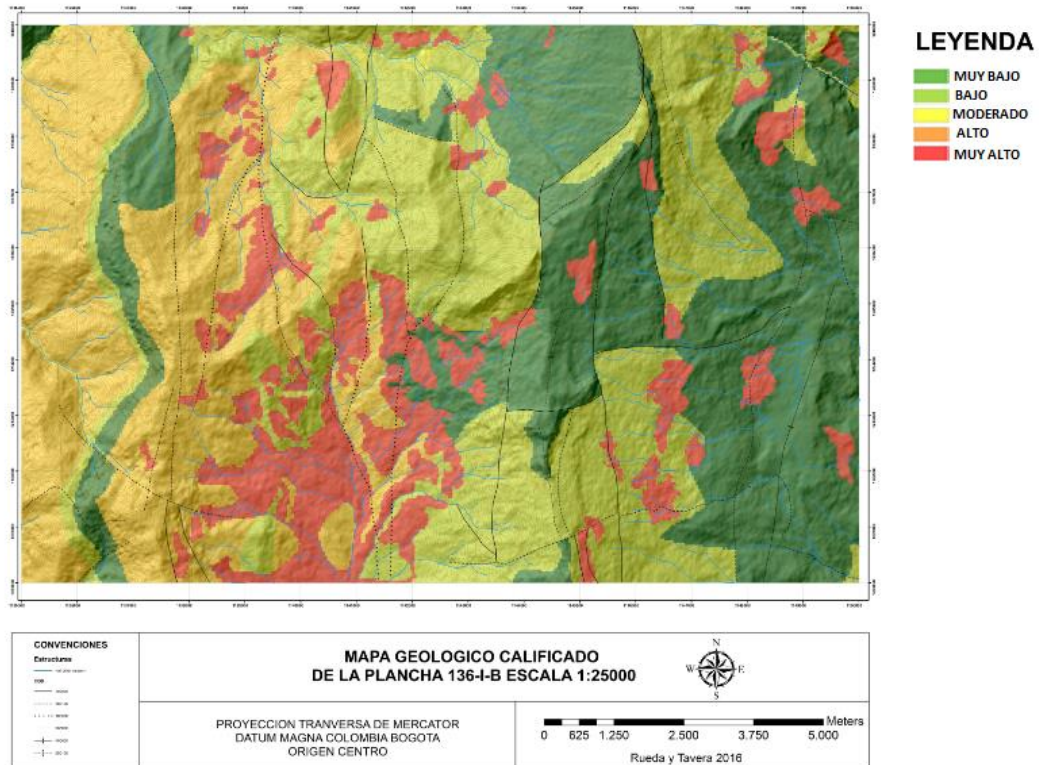
## **8. INSUMOS CALIFICADOS PARA LA SUSCEPTIBILIDAD**

El análisis de los factores causantes -o insumos de entrada- permite conocer la relación entre el comportamiento de cada clase y los movimientos en masa que se encuentran. De esta manera, se puede analizar cuáles son los factores causales más representativos y con mayor influencia sobre la estimación de la susceptibilidad a movimientos en masa, aplicando la Lógica Difusa. Los insumos que tomamos en este trabajo son la geología, la morfogénesis, la morfo dinámica, la morfometría en sus tres componentes (rugosidad, acuenca, pendientes), la curvatura, la densidad de fractura-miento y las unidades geológicas superficiales UGS

### **8.1. GEOLOGÍA**

A partir de la calificación realizada al insumo de geología (anexo f), donde se tiene en consideración la textura, resistencia y calificación del suelo (anexo e) se determinan las zonas más sensibilidad a presentar movimientos en masa, siendo las zonas de menor influencia en donde se encuentra la Formación Tibú-Mercedes, y las zonas con mayor influencia, las asociadas a depósitos cuaternarios coluviales (Qc). En la Figura 64, se muestra el insumo de Geología calificado.

**Figura 63. Mapa geológico calificado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa (SLD).**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “muy bajo”, con un 31% del área total; seguido por el atributo “bajo”, con 30%; el “alto”, con un 24%; el “muy alto”, con el 14%, y finalmente, el atributo “moderado”, con el 1% del área. En la figura 65, se muestra en un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad asociados al mapa geológico, y en la Tabla 8 se muestra la cantidad de área en metros cuadrados en relación a cada grado de susceptibilidad.

Figura 64. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Geología”, en relación a las clases de susceptibilidad.

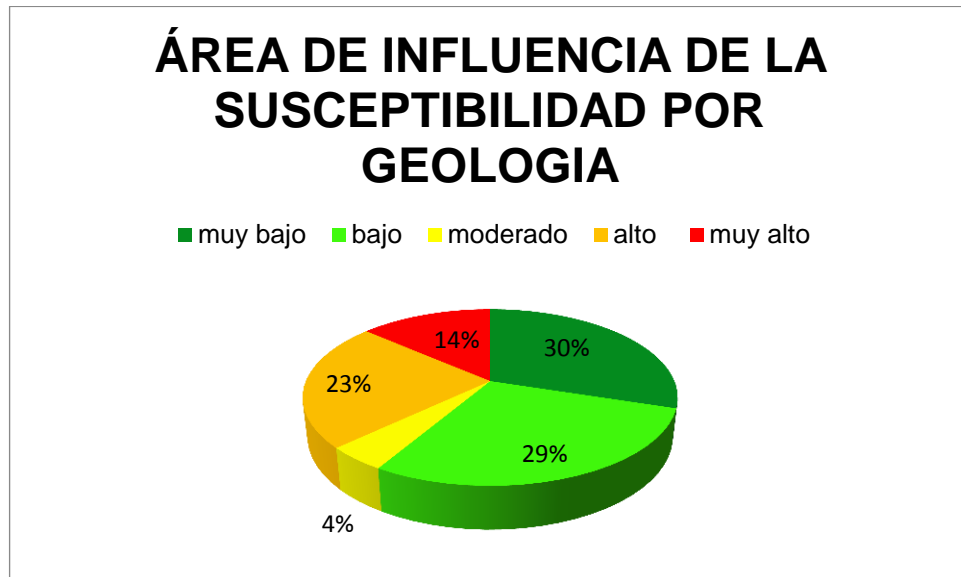


Tabla 9. Influencia del área asociada a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Geología”.

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	4'665.750
bajo	2	4'474.609
moderado	3	697.187
alto	4	3'653.969
muy alto	5	2'125.750

## 8.2. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

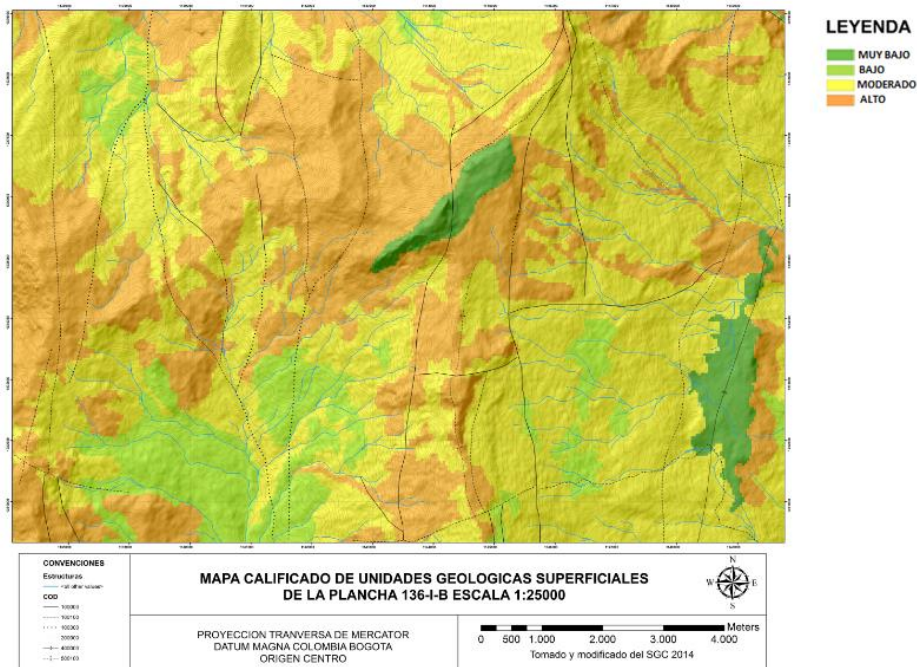
La calificación de las diferentes Unidades Geológicas Superficiales permite ver el grado de meteorización de la roca en superficie, asignándoles valores de susceptibilidad propuestos en la siguiente tabla.

**Tabla 10. Asignación de los valores de susceptibilidad a las UGS.**

COD	Nombre	Calificación
Sr	Suelo Residual	3
St	Suelo Transportado	2
Sc	Suelo Coluvial	2
So	Suelo Orgánico	4
R	Roca	1

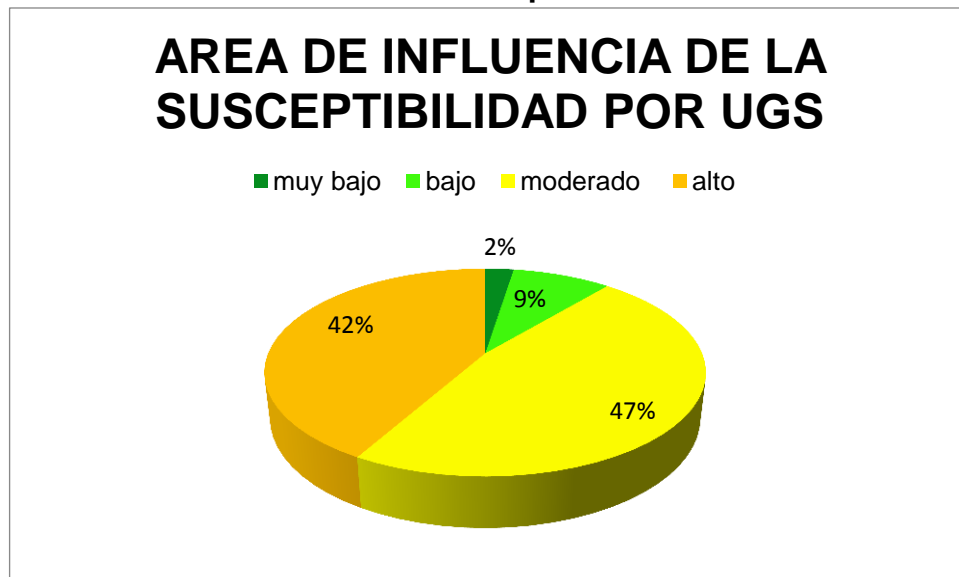
El mapa de Unidades Geológicas Superficiales permite ver que el grado de susceptibilidad menor se encuentra en los cascos urbanos de los municipios de Málaga y Molagavita, junto con áreas donde la roca está intacta y no ha sufrido ningún grado de meteorización; en cambio, las zonas con mayor susceptibilidad son aquellas donde el suelo es orgánico, siendo esta clase la que predomina. En la Figura 66 se observa el mapa de UGS calificado en términos de susceptibilidad.

**Figura 65. Mapa calificado, en términos de susceptibilidad, de las Unidades geológicas superficiales, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “moderado”, con un 47% de la superficie total; seguido por el atributo “alto”, con 42%; el atributo “bajo”, con un 9%, y finalmente, por el atributo “muy bajo”, con el 2% del área. En la Figura 67, se muestra en un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de Unidades Geológicas Superficiales, y en la Tabla 10 se muestra la cantidad de área en relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 66. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de las UGS, en relación a los términos de susceptibilidad.**



**Tabla 11. Área asociada a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “UGS”.**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	3'748.281
bajo	2	1'292.344
moderado	3	7'063.890
alto	4	6'258.734

### 8.3. PENDIENTES

El mapa de pendientes hace referencia al grado de inclinación que presenta la ladera, donde a mayor pendiente, mayor susceptibilidad por movimientos hay. Este mapa se elaboró mediante el procesamiento del DEM con la herramienta SLOPE, que se encuentra en ArcGIS, con la que reclasificó siguiendo el “Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000” (SGC, 2013), dado una calificación a rangos establecidos.

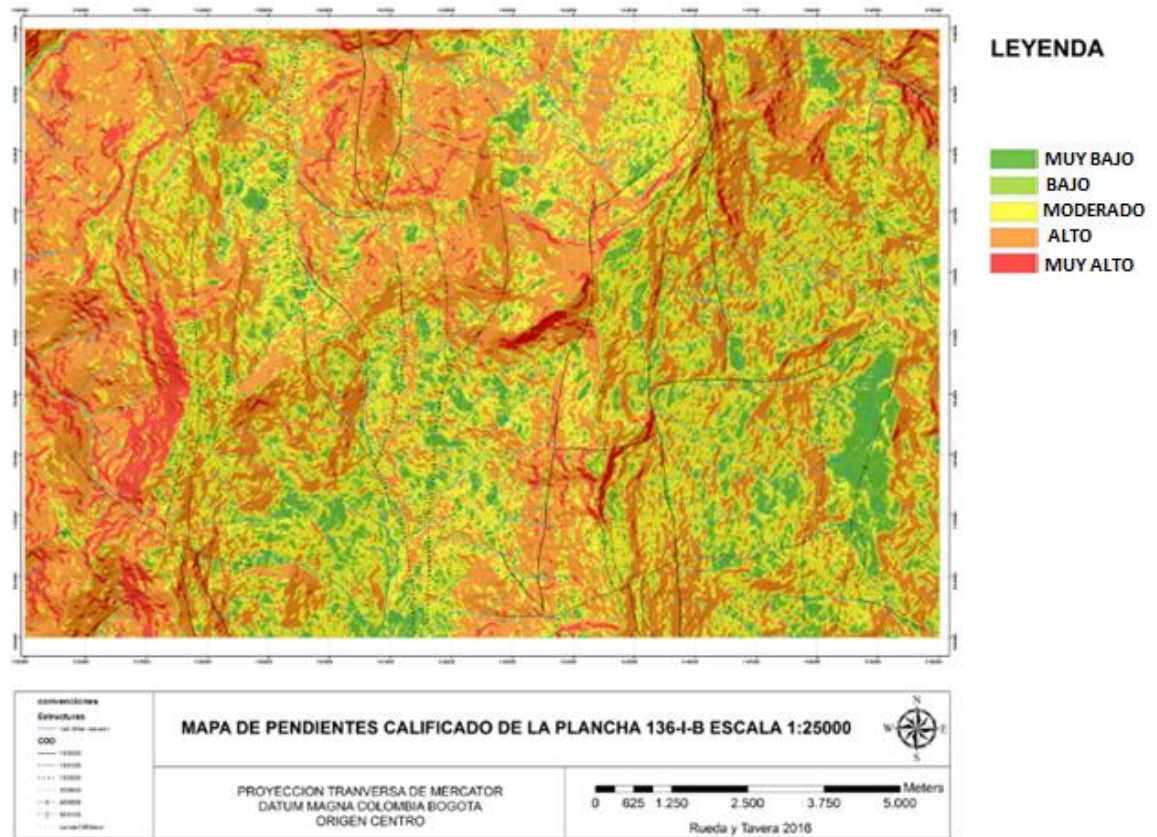
La clasificación de la susceptibilidad por movimientos en masa se observa en la Tabla 11, donde se plantean los rangos y los valores de susceptibilidad asociados.

**Tabla 12. Rangos en grados, asociados a los valores de susceptibilidad.**

RANGO EN GRADOS	CALIFICACION	DESCRIPCION	SUSCEPTIBILIDAD
(0-7)	1	PLANA A SUAVEMENTE INCLINADA	1
(7-11)	2	INCLINADA	2
(11-19)	3	MUY INCLINADA	3
(19-40)	4	ABRUPTA	4
>40	5	ESCARPADA	5

A continuación, en la Figura 68, se observa el mapa de pendientes en términos de la susceptibilidad abarcando los valores de las clases, desde muy baja hasta muy alta, para el factor “Pendientes”.

**Figura 67. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de pendientes, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “bajo”, con un 34% del área total; seguido por el atributo “moderado”, con 26%; el “muy bajo”, con un 23%; el “alto”, con 14% y finalmente, por el atributo “muy alto”, con el 3% del área. En la Figura 69, se muestra un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos, en términos de susceptibilidad asociados al mapa de pendientes, y en la Tabla 12 se muestra el área en relación a cada grado de susceptibilidad.

Figura 68. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de las pendientes, en relación a los términos de susceptibilidad.

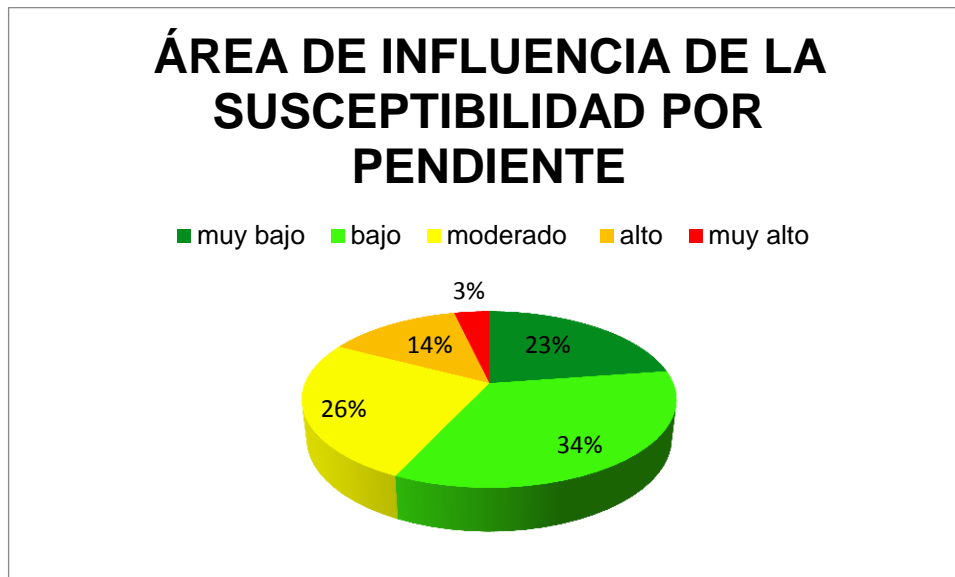


Tabla 13. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Pendientes”.

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	3'415.406
bajo	2	5'154.875
moderado	3	3'865.531
alto	4	2'062.891
muy alto	5	5'450.781

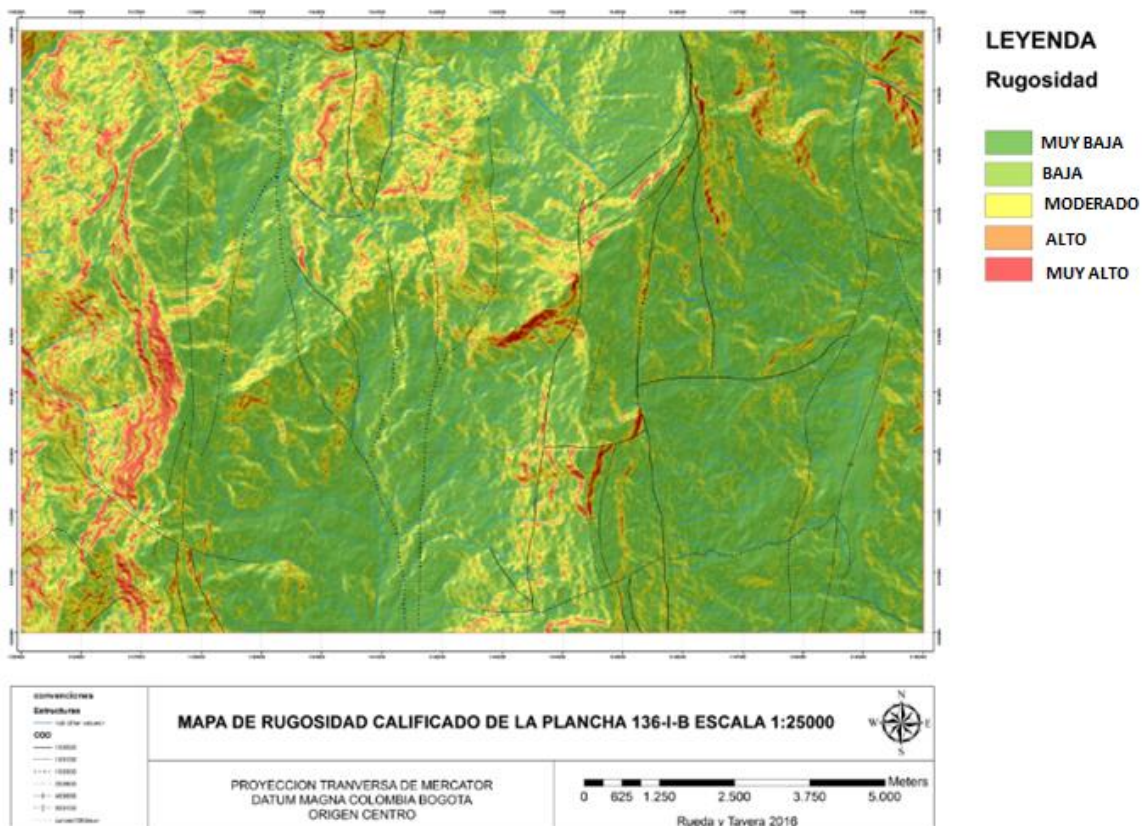
#### 8.4. RUGOSIDAD

La rugosidad se define como la variación de la pendiente en un área, y se representa como la desviación de un vector normal hacia la superficie. De esta

manera, se define mejor la rugosidad en los cambios de taludes de crestas y valles.

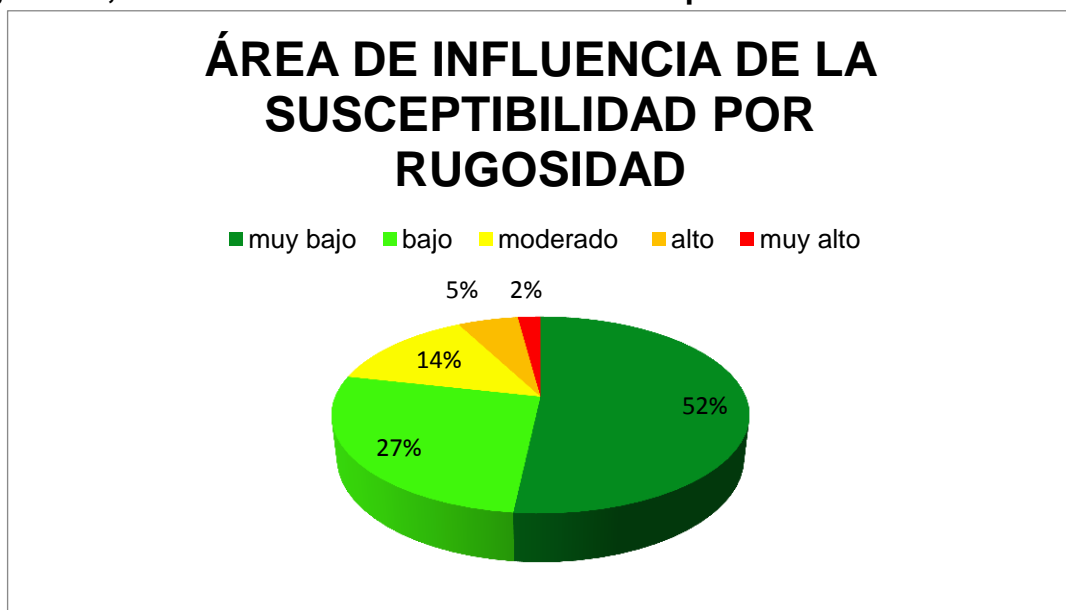
La calificación de este insumo fue seguida por el “*Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2013). Los valores altos de susceptibilidad están asociados en su mayoría a los escarpes en contra de la pendiente y geoformas asociadas a control estructural, mientras que las zonas más verdes, están relacionadas a geoformas de tipo denudacional. En la Figura 70, se observa el mapa de rugosidad calificado en términos de la susceptibilidad.

**Figura 69. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de rugosidad, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “muy bajo”, con un 52% del área total; seguido por el atributo “bajo”, con 27%; el “moderado”, con un 14%, el “alto”, con 5 % y finalmente, por el atributo muy alto, con el 2% del área. En la Figura 71, se muestra en un diagrama de torta, los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de rugosidad, y en la Tabla 13 se muestra el área en relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 70. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la rugosidad, con relación a los términos de susceptibilidad**



**Tabla 14 Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Rugosidad”.**

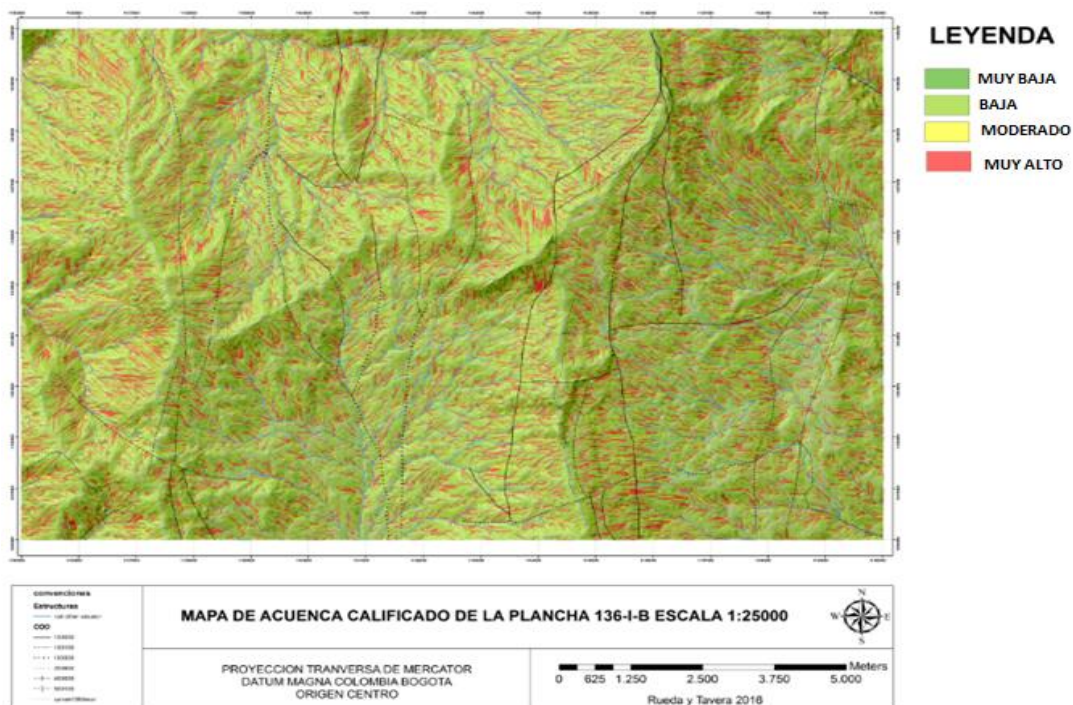
TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	10'489.063
bajo	2	4'028.562
moderado	3	2'075.453
alto	4	8'432.188
muy alto	5	3'157.813

## 8.5. ACUENCA

El insumo de “Acuena” calificado representa la acumulación de flujo por unidad de área. Las zonas de baja susceptibilidad son aquellas donde el agua tiende a fluir de manera más rápida y no hay acumulación de flujo, como los parte-aguas y las zonas de drenaje natural; mientras que las zonas de mayor acumulación de agua, o donde no tiene mayor dificultad a fluir, son las zonas de muy alta susceptibilidad que, a su vez, se asocian a sectores cercanos a las zonas de descarga.

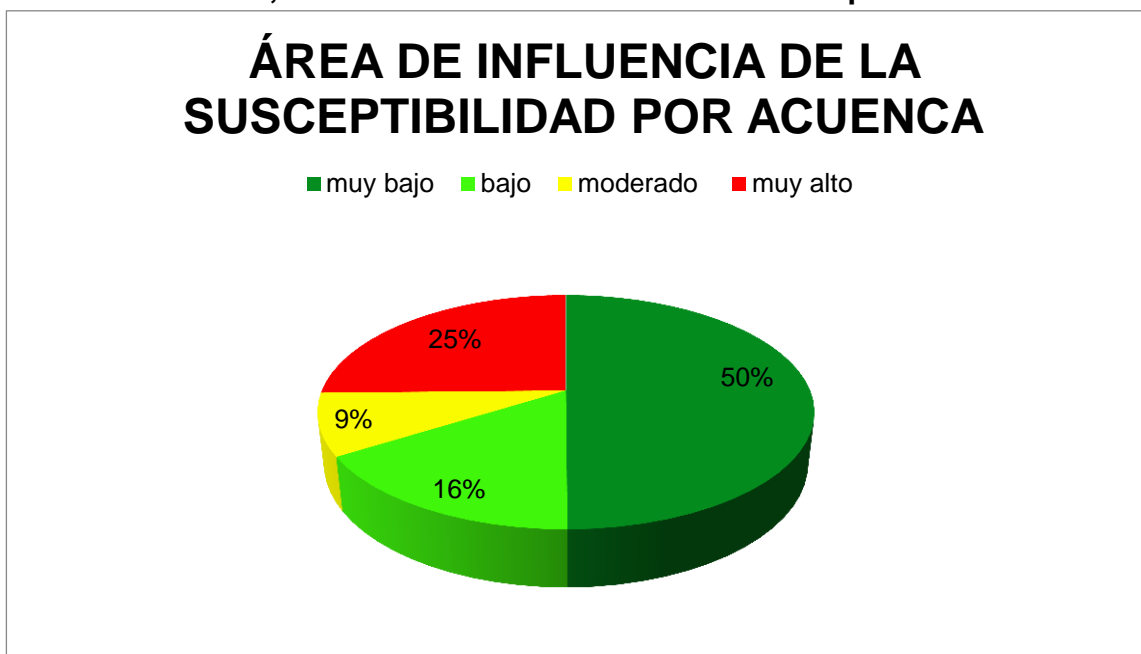
La elaboración y calificación de este insumo se realizó a partir del “*Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*” (SGC, 2013). En la Figura 72, se observa el mapa de rugosidad, calificado en términos de la susceptibilidad.

**Figura 71. Mapa calificado en términos de susceptibilidad del factor “Acuena”, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “muy bajo”, con un 50% del área total; seguido por el atributo “muy alto”, con 25%; el “bajo”, con un 14% y finalmente, por el atributo “moderado”, con el 9% del área. En la Figura 73, se muestra un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de acuenca, y en la Tabla 14 se muestra el área de influencia con relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 72. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Acuenca”, con relación a los términos de susceptibilidad**



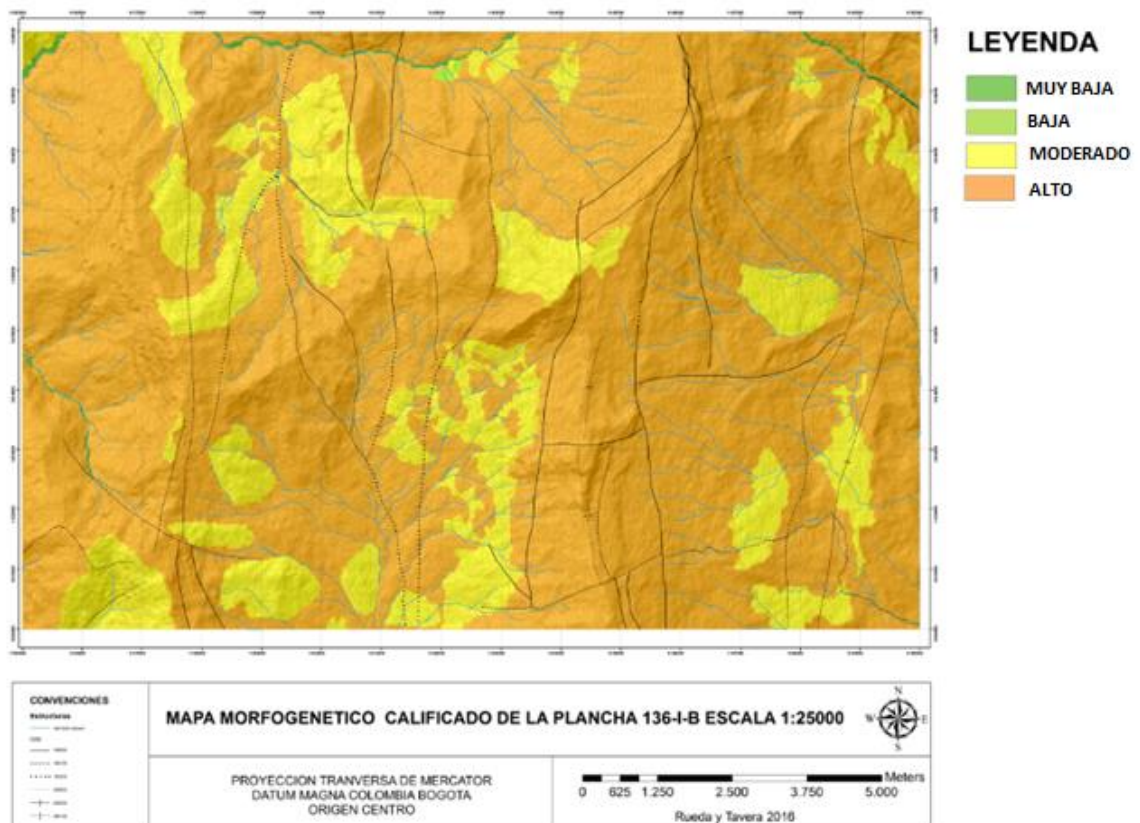
**Tabla 15. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Acuenca”**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	2'392.344
bajo	2	9'872.610
moderado	3	5'697.188
muy alto	5	2'209.109

## 8.6. MORFOGÉNESIS

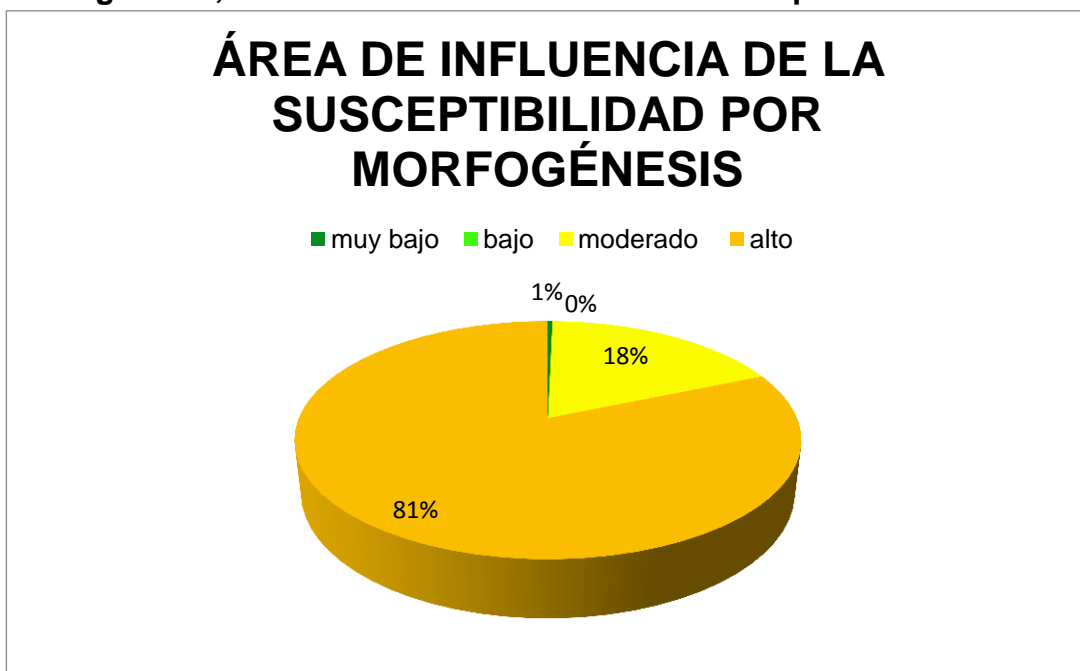
El insumo de Morfogénesis está dado por la calificación de cada una de las unidades geomorfológicas, descritas en este trabajo, asignándoles valores preestablecidos a cada geoforma en términos de susceptibilidad, propuestos por el “Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000” (SGC, 2013) y el Semillero de Geomorfología de la UIS (ver anexo D). De esta manera, las zonas con mayor susceptibilidad por movimientos en masa están asociadas a geoformas de tipo estructural y denudacional, mientras que las de muy baja susceptibilidad están asociadas a ambientes fluviales, en especial a cauces activos (Fca). En la Figura 74, se observa el mapa morfogenético, calificado en términos de la susceptibilidad.

**Figura 73. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de “Morfogénesis”, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “alto”, con un 81% del área total; seguido por el “moderado”, con 18%, y el “muy bajo” y “bajo”, que suman un 1% del área total. En la Figura 75, se muestra un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de morfogénesis, y en la Tabla 15 se muestra el área con relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 74. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la Morfogénesis, con relación a los términos de susceptibilidad.**



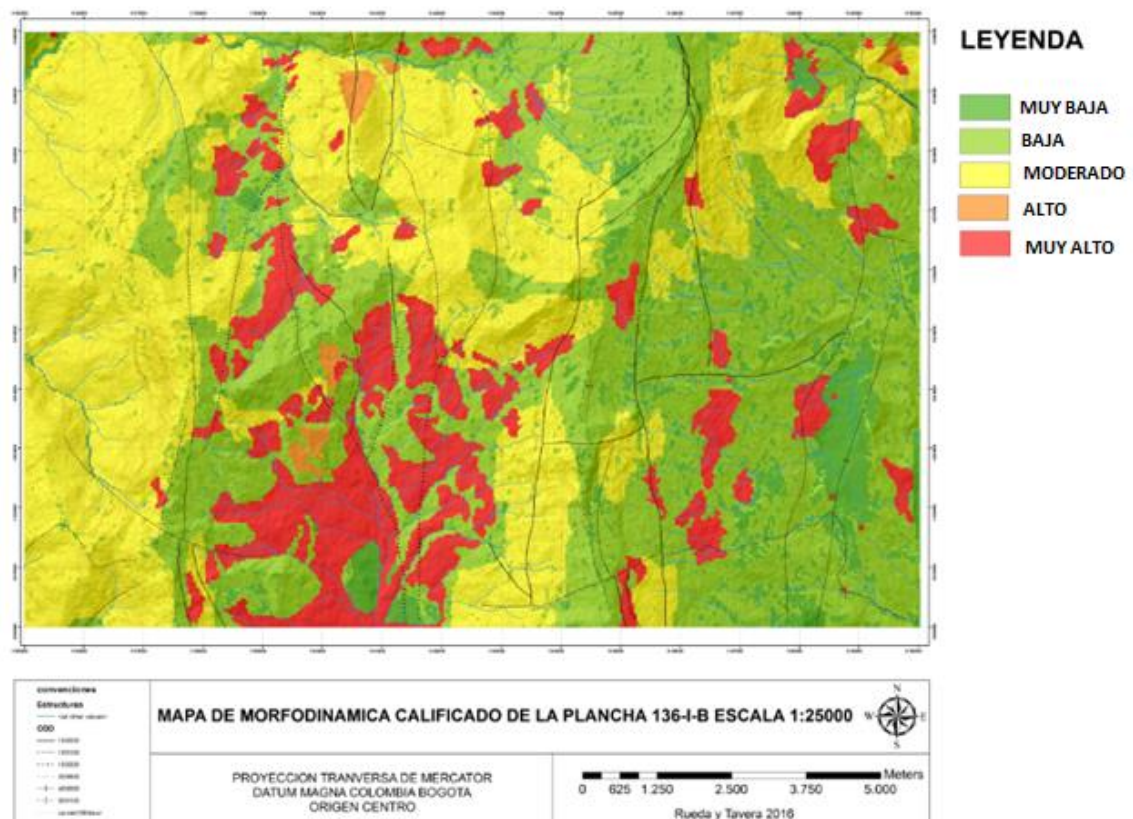
**Tabla 16. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Morfogénesis”.**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	529.843,8
bajo	2	53
moderado	3	27'421.250
alto	4	121'859.800

## 8.7. MORFODINÁMICA

El mapa de Morfodinámica está dado por la inclinación de la ladera y el relieve relativo (Relaincli), e involucra todos los rangos de susceptibilidad, asociando la clase de muy baja susceptibilidad a zonas con una pendiente moderada y/o donde no ha habido movimientos en masa; mientras que la clase de susceptibilidad muy alta, está asociada a las geoformas relacionadas a depósitos, junto con los movimientos en masa inventariados en campo (Figura 76).

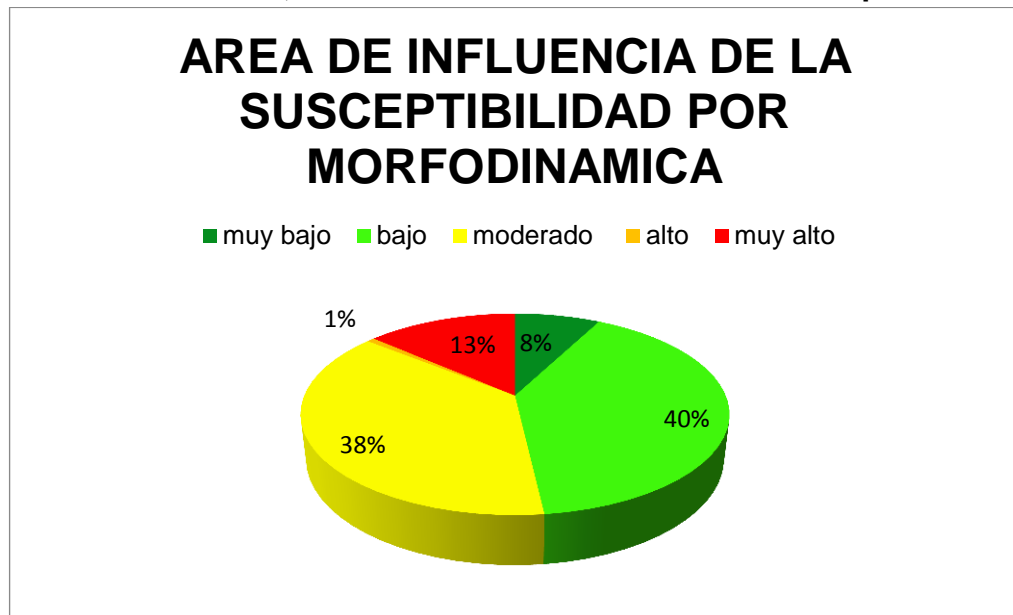
**Figura 75. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de Morfodinámica como parámetro de entrada para el SLD**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “bajo”, con un 40% del área total; seguido por el atributo “moderado”, con 38%, el “muy alto”, con 13%, el “muy

bajo”, con 8% y finalmente, el atributo “alto”, con un 1% del área total. En la Figura 77, se muestra un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de morfodinámica, y en la Tabla 16 se muestra el área con relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 76. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia del factor “Morfodinámica”, con relación a los términos de susceptibilidad**



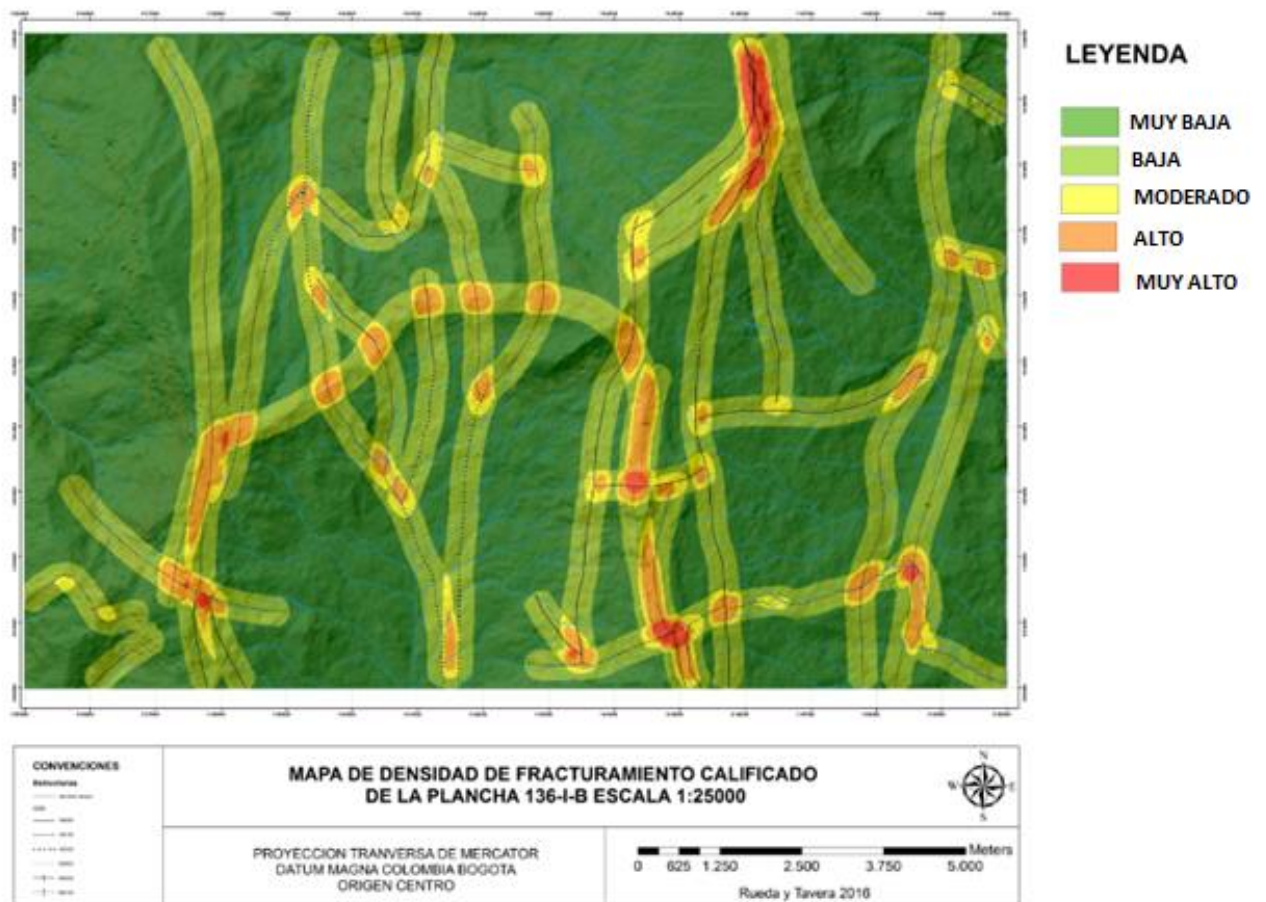
**Tabla 17. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Morfodinámica”.**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	1'153.719
bajo	2	6'097.000
moderado	3	5'654.844
alto	4	1'008.750
muy alto	5	2'037344

## 8.8. DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO

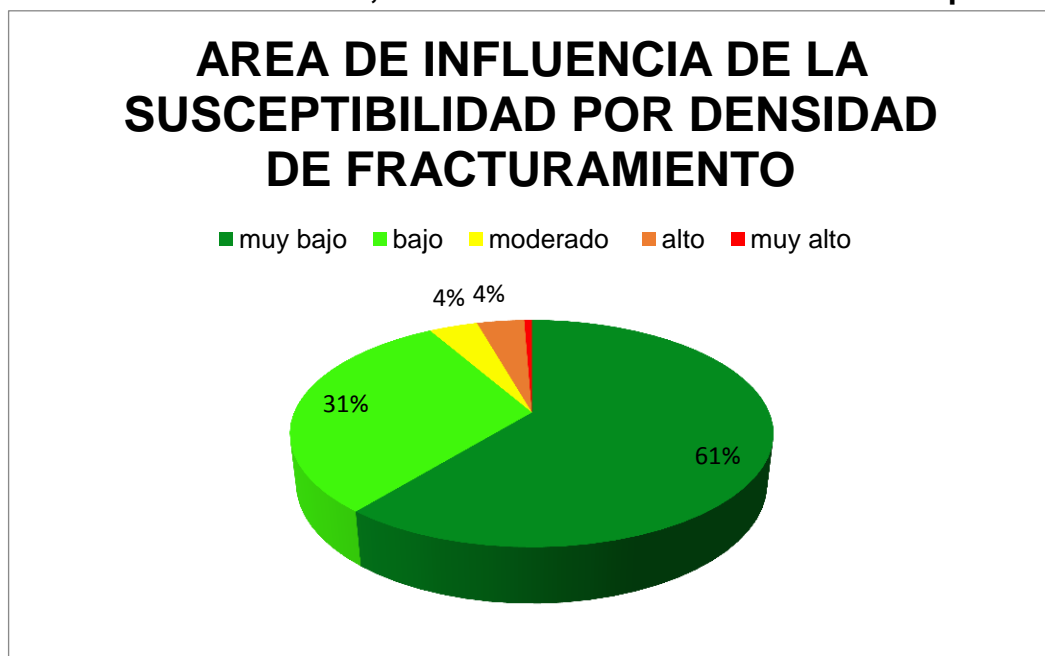
El mapa de densidad de fracturamiento está dado por el área de influencia que poseen las fallas que se encuentran en la zona; es decir, que las zonas más cercanas a dichas fallas van a tener mayor susceptibilidad que las zonas alejadas de ellas. A escala 1:25.000, el radio usado para calcular este mapa fue de 250 m. De esta manera las zonas con una susceptibilidad muy alta se encuentran en la intersección de 2 o 3 fallas, y las zonas de susceptibilidad muy baja se encuentran en zonas muy alejadas a este control estructural (Figura 78).

**Figura 77. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de densidad de fracturamiento, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “muy bajo”, con un 61% del área total; seguido por el “bajo”, con 31%; las clases “moderado” y “alto”, con un 4% cada uno, y finalmente, con un 1% está el “muy alto”. En la Figura 79, se muestra un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos, en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de densidad de fractura miento, y en la Tabla 17 se muestra el área con relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 78. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la densidad de fractura miento, con relación a los términos de susceptibilidad.**



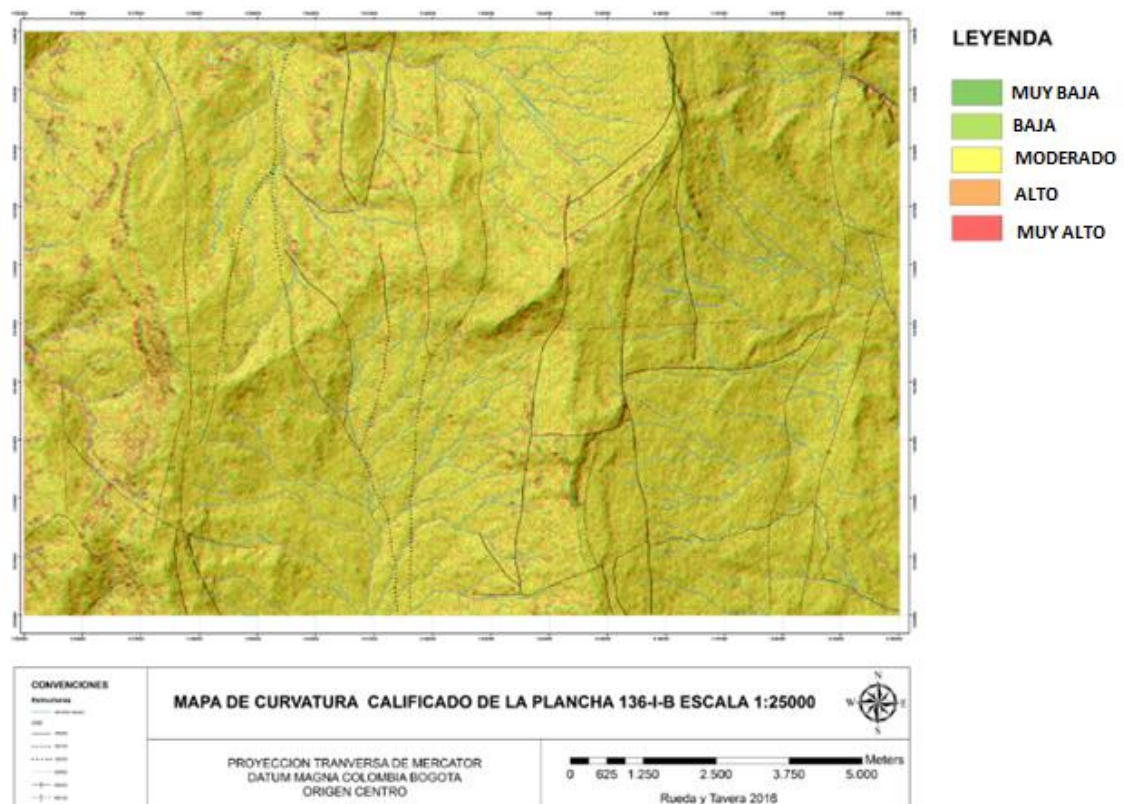
**Tabla 18. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Densidad de fractura miento”.**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	9'164.938
bajo	2	4'630.812
moderado	3	5'856.719
alto	4	5'704.063
muy alto	5	918.750

## 8.9. CURVATURA

El mapa de Curvatura calificado, está dado por la segunda derivada de la superficie, donde se muestran de manera general las zonas de curvatura convexa (susceptibilidad baja) junto con las zonas de curvatura cóncava (susceptibilidad alta) de toda el área de estudio. En la Figura 80 se observa el mapa de curvatura calificado en términos de la susceptibilidad.

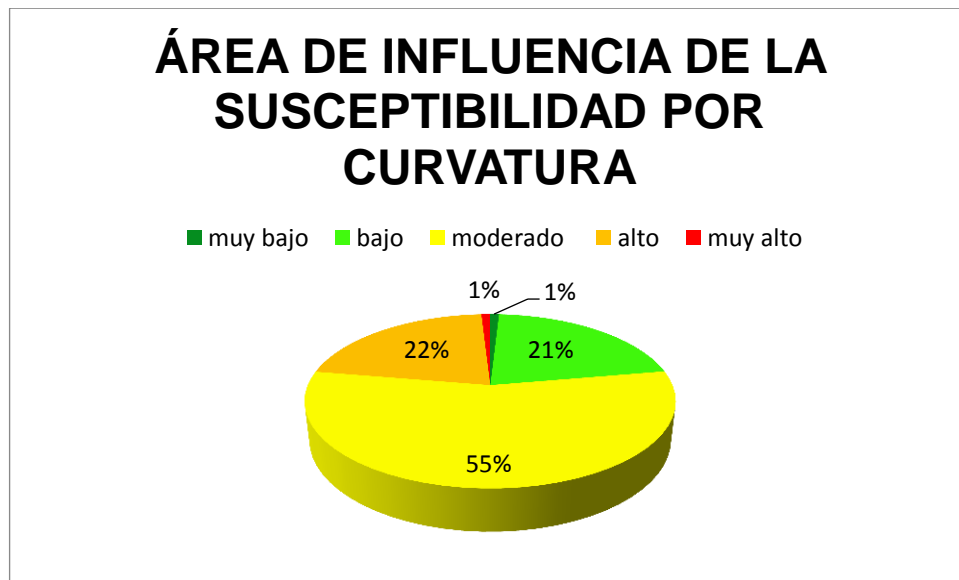
**Figura 79. Mapa calificado en términos de susceptibilidad de curvatura, como parámetro de entrada para el SLD.**



El atributo con mayor extensión está dado por la clase “moderado”, con un 55% del área total; seguido por el atributo “alto” con 22%; el “bajo”, con un 21%, y las clases “muy bajo” y “muy alto” con un 1 % cada una. En la Figura 81, se muestra

un diagrama de torta con los porcentajes de cada uno de los atributos en términos de susceptibilidad, asociados al mapa de curvatura, y en la Tabla 18 se muestra el área con relación a cada grado de susceptibilidad.

**Figura 80. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia de la curvatura, con relación a los términos de susceptibilidad.**



**Tabla 19. Áreas asociadas a cada una de las clases de susceptibilidad, asignadas al factor “Curvatura”.**

TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	1'371.563
bajo	2	3'216.750
moderado	3	8'323.625
alto	4	3'226.859
muy alto	5	1'393.906

## 9. APLICACIÓN DE LA LOGICA DIFUSA PARA ESTIMACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA

### 9.1. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA USANDO EL SOFTWARE FUZZYCELL.

El mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa fue generado con la ayuda del software FuzzyCell, desarrollado por Yanar & Akyürek (2006). Este fue diseñado como una extensión de ArcGIS, con el objetivo de equiparlo con una herramienta que fuese capaz de aplicar la teoría de la Lógica Difusa en sus funciones. Una interfaz gráfica del programa se puede ver en la Figura 82. En esta, se aprecia que el diseño del Sistema de Inferencia consta de siete pasos:

**Figura 81. Interfaz gráfica del software, FuzzyCell, desarrollado por Yanar & Akyürek (2006). Tomada de Aydin & Eker (2016).**

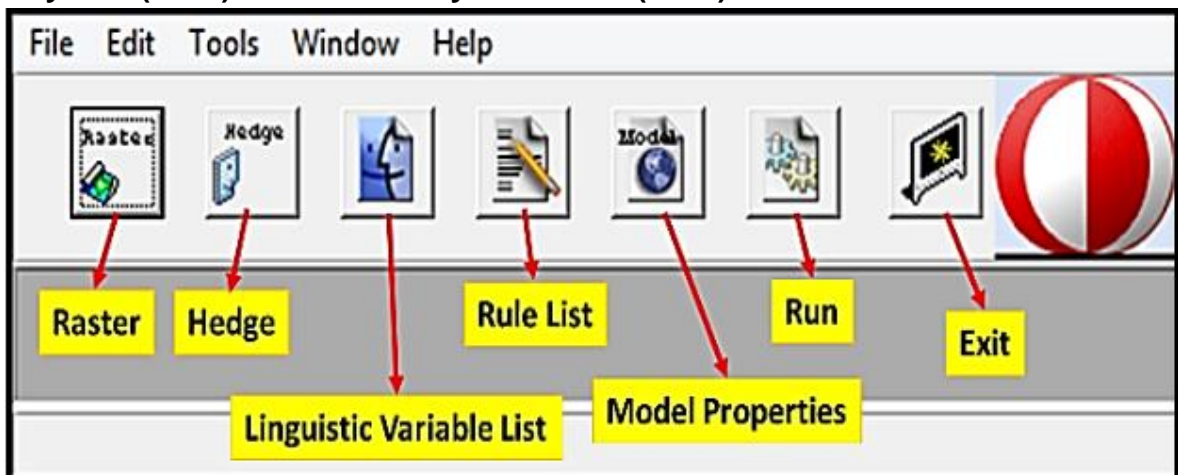
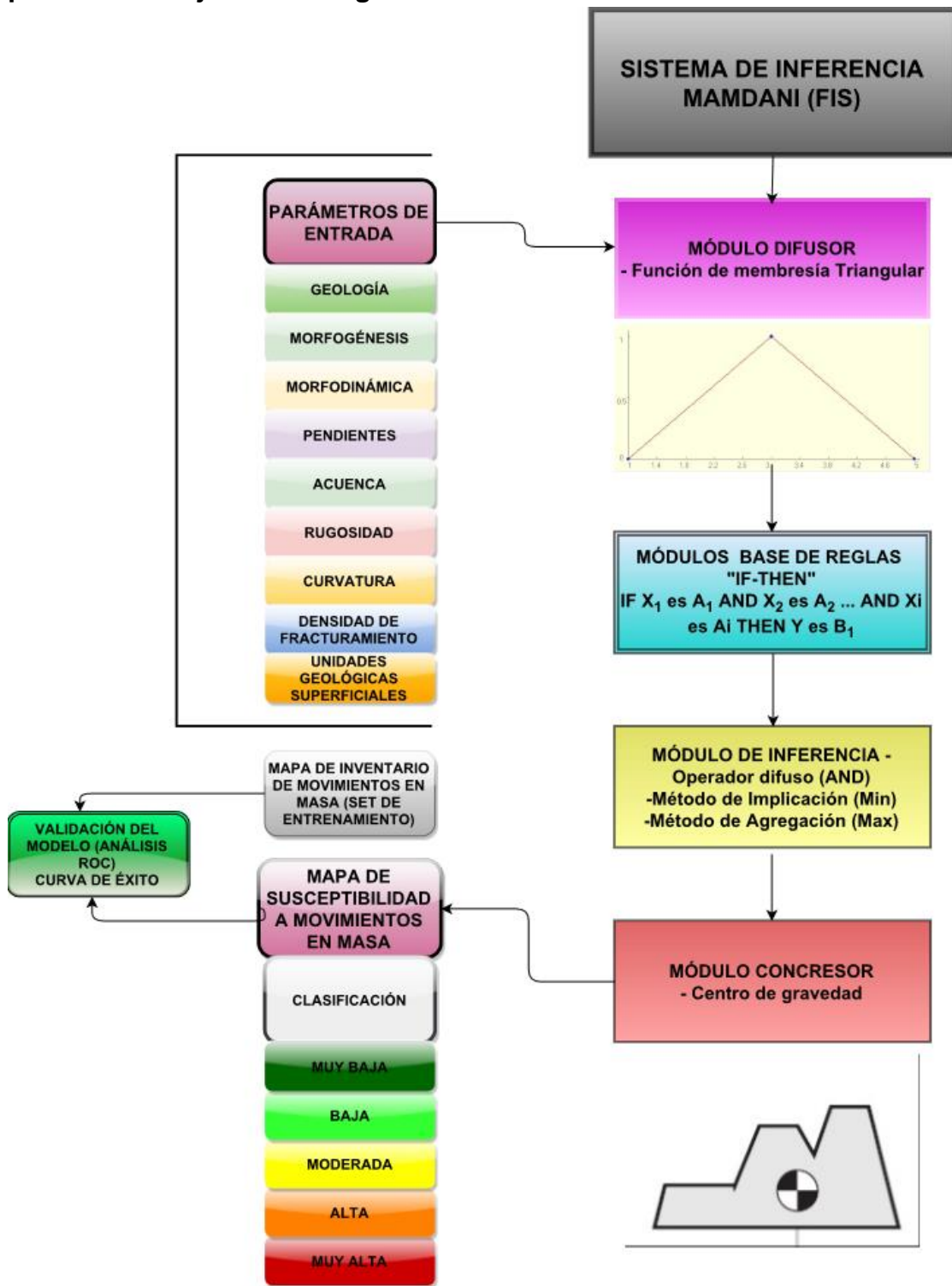
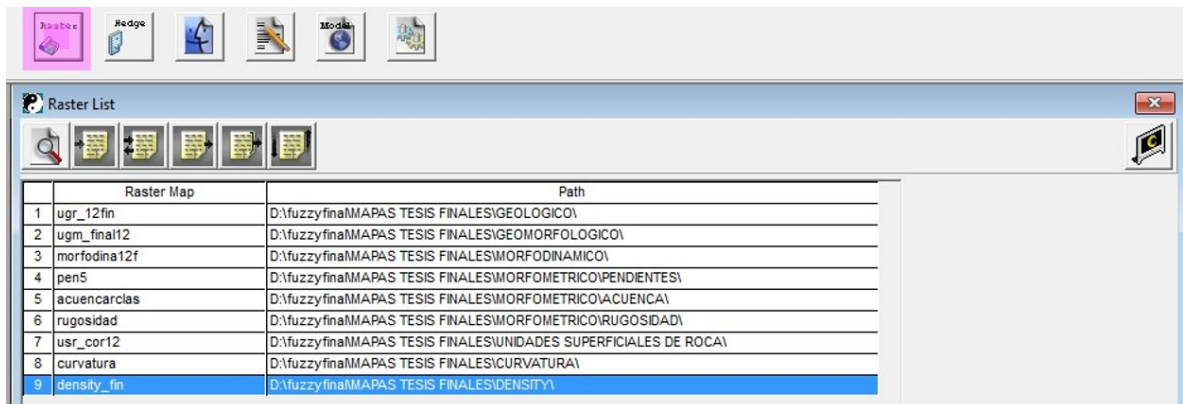


Figura 82. Flujoograma del Sistema de Lógica Difusa (o Sistema de Inferencia) tipo Mamdani, para el trabajo de investigación actual. Desarrollado para el presente trabajo de investigación.



**9.1.1. Raster.** El primer paso para la elaboración del sistema difuso. Esta opción permitió cargar las capas temáticas de los factores causales de movimientos en masa, elaborados en el software ArcGis (10), en formato Raster. Estas fueron: “Geología”, “Morfodinámica”, “Morfogénesis”, “Pendientes”, “Acuenca”, “Rugosidad”, “Curvatura”, Densidad de fracturamiento (Denfrac)” y “Unidades Geológicas Superficiales (UGS)” (Figura 83). Cada una de estas corresponde a las variables lingüísticas de entrada del Sistema de Lógica Difusa. En la Figura 84 se muestra un ejemplo con todas las variables cargadas.

**Figura 83. Ilustración de la opción “Raster List” (resaltado de color rosa) de FuzzyCell (Yanar & Akyürek, 2006). Permite cargar los mapas de las variables de entrada (i.e. capas temáticas) en formato Raster, al software. Se muestra un ejemplo con todas las variables cargadas.**



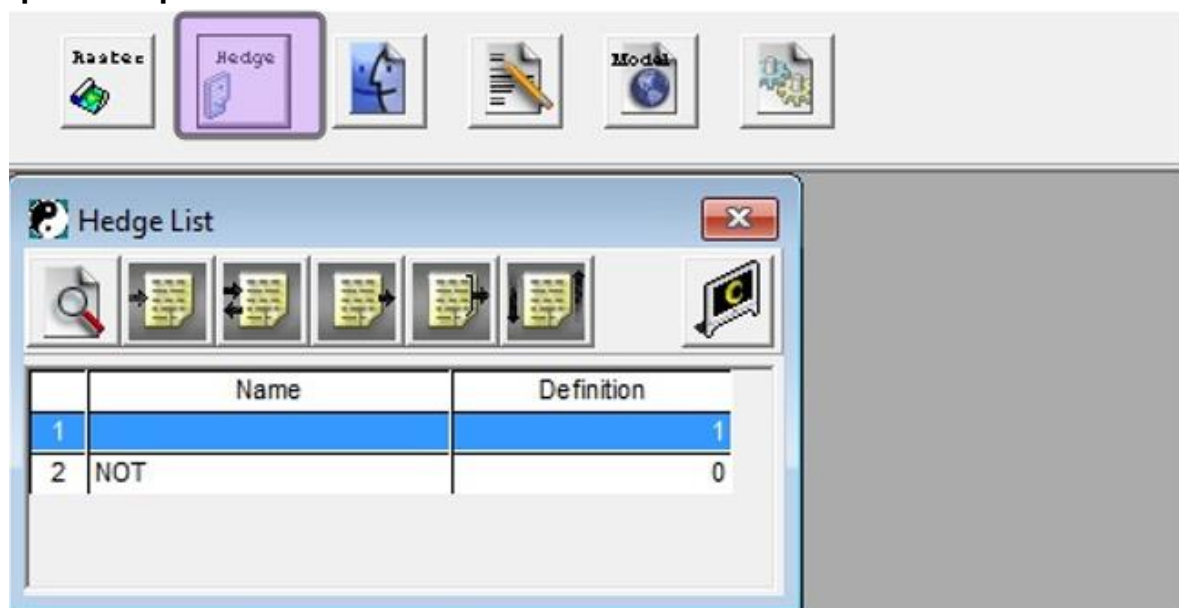
**9.1.2. Hedge.** El segundo paso para la elaboración del sistema. Hedge es un término que hace referencia a un operador usado para modificar uno o más términos lingüísticos, de una o más variables lingüísticas (Yanar & Akyürek, 2003). Por ejemplo, para la variable de entrada “Pendiente”, se tiene un término lingüístico de nombre “BAJO”. Un posible modificador para este conjunto difuso, podría denotarse como “No tan”, generando un nuevo conjunto “No tan BAJO”. Además de cambiar el nombre, el modificador cambia ligeramente la forma del

significador lingüístico del conjunto difuso; es decir, modifica su función de membrecía por medio de expresiones matemáticas.

Por defecto, el software muestra una fila con la celda de “Nombre” en blanco, y una definición de “1”; además de otra fila con una celda de nombre “NOT”, con una definición de “0” (Figura 85). La primera fila simplemente representa el caso en que el conjunto difuso se está evaluando en su totalidad (*i.e.* sin ningún tipo de modificador). La segunda fila en cambio, se usa para cuando se quiere evaluar el complemento de ese respectivo término lingüístico: es decir, todos aquellos elementos del universo de la variable lingüística evaluada, que no pertenezcan a ese conjunto difuso.

En este trabajo, no se agregó ningún tipo de modificador para los conjuntos difusos, además de los descritos previamente, que son predeterminados.

**Figura 84. Ilustración de la opción “Hedge List”. En la imagen se muestran las opciones predeterminadas: 1, corresponde a ningún modificador; mientras que 2, corresponde al conjunto complemento del conjunto difuso que acompañe.**

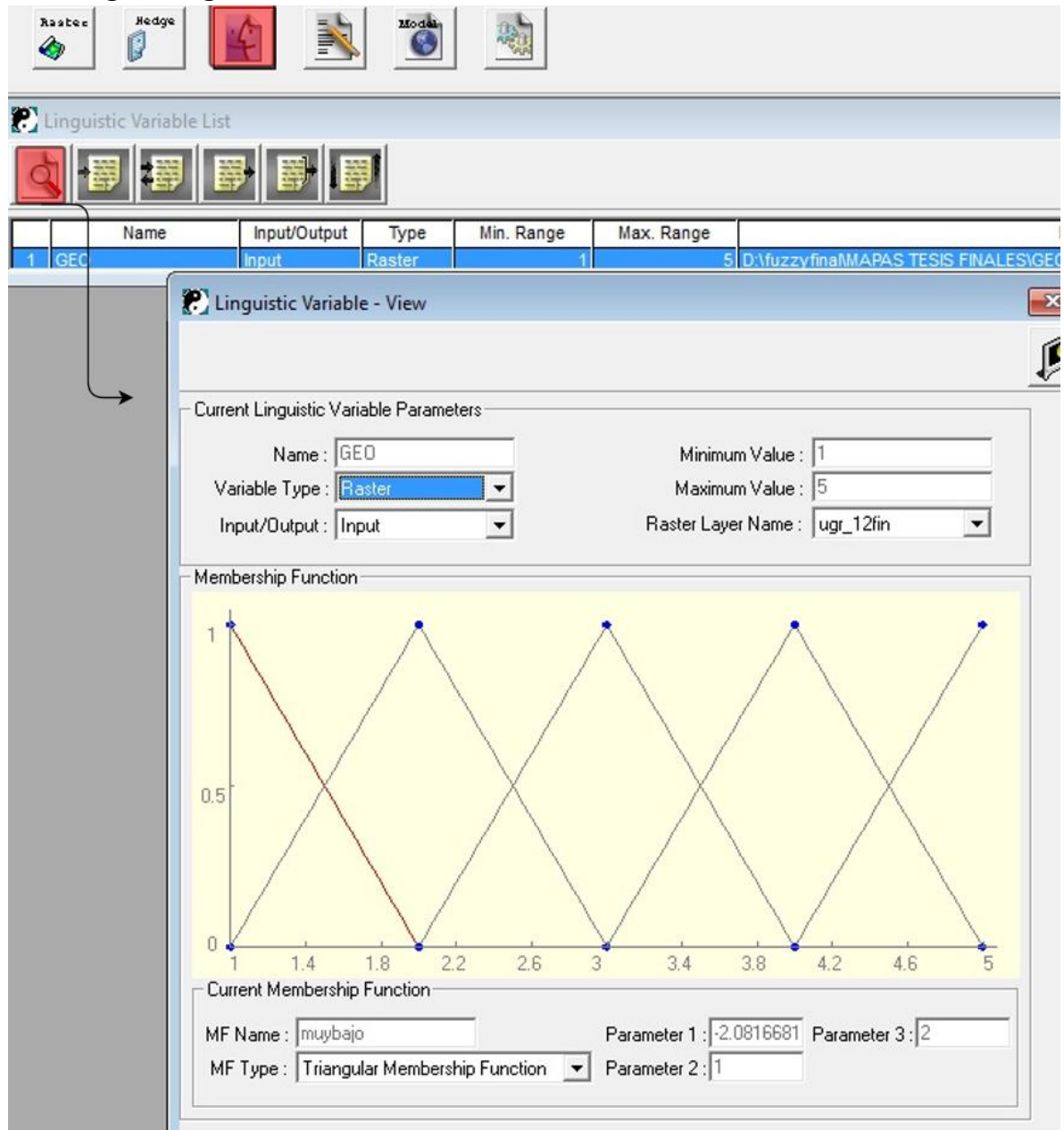


**9.1.3. Lista de variables lingüísticas.** El tercer paso para elaborar el Sistema de Inferencia. Consiste de la definición- e ingreso- de todas las variables lingüísticas (tanto de entrada como de salida) al sistema, (Figura 86 y Figura 87). Como se vio en la sección “Sistemas de Lógica Difusa” del capítulo “MARCO TEÓRICO”, cada variable lingüística está formada por cuatro parámetros: nombre, universo de discurso, términos y significadores lingüísticos.

Con la opción “insert” (a la derecha del símbolo de la lupa, resaltado de rojo) se despliega una ventana, en la que se permite definir cada una de las variables del sistema de inferencia. En esta se puede ingresar: nombre, formato de la variable (*Variable Type*), tipo de variable (*Input, Output*), el Universo de Discurso (*Minimum Value, Maximum Value*), la forma de las funciones de membrecía, o también llamado significador lingüístico (*MF Type*) y los términos lingüísticos (*MF Name*), (Figura 86).

En este paso, se definieron todas las variables del sistema (incluyendo la variable de salida, o Susceptibilidad a movimientos en masa): todas y cada una de ellas, incluyendo la de Susceptibilidad final, fueron clasificadas con una puntuación que va desde uno (1) a cinco (5) (i.e. el universo de discurso sólo comprende este intervalo de elementos); tienen funciones de membrecía triangulares, y están formadas por cinco términos lingüísticos: MUY BAJO, BAJO, MODERADO, ALTO y MUY ALTO. Luego de su definición, se cargaron en la Lista de Variables Lingüísticas (Figura 87).

Figura 85. Ilustración de la opción “Linguistic Variable List”. Tiene la función de definir parámetros como el nombre, los elementos de entrada, los términos lingüísticos y la forma de la función de cada una de las variables de entrada y de salida. Se muestra un ejemplo con la variable lingüística “Geología”, ingresada al sistema como “GEO”.



**Figura 86. Ilustración de la opción “Linguistic Variable List”. Se aprecia etapa final en la que se insertan las variables de entrada, ya definidas con todos sus elementos.**

	Name	Input/Output	Type	Min. Range	Max. Range	Raster File Path
1	GEO	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\GEOLOGICO\ugr_12fn
2	MGEN	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\GEOMORFOLOGICO\ugm_final12
3	MDINA	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\MORFODINAMICO\morfodina12f
4	PEN	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\MORFOMETRICO\PENDIENTES\pen5
5	ACU	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\MORFOMETRICO\ACUENCA\acuencarc1as
6	RUGO	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\MORFOMETRICO\RUGOSIDAD\rugosidad
7	USR	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\SUNDADES SUPERFICIALES DE ROCA\usr_cor12
8	CUR	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\CURVATURA\curvatura
9	DENSI	Input	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\MAPAS TESIS FINALES\DENSITY\density_fin
10	SUSCEP	Output	Raster	1	5	D:\fuzzyfina\ejercicoprueba\SUSCEPTIBILIDAD

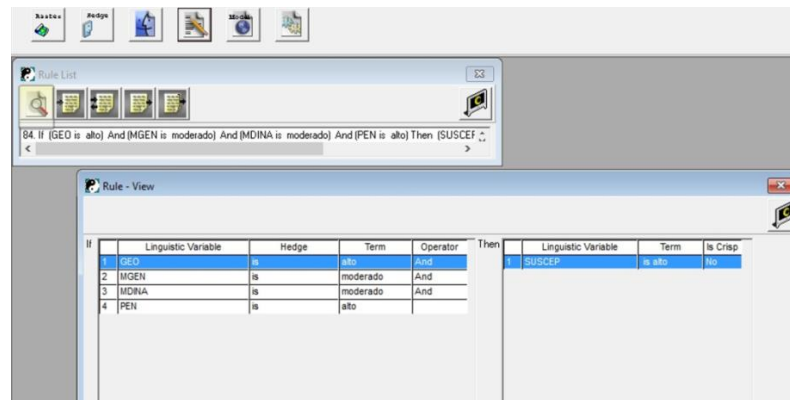
**9.1.4. Lista de Reglas.** El cuarto paso para elaborar el Sistema de Inferencia. Con esta opción, se pueden ingresar las reglas construidas a partir del conocimiento acerca del comportamiento e interacción entre las variables de entrada (Figura 88). Como se vio en la sección 7 “Sistemas de Lógica Difusa” del capítulo “MARCO TEÓRICO”, cada regla se compone de uno o más antecedentes conectados por operadores difusos, junto con un consecuente.

Con la opción “insert” (a la derecha del ícono resaltado de la lupa), se pueden escoger las variables de entrada, que se requieran para la construcción de la regla. El único requisito que el software necesita, es que cada regla tenga una salida (*i.e.* que tenga un resultado de susceptibilidad) (Figura 89)

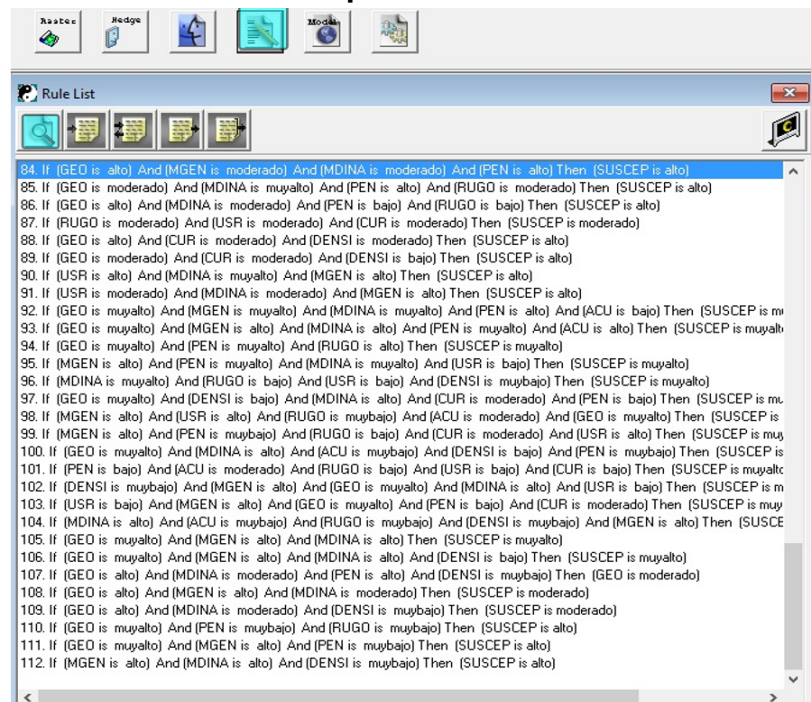
En este trabajo se usó un número de 112 reglas (ver anexo h). Es importante destacar que ninguna de ellas comprende la totalidad de las 9 variables de entrada. Estas reglas fueron implementadas mediante dos maneras. La primera de ellas fue elaborada por un barrido que se realizó por cada kilómetro cuadrado, en donde se observaron los insumos más influyentes en términos de susceptibilidad a movimientos en masa. La segunda fue creada a partir de la zonas donde se

encontraban los movimientos en masa: en estas áreas, se analizó el cómo los insumos utilizados estaban calificados de acuerdo a su aporte a la susceptibilidad a movimientos en masa.

**Figura 87. Con la opción “insert” (a la derecha del ícono de la lupa), aparece una ventana que permite cargar las variables de entrada, junto con los términos lingüísticos que se escojan para cada una, y los conectores difusos que se requieran.**



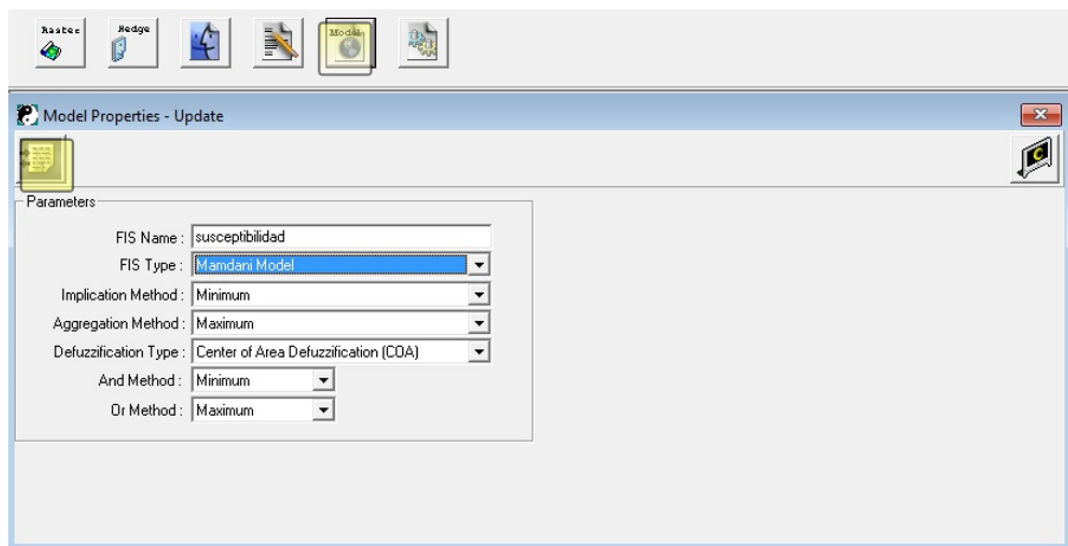
**Figura 88. Ejemplo de una sección del conjunto de 112 reglas, usadas para el modelamiento del raster de susceptibilidad a movimientos en masa.**



**9.1.5. Propiedades del Modelo.** El quinto y último paso antes de enviar la orden para calcular el mapa final de susceptibilidad. Es en esta casilla donde se ingresan los elementos que requieren el Módulo de Inferencia y el Módulo Concesor del Sistema, para poder arrojar el resultado final. Como se vio en la sección 7 “Sistemas de Lógica Difusa” del capítulo “MARCO TEÓRICO”, un Sistema de Lógica Difusa está compuesto de cuatro módulos: Difusor, Base de Reglas, Inferencia y Concesor.

Con las opciones Método de Implicación (*Implication Method*), Método de Agregación (*Aggregation Method*), Conector And difuso (*And Method*) y Conector Or Difuso (*OR Method*), se pueden elegir los operadores lógicos más convenientes para el Modulo de Inferencia, de manera que arroje el resultado más confiable. Igualmente, con la opción del Tipo de Concesor (*Defuzzification Type*), se elige el método de conversión que más se ajuste a la calidad del ejercicio (Figura 90).

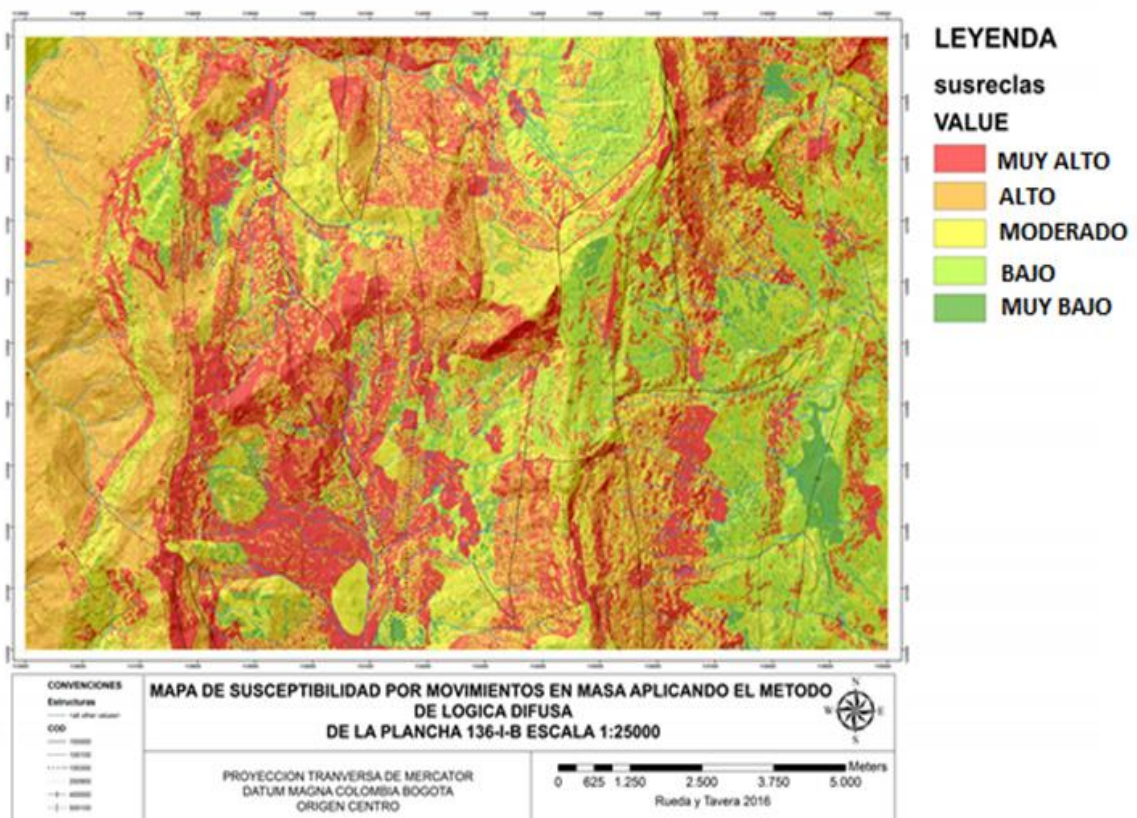
**Figura 89. Ilustración de la opción “Model Properties”.** Tiene la función de asignar la clase de operadores lógicos dentro del proceso del Módulo de Inferencia (Implicación, agregación, operadores AND y/o OR), y el método de conversión del Módulo Concesor, en el Sistema de Lógica Difusa.



## 9.2. MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

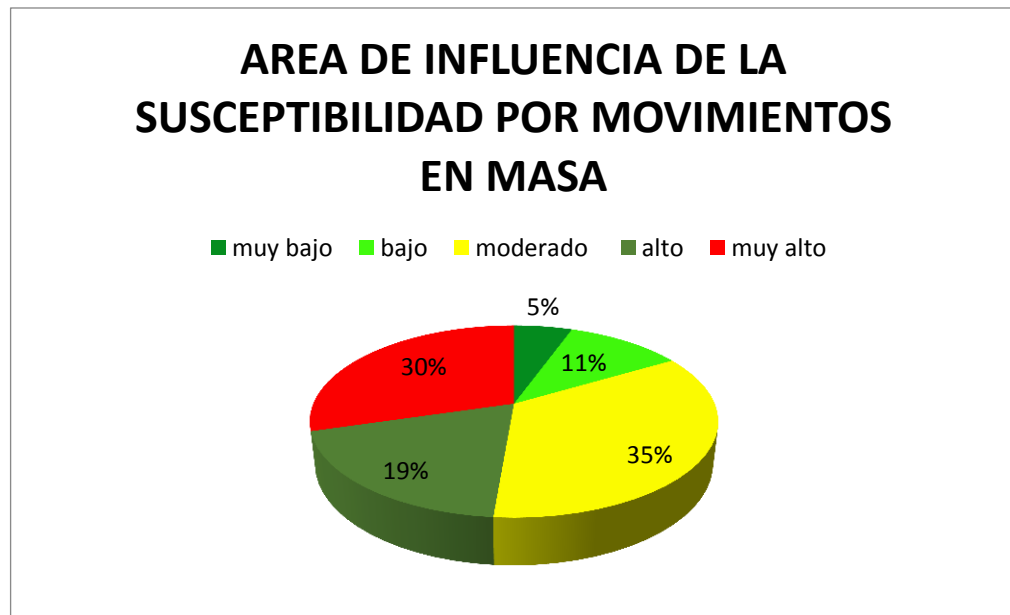
El mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando un Sistema de Inferencia basado en la teoría de la Lógica Difusa, en la plancha 136-I-B, es resultado del análisis de las interacciones entre todos los factores causantes, anteriormente descritos. Este modelo fue elaborado a partir de 80 simulaciones previas. Como resultado, el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa se muestra en cinco categorías: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto. A continuación, en la Figura 91, se muestra el mapa final de susceptibilidad mediante el procesamiento matemático de la Lógica Difusa, y su relación en cantidad de pixeles relacionados a cada clase.

**Figura 90. Mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando un Sistema de Inferencia basado en la teoría de la Lógica Difusa, de la plancha 136-I-B.**



El número del área de influencia asociado a cada tipo de susceptibilidad se muestra en la Tabla 19 y en la Figura 92, indica que la principal clase de susceptibilidad es “moderado” con 52.370.310 m<sup>2</sup>, que corresponde al 35% del área total; seguido por la clase “muy alto”, con 44.438.120 m<sup>2</sup> correspondiente al 30% del área, la clase “alto”, con 28.766.720 m<sup>2</sup> correspondiente al 19%; la clase “bajo”, con 16.566.410 m<sup>2</sup> correspondiente al 11% y finalmente, la clase “muy bajo”, con 8.296.250 m<sup>2</sup> correspondiente al 5% del área total de estudio.

**Figura 91. Diagrama de torta con los porcentajes del área de influencia por movimientos en masa.**



**Tabla 20. Términos de las clases de susceptibilidad a movimientos en masa, con su respectiva calificación y área de influencia en metros cuadrados**

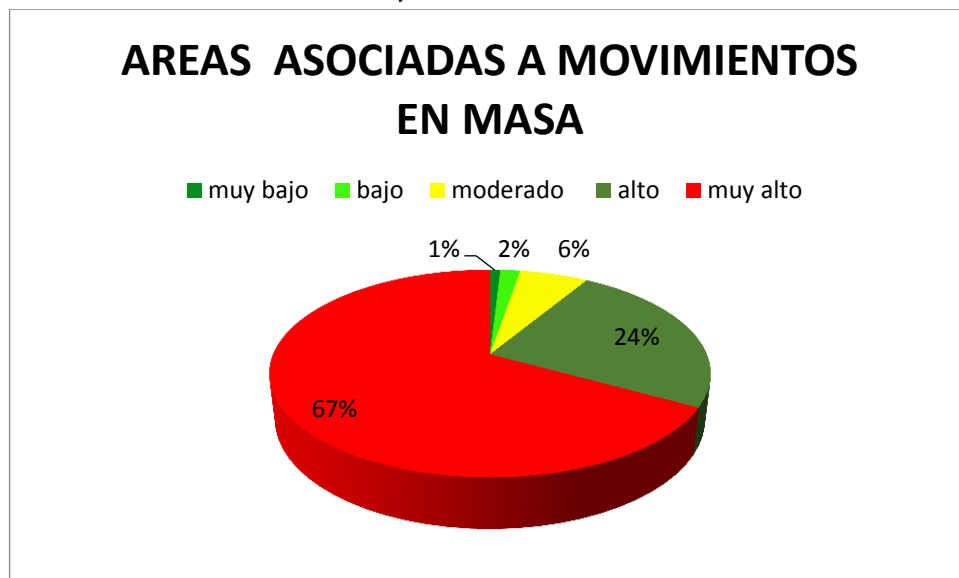
TÉRMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA EN [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	829.6250
bajo	2	16'566.410
moderado	3	52'370.310
alto	4	28'766.720
muy alto	5	44'438.120

Por otro lado, el área de influencia donde se encuentran los movimientos en masa indica que el mapa logró identificar un 75% dentro de sus categorías correspondientes (ver capítulo 12. “VALIDACIÓN DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA”). A continuación, se muestra en la Tabla 20 y en la Figura 93, las áreas en metros cuadrados asociadas a los movimientos en masa, los cuales se encuentran en cada una de las clases.

**Tabla 21. Área de influencia asociada a los movimientos en masa, a cada una de las clases.**

ÁREA DE INFLUENCIA ASOCIADOS A MM		
TERMINOS	CALIFICACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA EN [m <sup>2</sup> ]
muy bajo	1	10.000
bajo	2	19.375
moderado	3	65.937,5
alto	4	268.593,8
muy alto	5	737.343,8

**Figura 92. Diagrama de torta donde se muestran los porcentajes que contienen movimientos en masa, asociados a cada una de las clases.**



### **9.3. SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA**

Este tipo de susceptibilidad abarca un 30% del área total de la plancha, y principalmente se encuentra localizada en la parte baja, media y alta de las laderas y escarpes de la plancha. También, se encuentra asociada a los depósitos cuaternarios de tipo coluvial (Qc), cercanos a los municipios de Málaga y Molagavita.

Con relación a los componentes de Morfometría (pendientes, acuenca y rugosidad), estas zonas se encuentran ubicadas donde la pendiente toma valores desde moderado hasta muy alto, con una forma de pendiente cóncava y convexa; también donde la rugosidad presenta valores de muy bajo a muy alto.

Con respecto al mapa de Morfodinámica, la susceptibilidad muy alta está relacionada a lugares calificados como moderados a muy altos, especialmente donde se encuentran las geoformas asociados a movimientos en masa.

Con respecto al mapa de Morfogénesis, se asocia principalmente a las geoformas de tipo estructural, y, en segundo lugar, a las de tipo denudacional. Las principales geoformas de tipo estructural son escarpes a favor y en contra de la pendiente, junto con laderas a favor y en contra de la pendiente y laderas estructurales. Las geoformas de tipo denudacional más importantes son los conos o lóbulos de solifluxión, junto con los escarpes de erosión mayor y menor; también en zonas donde existen geoformas asociadas a movimientos en masa, como los conos de deslizamiento indiferenciado y los conos de deslizamiento traslacional.

Con relación al mapa de Geología, esta se encuentra asociada principalmente a los depósitos cuaternarios de origen coluvial (Qc). Respecto a las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), está asociada, mayoritariamente, con suelos de

tipo orgánico, residual y coluvial. Finalmente, en términos de densidad de fracturamiento, se asocia a todas las clases presentes.

#### **9.4. SUSCEPTIBILIDAD ALTA**

Este tipo de susceptibilidad abarca un 19% del área total de la plancha, y principalmente se encuentra localizada en la parte media y alta de las laderas y escarpes de la plancha.

Con relación a los componentes de Morfometría, estas zonas se encuentran ubicadas donde la pendiente toma valores desde moderado hasta muy alto, con una forma de pendiente cóncava, convexa o rectilínea; también donde la rugosidad presenta valores de moderado a muy alto grado.

Con respecto al mapa de Morfodinámica, la susceptibilidad alta se encuentra relacionada a lugares calificados como moderados.

Con respecto al mapa de Morfogénesis, se asocia principalmente las geoformas de tipo estructural. Las principales geoformas de tipo estructural son escarpes y laderas en contra de la pendiente, y laderas estructurales.

Con relación al mapa de Geología, se encuentra asociada principalmente a las formaciones Floresta, Rio Negro y Capacho. Respecto a las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), se encuentra principalmente en los suelos de tipo orgánico y residual. Finalmente, en términos de densidad de fracturamiento, está asociada en su mayoría a zonas de muy baja susceptibilidad.

## **9.5. SUSCEPTIBILIDAD MODERADA**

Este tipo de susceptibilidad abarca un 35% del área total de la plancha, y principalmente se encuentra localizada en la parte baja, media y alta de las laderas y escarpes de la plancha.

Con respecto al mapa de Morfometría, estas zonas se encuentran ubicadas donde la pendiente toma valores desde moderado hasta muy alto con una forma de pendiente cóncava, convexa y recta. También, donde la rugosidad presenta valores de muy bajo a muy alto grado. Con respecto al mapa de Morfodinámica, la susceptibilidad moderada se encuentra relacionada a lugares calificados como moderados. Con respecto al mapa de Morfogénesis, se asocian principalmente las geoformas de tipo denudacional con valores moderados y en algunos sectores en menor proporción a geoformas de tipo estructural. Las principales geoformas denudacionales que hacen parte de este tipo de susceptibilidad, son las laderas erosionadas, laderas onduladas, lomos denudados de longitud larga y corta y lomo denudado de longitud largo y alto.

Con relación al mapa de Geología, se encuentra asociada principalmente a las formaciones Rio Negro y Aguardiente. Respecto a las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), se encuentra en los suelos de tipo residual. Finalmente, en términos de densidad de fracturamiento, está asociada a todas las clases presentes.

## **9.6. SUSCEPTIBILIDAD BAJA**

Este tipo de susceptibilidad abarca un 11% del área total de la plancha, y principalmente se encuentra localizada en la parte baja, media y alta de las laderas. Predomina en la cercanía del municipio de Málaga

Con respecto al mapa de Morfometría, estas zonas se encuentran ubicadas donde la pendiente toma valores desde moderado hasta muy alto con una forma de pendiente cóncava y convexa, también donde la rugosidad presenta valores bajos y muy bajos. Con respecto al mapa de Morfodinámica, la susceptibilidad baja se encuentra relacionada a lugares calificados como bajos.

Con respecto al mapa de Morfogénesis, se asocian principalmente las geoformas de tipo estructural, las cuales presentan una calificación de alta. La principal geoforma de tipo estructural es una ladera en contrapendiente de sierra homoclinal, la cual se encuentra al este del municipio de Málaga junto con laderas en contrapendiente. En términos litológicos, se encuentra asociada principalmente a la Formación Tibú-Mercedes. Respecto a las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), se encuentra principalmente en los suelos de tipo residual de la Formación Tibú-Mercedes. Finalmente, en términos de densidad de fracturamiento se asocia a los valores de muy bajo a moderado.

### **9.7. SUSCEPTIBILIDAD MUY BAJA**

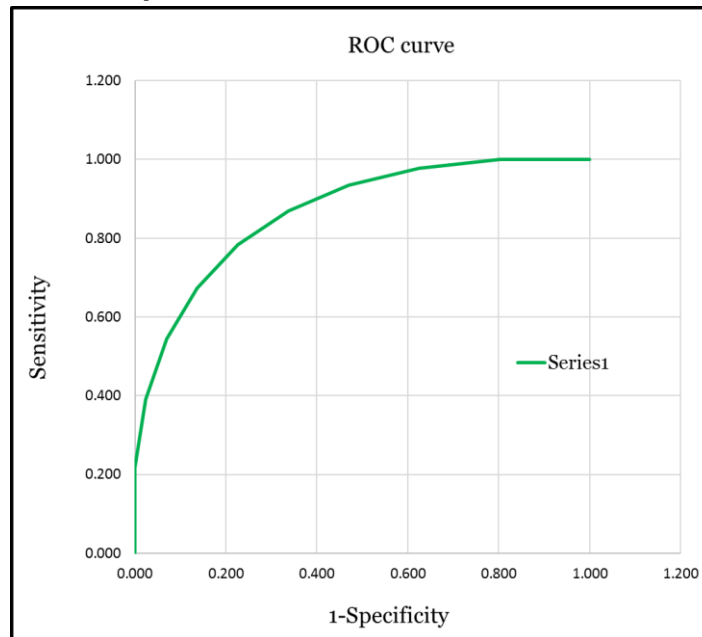
Este tipo de susceptibilidad abarca un 5% del área total de la plancha, y principalmente se encuentra localizada en la parte baja y media de las laderas cercanas al municipio de Málaga. Morfométricamente, estas zonas se encuentran ubicadas donde la pendiente toma valores de bajo y muy bajo, con una forma de pendiente ligeramente rectilínea, también donde la rugosidad presenta valores de muy bajos. Morfodinámicamente, la susceptibilidad muy baja se encuentra relacionada donde los valores son muy bajos, tal como sucede en el casco urbano de Málaga. Morfogenéticamente se asocian principalmente las geoformas de tipo antropogénico, con una calificación de moderado. Las principales geoformas de tipo antropogénico son superficies de explanación y terrazas agrícolas.

En términos litológicos, se encuentra asociada principalmente a las formaciones Girón y Tibú-Mercedes. Respecto a las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), se encuentra principalmente en los suelos de tipo antrópico y roca. Finalmente, en términos de densidad de fracturamiento, está asociado a los valores de muy bajo a moderado.

## 10. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA

Acorde a Beguería (2006) (como lo citan Vakhshoori & Zare, 2016), con la validación se refleja la confiabilidad de los procesos del modelamiento, y en el caso de tener productos a partir de diferentes modelos, facilita compararlos de manera que se pueda escoger el que mejor se ajuste a los resultados esperados. Entre los métodos de validación usados en la literatura acerca de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa, se encuentran algunos como la geometría de la media de precisiones (*mean of accuracies*) (Osna *et al*, 2014), los índices estadísticos como el ACC, Kappa (*k*), *root mean squared* (RMSE) (Pham *et al*, 2016b) y la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Esta última fue implementada por primera vez por DeLeo (1993) (como lo citan Pham *et al*; 2016a), y está considerada como una técnica eficiente para la evaluación del rendimiento de mapas de susceptibilidad y amenaza (Pham *et al*; 2016a; Vakhshoori & Zare, 2016). En este trabajo, se optó por el uso de este último método, debido a su vasta aplicación en la mayoría de publicaciones relacionadas con el tema. Adicionalmente, se realizó una comparación entre el mapa de susceptibilidad del presente trabajo, a escala 1:25.000, y el generado por el Servicio Geológico Colombiano, a escala 1:100.000 (SGC, 2014) de la plancha 136; esto como un método alternativo para darle mayor validez al trabajo realizado.

**Figura 93. Ilustración de una curva ROC para la validación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. En el eje Y, la “Sensibilidad”, y en el eje X, el valor de “1 – Especificidad”. Tomada de Vakhshoori & Zare (2016).**



### 10.1. CURVA ROC DE ÉXITO

La curva ROC es una función que muestra la relación entre dos variables: la Sensibilidad, o rata de verdaderos positivos; y la 1 – Especificidad, o rata de falsos positivos (Vakhshoori & Zare, 2016) (Figura 94).

La *Sensibilidad* es la proporción de píxeles que fueron correctamente clasificados como de movimientos en masa (también llamados “inestables”) (Pham *et al*; 2016a). Se calcula mediante la fórmula:

$$(1) \text{ Sensibilidad} = \frac{TP}{TP+FN}; \text{ donde}$$

*TP*: Verdaderos Positivos (*True Positives*), son pixeles correctamente clasificados como “inestables”.

*FN*: Falsos Negativos (*False Negatives*), son pixeles incorrectamente clasificados como “estables”.

A su vez, la *Especificidad* corresponde a la proporción de pixeles correctamente clasificados como de no-movimientos en masa (también llamados “estables”) (Pham *et al*; 2016a). Se calcula mediante la fórmula:

$$(2) \text{Especificidad} = \frac{TN}{TN+FP}; \text{ donde}$$

*TN*: Verdaderos Negativos (*True Negatives*), son pixeles correctamente clasificados como “estables”.

*FP*: Falsos Positivos (*False Positives*), son pixeles incorrectamente clasificados como “inestables”. A estos también se les conoce como “Falsas alarmas” (Osna *et al*; 2014).

Sin embargo, el valor de *Especificidad* se usa para calcular el de  $1 - \text{Especificidad}$ , al que también se le conoce como “rata de falsos positivos”. Se calcula, simplemente, mediante la siguiente fórmula:

$$(3) 1 - \text{Especificidad} = 1 - \frac{TN}{TN+FP} = \frac{FP}{FP+TN};$$

El uso de la curva ROC puede ser aplicado con un objetivo, sobre el modelo final: construir la Curva de Éxito (*Success Rate Curve*) (como lo citan en Vakhshoori & Zare, 2006; Osna *et al*; 2014; Lucà *et al*; 2011; Pham *et al*; 2016a y b). La Curva de éxito sirve para determinar qué tan bien los mapas de susceptibilidad han

clasificado las áreas donde están los movimientos en masa, y se elabora con la ayuda de la información suministrada por el mapa de inventario de entrenamiento (*i.e.* el mapa que fue usado para la elaboración del documento de susceptibilidad, con el 70% de los movimientos) (Chung & Fabri, 1999 en Vakhshoori & Zare, 2016).

La medida estadística para valorar si la gráfica ROC es válida, es el área bajo la curva (AUC) de esta (Vakhshoori & Zare, 2016). La superficie bajo la curva debe residir en un intervalo entre 0.5 y 1.0: si el AUC está en un valor entre 0.9 y 1.0, se considera que la calidad del modelo es excelente; si se encuentra entre 0.8 y 0.9, se considera que este es bueno; si está entre 0.7 y 0.8, que es aceptable; si se aloja entre 0.6 y 0.7, es pobre; y finalmente, si es menor a 0.6, se considera que el documento no cumplió con las expectativas (Pham *et al*; 2016a; Vakhshoori & Zare, 2016).

En el presente trabajo, se calculó el ROC de la Curva de Éxito del mapa final de susceptibilidad. Para generar la gráfica, fue necesario el ingreso de unos datos (Tabla 21), haciendo uso de un programa en Excel, elaborado por el MSc. Vali Vakhshoori de la Universidad de Shiraz, Irán (en Vakhshoori & Zare, 2016) y, según el autor, escrito específicamente para la validación de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa. Este consiste de una hoja de cálculo, la cual consta de siete columnas:

Clases: Se ingresó, en orden creciente, un número del 1 al 5 asociado a cada clase de susceptibilidad a movimientos en masa. Así, por ejemplo, si se tienen cinco clases de susceptibilidad, el número 1 corresponde a una susceptibilidad Muy Baja; el 2 a una susceptibilidad Baja ... y así, sucesivamente.

Píxeles de movimientos en masa: Se ingresó, para cada una de las clases de susceptibilidad, el número de píxeles asociado a los movimientos en masa, en el

mapa de inventario de entrenamiento (i.e. el mapa de eventos usado para construir el documento final).

Total, de pixeles de movimientos en masa: Se calculó automáticamente. Corresponde a la suma de los pixeles de todas las clases de susceptibilidad, asociados a movimientos en masa: en este caso, de cinco clases.

Pixeles de cada clase: En esta columna se ingresó, para cada una de las clases, el número de pixeles de su superficie total sobre el mapa.

Total, de pixeles de cada clase: Se calculó automáticamente. Corresponde a la suma de los pixeles de todas las clases de susceptibilidad, asociados al área total ocupada por cada una: en este caso, de cinco clases.

1 – Especificidad: Se calculó automáticamente. Para cada una de las clases, se generó un valor de 1 – Especificidad a partir de los valores ingresados en las columnas B y D.

Sensibilidad: Se calculó automáticamente. Para cada una de las clases, se generó un valor de Sensibilidad a partir de los valores ingresados en las columnas B y D.

**Tabla 22. Cantidad de pixeles considerados como “inestables”, y del área total de cada clase de susceptibilidad, en orden creciente: desde Muy Bajo (1) hasta Muy Alto (5).**

CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	PIXELES DE MOVIMIENTOS EN MASA	PIXELES DEL ÁREA TOTAL
1	64	53.096
2	124	106.025
3	422	335.170
4	1.719	184.107
5	4.719	284.404
<b>TOTAL</b>	<b>7.048</b>	<b>962.802</b>

Una interfaz gráfica del programa se puede ver en la Figura 95. En la Figura 96, se ilustra la curva generada a partir de los datos de la Tabla 21 (ingresados en el programa): al haber ingresado los datos necesarios, además de la curva ROC del modelo de susceptibilidad, el valor del área bajo la curva (AUC) también fue generado: este dio un total de 0.743, lo que en la literatura está considerado como un resultado aceptable. Con este dato, se puede concluir que el producto final clasifica, de una manera razonable, las áreas donde se encuentran distribuidos los movimientos en masa, en el territorio.

**Figura 94. Interfaz gráfica del programa escrito por el el MSc. Vali Vakhshoori, de la Universidad de Shiraz, Irán. Los únicos datos necesarios son los pixeles asociados a movimientos en masa, y el total de pixeles del área cubierta, para cada una de las clases de susceptibilidad.**

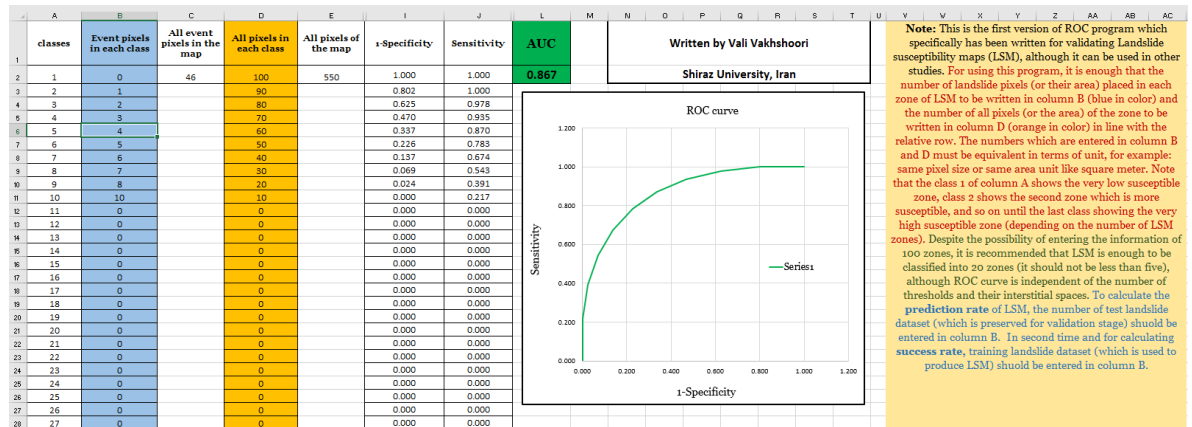
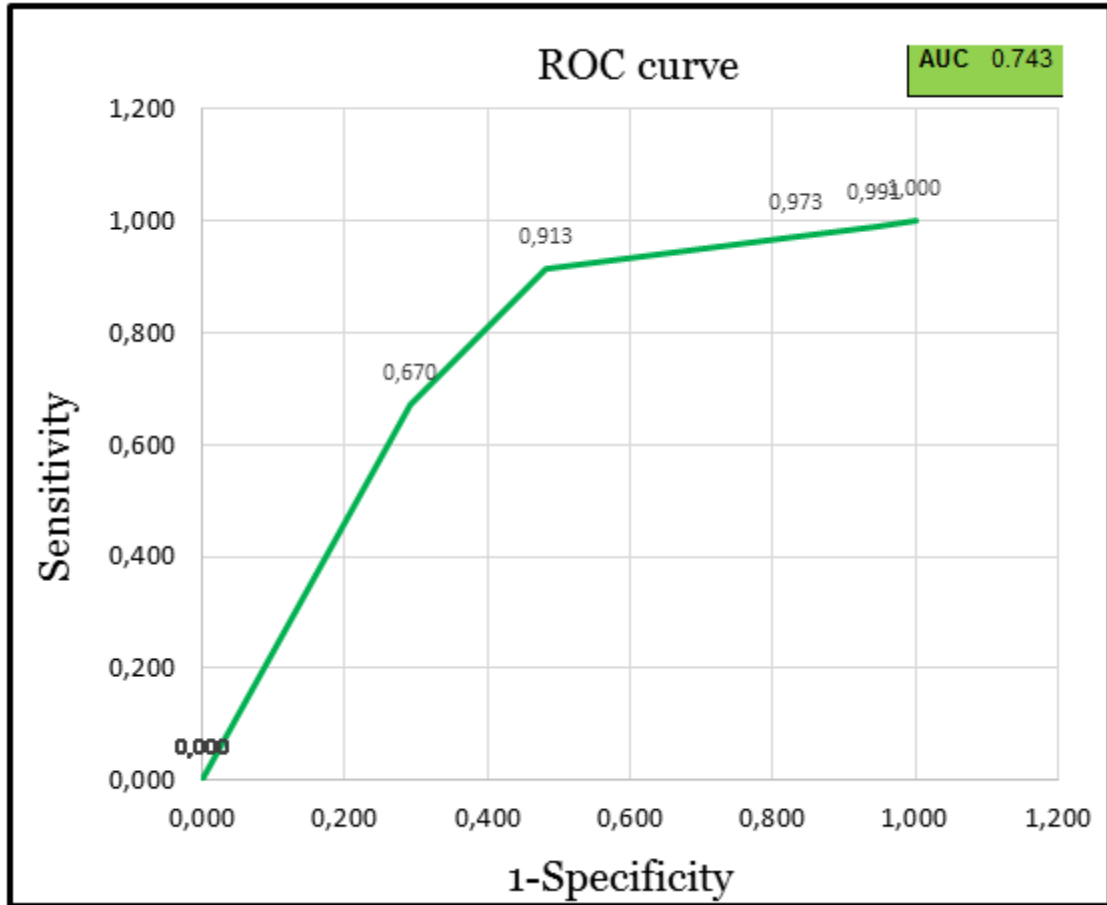


Figura 95. Gráfica de la curva ROC de Éxito (Success Rate Curve) para el mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa. El área bajo la curva (AUC), con un valor de 0.743, le concede al documento una capacidad aceptable para catalogar las zonas del área de estudio, de acuerdo a su grado potencial o real de ocurrencia de movimientos en masa.

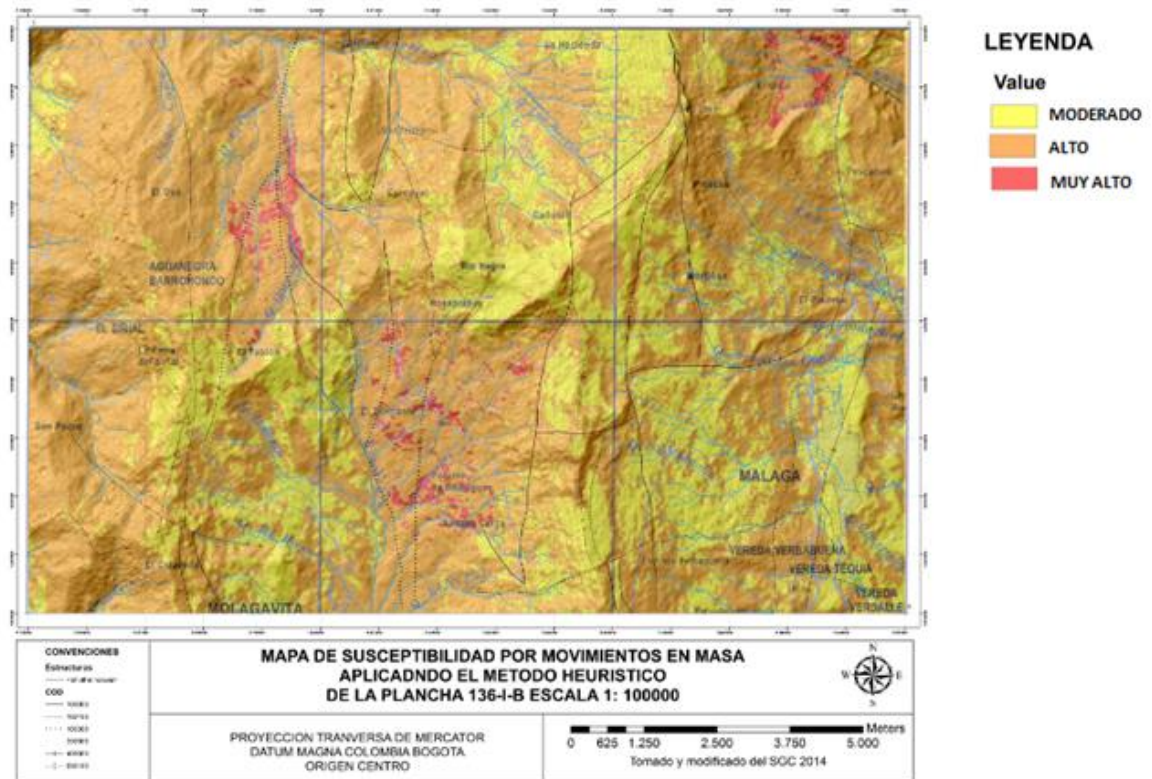


## **10.2. DIFERENCIAS ENTRE LA SUSCEPTIBILIDAD CON UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA Y EL METODO HEURÍSTICO EN LA PLANCHA 136-I-B**

Con el fin de observar y analizar las principales diferencias entre el método de Lógica Difusa descrito anteriormente, y el método heurístico propuesto por el Servicio Geológico, se elabora una comparación cualitativa con el fin de observar las áreas que tienen similitud y las áreas que difieren en términos de susceptibilidad.

Cabe aclarar que esta comparación entre modelos no es muy eficaz, ya que el método heurístico cuenta con unas variables como la cobertura y suelos edafológicos, las cuales presentan un peso del 35% del mapa final, y fueron omitidos en el trabajo de Lógica Difusa por no estar a una escala adecuada y óptima para el procesamiento. A continuación, en la Figura 97 se muestra el mapa heurístico generado por el Servicio Geológico Colombiano, en el año 2014, correspondiente a la plancha 136-I-B, a escala 1:100.000 (SGC, 2014).

**Figura 96. Mapa de susceptibilidad generado, a partir del método heurístico, de la plancha 136-I-B. Este fue tomado y modificado del documento, a escala 1:100.000, de susceptibilidad a movimientos en masa de la plancha 136, Málaga**



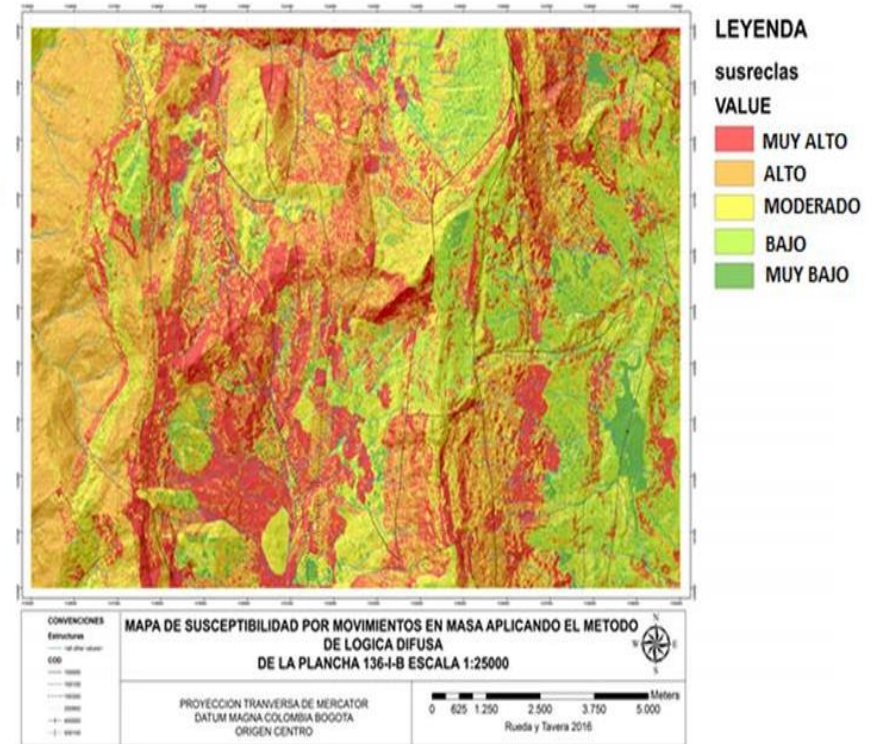
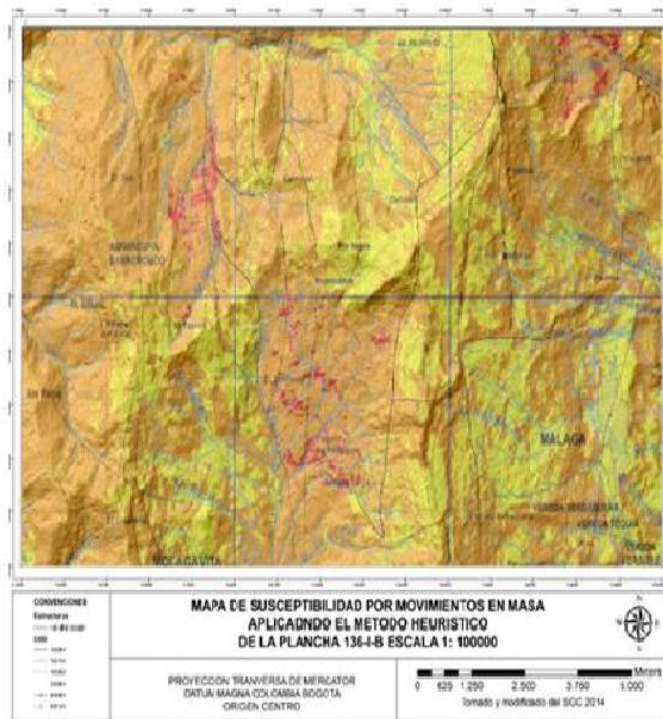
Fuente: Tomado y modificado del SGC (2014).

La principal diferencia entre los dos modelos, es que el heurístico carece de las clases de susceptibilidad “muy baja” y “baja”, siendo la clase de susceptibilidad “moderado” la menor, encontrada para esta área. Otra diferencia bastante notoria es que la susceptibilidad muy alta predomina en el Sistema de Lógica Difusa, mientras que en el modelo heurístico apenas se percibe. Finalmente se aclara que el tipo de susceptibilidad que predomina en el modelo heurístico es de alta, mientras que el área con mayor predominio del método de Lógica Difusa es la moderada.

Existen dos razones principales por las cuales se pueden presentar estos hechos. La primera de ellas está relacionada con la escala de trabajo: mientras que el mapa heurístico tiene insumos calificados a una escala 1:100.000, el modelo de Lógica Difusa presenta parámetros de entrada, a escala 1:25.000, teniendo un mayor grado de detalle y una mejor resolución. La segunda, va sujeta al procesamiento usado en la elaboración de estos dos mapas finales: en el método heurístico, se asignan pesos y valores preestablecidos, mientras que, en el Sistema de Lógica Difusa, se toman los grados de pertenencia sin la asignación de ningún peso a ningún insumo; es decir, que el modelo matemático se encarga de establecer estos valores a criterio del desarrollador, por medio de la construcción de reglas de implicación. Otra razón por la cual se generan estas diferencias de clases de susceptibilidad, entre ambos modelos, corresponde a la cantidad y al tipo de parámetros de entrada, usados en la modelación: los mapas de cobertura y suelo fueron usados para el método heurístico, mientras que, en el Lógica Difusa, no se introdujeron.

Al hacer una comparación entre el modelo heurístico y el método de Lógica Difusa se toma como punto de comparación los movimientos de inventario, registrados en la plataforma nacional del SIMMA y en campo, donde se destaca que ningún movimiento en masa está asociado a la clase de susceptibilidad muy alta para el modelo heurístico, mientras que para el modelamiento de Lógica Difusa hubo una mejor correspondencia entre las áreas calificadas como muy altas y la presencia de los movimientos en masa, lo que da una mayor credibilidad a el modelo generado en el presente trabajo

Figura 97. Principales diferencias entre el modelo heurístico y el modelo de lógica difusa



## 11. CONCLUSIONES

La elaboración del mapa de susceptibilidad, a partir de los atributos propuestos para la generación del Sistema de Lógica Difusa, obtuvo resultados favorables con respecto a la capacidad del mapa para asociar las áreas de movimientos en masa con la clase de susceptibilidad “muy alta”. Con esto, se consolida este procedimiento como una alternativa viable para la modelación de este tipo de documentos. La clase predominante de susceptibilidad a movimientos en masa, fue la Moderada, con una extensión total de 35%; seguida de la clase Muy alta (30%), alta (19%), baja (11%) y Muy baja (5%).

El mapa geológico generado por medio del refinamiento geomorfológico y el control de campo, le dio un grado de mayor detalle a las unidades geológicas y depósitos cuaternarios. Como resultado, se preparó un insumo adecuado para la generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, determinando que la unidad con el mayor grado de susceptibilidad se encuentra asociada a los depósitos cuaternarios (Qc), y la de menor grado es la Formación Tibú-Mercedes

Por su parte, el mapa de Morfogénesis permitió esclarecer que el ambiente morfoestructural predominó sobre los demás, con el 61% del área total; al que le siguen de forma descendente el ambiente denudacional, con 33%; el ambiente antropogénico, con 5%; y el fluvial, con 1%.

De igual manera, el mapa Morfodinámico, establece que las zonas de mayor susceptibilidad se relacionan con las geoformas asociadas a depósitos. Siendo así las geoformas de tipo denudacional (Dco) las de mayor influencia.

Con el mapa de Unidades Geológicas Superficiales, se concluyó que la UGS predominante en el área de estudio es la residual, y que, a su vez, es la que mayor área de influencia tiene en términos de susceptibilidad.

Los mapas de Pendiente, Acuencia y Rugosidad generados, fueron asignados como parámetros individuales de entrada al Sistema de Lógica Difusa. Esto tuvo como resultado que el mapa final de susceptibilidad tuviese un mayor grado de detalle, en comparación a la alternativa de haber ingresado estos atributos como un solo componente (Morfometría).

La validación del mapa de susceptibilidad a partir de los movimientos de inventario mostró que el resultado AUC de la curva ROC de Éxito fue de 0.743, lo cual indicó que el modelo relaciona de manera adecuada los movimientos en masa, con las zonas de susceptibilidad más alta.

## 12. RECOMENDACIONES

Ingresar las variables de suelos y cobertura para futuros proyectos a escala 1:25.000, como está estipulado en el Documento metodológico del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013) para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa. La razón es debido a que están consideradas como parámetros con una importancia grande para la estimación de la susceptibilidad, y, por ende, para darle mayor validez al resultado final.

Implementar la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, en futuros proyectos, mediante diferentes métodos. Esto con fines de comparar y evaluar el rendimiento de cada uno, para ver cuál se adecúa mejor, según el criterio propio.

Realizar, de manera eficaz, una mejor selección aleatoria (Balanceo) de los movimientos en masa registrados en futuros trabajos. Esto de manera que resulte en un 70% de ellos para la elaboración del mapa final de susceptibilidad (set de entrenamiento), y el 30% restante, para su validación (set de validación).

Incorporar, para futuros trabajos de investigación aplicando el Sistema de Lógica Difusa en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, insumos que no se encuentren calificados de acuerdo al aporte a la susceptibilidad; es decir, que se ingresen con sus valores reales. De esta manera, se le da mayor libertad al modelamiento, para que trabaje con mayor precisión.

Implementar, como insumo de Geología para un futuro proyecto de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25.000, una cartografía geológica más

detallada que permita caracterizar miembros y subunidades, resultado de una fase de campo.

## REFERENCIAS

Akgün, A., Sezer, E.A., Nefeslioğlu, H.A & Pradhan, B. (2012). An easy to use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using Mamdani fuzzy algorithm. *Computers and Geosciences*, 38(1), 23-34. doi: 10.1016/j.cageo.2011.04.012.

Aydin, A & Eker, R. (2016). Fuzzy rule-based landslide susceptibility mapping in Yiğilca Forest District (Northwest of Turkey). *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(2), 559-571. doi: 10.17099/jffiu.48480.

Bloom, A.L. (1998). *Geomorphology, A Systematic Analyses of Late Cenozoic Landforms*. Englewood Cliffs, NJ: Waveland Press, 2004.

*British Society for Geomorphology*. Disponible en [<http://www.geomorphology.org.uk/>].

Champaty ray, P.K.; Dimri, S; Lakhera, R.C. & Sati, S. (2007). Fuzzy-based method for landslide hazard assessment in active seismic zone of Himalaya. *Landslides*, 4, 101–111, doi: 10.1007/s10346-006-0068-6

Chi, K.H.; Park, N.W & Chung, C.J. Fuzzy logic interpretation for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002. Recuperado el 15 de Mayo del 2016, en <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/283.pdf>

Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes*. In *Landslides: investigation and mitigation* (eds A.K. Turner and L.R. Schuster), TRB

special report 247, Ch.3. Washington, DC, USA: Transportation Research Board.  
Recuperado de

Duarte, O. (1999). Sistemas de lógica difusa. Fundamentos. *Revista Ingeniería e Investigación*, (42), 22-30. Recuperado el 29 de abril de [https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902507.pdf].

Ercanoglu, M & Gokceoglu, C. (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75, 229-250, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.06.001.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2012). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. Bogotá, Colombia. Recuperado el día jueves, 22 de septiembre, del 2015, de

[http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM\_oficial\_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745].

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2013). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000. Bogotá, Colombia. Recuperado el día lunes, 19 de septiembre, del 2016, de [http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152722/Guia\_Enero\_201401+(1).pdf/501aa421-a0e4-4a1d-a5c8-d6cb1b0de520].

Julivert, M. (1960). Geología de la Región occidental de García Rovira. *Boletín de Geología*, 5(1), 5-33. Recuperado el 09 de enero de 2016, de http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4251/4548.

Kanungo, D.P.; Arora, M.K.; Sarkar, S. & Gupta, R.P. (2009). Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping - A Review. *Journal of South Asia Disaster*

*Studies*, 2(1), 81-105. Recuperado el 17 de Abril de 2016, de [https://www.researchgate.net/publication/257676704\_Landslide\_Susceptibility\_Zonation\_LSZ\_Mapping\_-\_A\_Review].

Kayastha, P; Bijukchhen, S.M.& Dhital, M.J. (2013). GIS Based Landslide Susceptibility Mapping using a Fuzzy Logic Approach: A Case Study from Ghurmi-Dhad Khola Area, Eastern Nepal. *Journal Geological Society of India*, 82(2), 249-261. doi: 10.1007/s12594013-0147-y.

Maguiña, R.A. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de investigación de sistemas e informática*, 7(1), 91 – 104. Recuperado el día martes, 27 de septiembre, del 2016. Recuperado el día martes, 27 de septiembre, del 2016, de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/risi/2010\\_n1/v7n1/a09v7n1.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/risi/2010_n1/v7n1/a09v7n1.pdf).

MATLAB. (2016). *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, Matlab R2016b*. MathWorks, Inc. Disponible en [http://www.mathworks.com/help/pdf\_doc/fuzzy/fuzzy.pdf]

Mendel, J. M. (1995): fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83 (3), 345-377.

Lee, K.H. (2005). *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Berlín, Alemania. Springer. Recuperado de la base de datos ezproxy.

Lucá, F; Conforti, M & Robustelli G. (2011). Comparison of GIS- based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134, 297-308. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.07.006

Oсна, T., Sezer, E.A &, Akgün, A. (2014). GeoFIS: An integrated tool for the assessment of landslide susceptibility. *Computers and Geosciences*, 66, 20-30, doi: 10.1016/j.cageo.2013.12.016.

Petróleos de Venezuela S.A. (1997). *Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela*. Tercera Edición. Disponible en <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>.

Pham, B. T., Tien Bui, D., Dholakia, M. B., Prakash, I. & Pham, H. V. (2016a). A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 1–18. doi:10.1007/s10706-016-9990-0.

Pham, B.T; Tien Bui, D; Pham, H.V; Quoc Le, H; Prakash, I. & Dholakia, M.B. (2016b). Landslide Hazard Assessment Using Random SubSpace Fuzzy Rules Based Classifier Ensemble and Probability Analysis of Rainfall Data: A Case Study at Mu Cang Chai District, Yen Bai Province (Viet Nam). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-11. doi: 10.1007/s12524-016-0620-3

Portilla, M.E. (1999). Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, aplicando la Metodología de los Conjuntos Difusos: Un Tema de Geología Ambiental. *Geología Colombiana*, 24, 159-176. Disponible en [<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31523>].

Portilla, M.E. (2001). Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa. *Geología Colombiana*, 26, 189-205. Disponible en [<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31566>].

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.

Richards, G. (1968). Cretaceous Section in Barco Area of Northeastern Colombia. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(12), 2324-2364. Recuperado el 10 de enero de 2016, de la base de datos ezproxy.

Royero, J. & Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa del mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bucaramanga, Colombia.

Servicio geológico colombiano. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Versión No.2. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental. Bogotá. 158 p.

Servicio Geológico Colombiano (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Bogotá, Colombia. Recuperado de [<http://aplicaciones1.sgc.gov.co/sicat/html/ConsultaBasica.aspx>].

Servicio Geológico Colombiano & Universidad Industrial de Santander (2014). *Convenio 009: Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, Plancha 136: Málaga*.

Sutton, F. (1946). Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 30(10), 1621-1681. Recuperado el 10 de enero de 2016, de la base de datos ezproxy.

Vakhshoori, V. & Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7 (5), 1731-1752. doi: 10.1080/19475705.2016.1144655

Vargas, R; Arias, A; Jaramillo, L. & Téllez, N. (1981). *Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soatá Cuadrángulo I-13. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS. Colombia.

Vargas, R; Arias, A; Jaramillo, L. & Téllez, N. (1984). *Geología de la Plancha 136 Málaga*. Escala: 1.100.000. Versión Digital: 2009. INGEOMINAS. Colombia.

Ward, W., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. & Gómez, E. (1973). *Memoria explicativa del mapa geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga planchas 109 Rionegro – 120 Bucaramanga, y cuadrángulo H-13 Pamplona planchas 110 Pamplona – 121 Cerrito. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS. Colombia.

Yanar, T.A. & Akyürek, Z. (2003). *The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities* (Tesis de maestría). Recuperado de [[https://www.researchgate.net/publication/222407705\\_The\\_enhancement\\_of\\_the\\_cellbased\\_GIS\\_analyses\\_with\\_fuzzy\\_processing\\_capabilities](https://www.researchgate.net/publication/222407705_The_enhancement_of_the_cellbased_GIS_analyses_with_fuzzy_processing_capabilities)].

Yanar, T.A. & Akyürek, Z. (2006). The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176 (8), 1067–1085. Doi: 10.1016/j.ins.2005.02.006

Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *IEEE Information and Control* 8:125–151.

Zadeh L.A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 3(1): 28-44. Recuperado el 21 de Junio del 2016, en [<https://people.eecs.berkeley.edu/~zadeh/papers/1973Outline%20of%20a%20New%20Approach%20to%20the%20Analysis%20of%20Complex%20Systems%20and%20Decision%20Processes.pdf>].

Zhu, A; Wang, R; Qiao, J; Qin, C; Chen, Y; Liu, J; Du, F; Lin. Y. & Zhu, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-138. doi: 10.1016/j.geomorph.201

## BIBLIOGRAFÍA

AKGÜN, A., SEZER, E.A., NEFESLIOĞLU, H.A & PRADHAN, B.. An easy to use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using Mamdani fuzzy algorithm. *Computers and Geosciences*, 38(1), 23-34. doi: 10.1016/j.cageo.2011.04.012. 2012.

AYDIN, A & EKER, R.. Fuzzy rule-based landslide susceptibility mapping in Yiğilca Forest District (Northwest of Turkey). *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(2), 559-571. doi: 10.17099/jffiu.48480. 2016.

BLOOM, A.L.. *Geomorphology, A Systematic Analyses of Late Cenozoic Landforms*. Englewood Cliffs, NJ: Waveland Press, 2004.

CHAMPATY RAY, P.K.; DIMRI, S; LAKHERA, R.C. & SATI, S. Fuzzy-based method for landslide hazard assessment in active seismic zone of Himalaya. *Landslides*, 4, 101–111, doi: 10.1007/s10346-006-0068-6 2007.

CHI, K.H.; PARK, N.W & CHUNG, C.J. Fuzzy logic interpretation for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002. Recuperado el 15 de Mayo del 2016, en <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdppapers/283.pdf>

CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. *Landslide types and processes*. In *Landslides: investigation and mitigation* (eds A.K. Turner and L.R. Schuster), TRB special report 247, Ch.3. Washington, DC, USA: Transportation Research Board. 1996.

DUARTE, O. Sistemas de lógica difusa. Fundamentos. *Revista Ingeniería e Investigación*, (42), 22-30.1999 Recuperado el 29 de abril de [https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902507.pdf].

ERCANOGLU, M & GOKCEOGLU, C. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75, 229-250, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.06.001. 2004.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES Metodología para la zonificación de la susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. Bogotá, Colombia. 2012. [en línea] [citado 22 de septiembre, del 2015] disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM\_oficial\_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745].

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (2013). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000. Bogotá, Colombia.2013.[en línea] [citado 19 de septiembre, del 2016] Disponible en: de [http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152722/Guia\_Enero\_201401+(1).pdf/501aa421-a0e4-4a1d-a5c8-d6cb1b0de520].

JULIVERT, M. Geología de la Región occidental de García Rovira. *Boletín de Geología*, 5(1), 5-33.1960. [en línea] [citado 09 de enero de 2016] disponible en: http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegelogia/article/view/4251/4548.

KANUNGO, D.P.; ARORA, M.K.; SARKAR, S. & GUPTA, R.P.. Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping - A Review. *Journal of South Asia Disaster Studies*, 2(1), 81-105. 2009. [en línea] [citado 17 de Abril de 2016] Disponible en:

[[https://www.researchgate.net/publication/257676704\\_Landslide\\_Susceptibility\\_Zonation\\_LSZ\\_Mapping\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/257676704_Landslide_Susceptibility_Zonation_LSZ_Mapping_-_A_Review)].

KAYASTHA, P; BIJUKCHHEN, S.M.& DHITAL, M.J. GIS Based Landslide Susceptibility Mapping using a Fuzzy Logic Approach: A Case Study from Ghurmi-Dhad Khola Area, Eastern Nepal. *Journal Geological Society of India*, 82(2), 249-261. doi: 10.1007/s12594013-0147-y. 2013.

LEE, K.H. *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Berlín, Alemania. Springer. Recuperado de la base de datos ezproxy. 2005.

LUCÁ, F; CONFORTI, M & ROBUSTELLI G.. Comparison of GIS- based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134, 297-308. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.07.006. 2011.

MAGUIÑA, R.A. Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de investigación de sistemas e informática*, 7(1), 91 – 104. (2010). [en línea] [citado 26 de septiembre de 2016] Disponible en: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/risi/2010\\_n1/v7n1/a09v7n1.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/risi/2010_n1/v7n1/a09v7n1.pdf).

MATLAB. *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, Matlab R2016b*. MathWorks, Inc. (2016). [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: [[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/fuzzy/fuzzy.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf)]

MENDEL, J. M. fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83 (3), 345-377. (1995):

OSNA, T., SEZER, E.A &, AKGÜN, A. GeoFIS: An integrated tool for the assessment of landslide susceptibility. *Computers and Geosciences*, 66, 20-30, doi: 10.1016/j.cageo.2013.12.016. (2014).

PETRÓLEOS DE VENEZUELA S.A. *Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela*. Tercera Edición. (1997). [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>.

PHAM, B. T., et al.. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 1–18. doi:10.1007/s10706-016-9990-0. (2016a).

PHAM, B.T; et all. Landslide Hazard Assessment Using Random SubSpace Fuzzy Rules Based Classifier Ensemble and Probability Analysis of Rainfall Data: A Case Study at Mu Cang Chai District, Yen Bai Province (Viet Nam). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-11. doi: 10.1007/s12524-016-0620-3.(2016b).

PORTILLA, M.E. Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, aplicando la Metodología de los Conjuntos Difusos: Un Tema de Geología Ambiental. *Geología Colombiana*, 24, 159-176. 1999. [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: [<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31523>].

PORTILLA, M.E. . Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa. *Geología Colombiana*, 26, 189-205. 2001. [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: [<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31566>].

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS, PMA: GCA. 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.2007.

RICHARDS, G. Cretaceous Section in Barco Area of Northeastern Colombia. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(12), 2324-2364. Recuperado el 10 de enero de 2016, de la base de datos ezproxy. 1968.

ROYERO, J. & CLAVIJO, J. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bucaramanga, Colombia.2001.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO & UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (2014). *Convenio 009: Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, Plancha 136: Málaga.*

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.* Bogotá, Colombia. 2012. Recuperado de [<http://aplicaciones1.sgc.gov.co/sicat/html/ConsultaBasica.aspx>].

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.* Versión No.2. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental. Bogotá. 158 p. 2013.

SUTTON, F. Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 30(10), 1621-1681. Recuperado el 10 de enero de 2016, de la base de datos ezproxy.1946.

VAKHSHOORI, V. & ZARE, M. Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7 (5), 1731-1752. doi: 10.1080/19475705.2016.1144655. 2016.

VARGAS, R; ARIAS, A; JARAMILLO, L. & TÉLLEZ, N. (1981). *Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soatá Cuadrángulo I-13. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS. Colombia.

VARGAS, R; ARIAS, A; JARAMILLO, L. & TÉLLEZ, N.. *Geología de la Plancha 136 Málaga*. Escala: 1.100.000. Versión Digital: 2009. INGEOMINAS. Colombia. 1984.

WARD, W., et all. *Memoria explicativa del mapa geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga planchas 109 Rionegro – 120 Bucaramanga, y cuadrángulo H-13 Pamplona planchas 110 Pamplona – 121 Cerrito. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS. Colombia. 1973.

YANAR, T.A. & AKYÜREK, Z. *The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities* (Tesis de maestría).2003. [en línea] [citado el 15 de agosto de 2016] disponible en: [[https://www.researchgate.net/publication/222407705\\_The\\_enhancement\\_of\\_the\\_cellbased\\_GIS\\_analyses\\_with\\_fuzzy\\_processing\\_capabilities](https://www.researchgate.net/publication/222407705_The_enhancement_of_the_cellbased_GIS_analyses_with_fuzzy_processing_capabilities)].

YANAR, T.A. & AKYÜREK, Z. The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176 (8), 1067–1085. Doi: 10.1016/j.ins.2005.02.006. 2006.

ZADEH L.A. Fuzzy sets. *IEEE Information and Control* 8:125–151. 1965.

ZADEH L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 3(1): 28-44. 1973. [en línea] [citado 21 de Junio del 2016] Disponible en: [<https://people.eecs.berkeley.edu/~zadeh/papers/1973Outline%20of%20a%20New%20Approach%20to%20the%20Analysis%20of%20Complex%20Systems%20and%20Decision%20Processes.pdf>].

ZHU, A; WANG, et all. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-138. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.2014.

# ANEXOS

## Anexo A. Tabla de recolección de datos para la cartografía geomorfológica

**Tabla de Recolección de Datos de Morfometría para Cartografía Geomorfológica**

<b>Fecha:</b> D M A	<b>Plancha:</b> _____	<b>Estación:</b> _____	<b>Cobertura del Suelo (%)</b>		
<b>Lugar:</b> _____	<b>Posición Geográfica:</b> _____	<b>Referente Geográfico:</b> _____	Veg. Herbácea	Ganadería	
<b>Departamento:</b> _____	<b>X:</b> _____		Bosque/Selva	Agricultura	
<b>Municipio:</b> _____	<b>Y:</b> _____		Marismas	Recepción	Z. Industrial
<b>Vereda:</b> _____	<b>Z:</b> _____		Cuerpos de Agua	Vivienda	Sin Uso
<b>Sitio:</b> _____	<b>Proyección Magna:</b> _____		Cultivos	Minería	
			Construcciones	Área Protegida	
			Pantanos	Vías	
			Sin Cobertura	Z. Arqueológica	

<b>Morfogénesis</b>	<b>Tipo de Relieve</b>	<b>Índice de Relieve</b>	<b>Morfología - Morfometría</b>
Volcánico	Montañoso > de 400 m	May Bajo (< 50 m)	Plano a Suave < 5°
Dorsal/kecal	Colina 200 - 400 m	Bajo (50 - 250 m)	Inclinada (6° - 10°)
Fluvial - Deltaico - Lagar	Loma 50 - 200 m	Mediado (250 - 500 m)	May Inclinada (11° - 15°)
Marino - Costero	Montículo < 50 m	Alto (500 - 1000 m)	Abrupta (16° - 20°)
Glaciar		May Alto (>1000 m)	May Abrupta (21° - 30°)
Glacial			Lacustada (31° - 45°)
Glacial			May Lacustada (> 45°)
Kiástico			
Antropogénico / Biológico			

<b>Forma de Canal</b>	<b>Densidad de Drenaje</b>	<b>Frecuencia de Drenaje</b>	<b>Textura de Drenaje</b>
En U Abierto	Baja (< 0.5 km/km <sup>2</sup> )	May Alta (> 40)	Grosera
En U Cerrado	Mediana (0.5 - 1.0)	Alta (20 - 40)	Mediana
En V Abierto	Alta (> 1.0)	Mucha (10 - 20)	Fina
En V Cerrado		Baja (5 - 10)	May Fina
		May Baja (> 5)	

<b>Grado de Meteorización</b>	<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Movimiento en Masa</b>	<b>Estado</b>
Fresca	Caida	Roca	Activo
Meteorización Débil	Volcánico	Derrico	Inactivo
Meteorización Moderada	Dolomitico Rotacional	Suelo	Suspendido
Meteorización Alta	Dolomitico Translacional	Lodo	Resectivo
Descomposición	Regación	Turba	
	Flujos		
	Propagación Lateral		
	Avulsión		
	Composito o Múltiple		

<b>Tipo de Material</b>	<b>Patrón de Drenaje</b>	<b>Tipo de Roca</b>
Sedimento Grosero	Rectangular	Ignea Ácida
Sedimento Fino	Radial	Ignea Intermedia
	Anular	Ignea Básica
	Multicéntrica	Ignea Ultrabásica
	Contornoado	Volcánica Piroclástica
	Óvalo	Sedimentaria Consolidada
		Sedimentaria Consolidada
		Sedimentaria Química
		Metamórfica Masiva
		Metamórfica Parcelada
		Metamórfica Bien Folclada

Página 1

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Tipo de Erosión</b>	<b>Espaciamiento de Canales (m)</b>	<b>Notas:</b>
Aluvial	Laminar	< 5	
Lagunar	Suave	5 - 15	
Deltaico	Barrancos	15 - 50	
Glacial	Cañavates	50 - 150	
Volcánico	Succesión	150 - 500	
Residual	Dicms Malas	> 500	
Coluvial	Trombas		
Plano de Fracto	Glóica		
Talud	Clasur		
Bloques	Storic		
Comos de Dirección	Carstica		
Otros:	Marina		

<b>Diagramas</b>	<b>Perfil</b>
<b>Observaciones:</b>	<b>Observaciones:</b>

Página 2

## Anexo B. Formato usado para la captura de los movimientos en masa de inventario

FORMATO MODIFICADO PARA INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA Vs 2012																	
Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas									IMPORTANCIA* Alta <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/>								
INVESTIGADOR* _____ FECHA EVENTO* _____ FECHA REPORTE* _____ INSTITUCIÓN* _____																	
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA					DOCUMENTACIÓN												
POR DIVISIÓN POLÍTICA Departamento* _____ Municipio* _____ Vereda* _____		COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM* _____ Long (GADP)* _____ Altitud* _____ Proyección: Magda * _____			REFERENTES GEOGRÁFICOS PLANCHAS: AÑO ESCALA EDITOR FOTOS AERIAS: Año Escala Editor												
ACTIVIDAD DEL MOVIMIENTO					LITOLOGÍA Y ESTRUCTURA												
ESTADO: <input type="checkbox"/> 1-1 año <input type="checkbox"/> 1-3 años <input type="checkbox"/> 3-10 años <input type="checkbox"/> 10-20 años <input type="checkbox"/> 20-30 años <input type="checkbox"/> 30-40 años <input type="checkbox"/> 40-60 años <input type="checkbox"/> 60-80 años <input type="checkbox"/> 80 años <input type="checkbox"/>		ESPECIE: <input type="checkbox"/> Activo <input type="checkbox"/> Inactivo <input type="checkbox"/> INACTIVO <input type="checkbox"/> Latente <input type="checkbox"/> Abandonado <input type="checkbox"/> Estabilizado <input type="checkbox"/> Peligro		ESTILO: <input type="checkbox"/> Compuesto <input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Múltiple <input type="checkbox"/> Única		DISTRIBUCIÓN: <input type="checkbox"/> Retrogrado <input type="checkbox"/> Avanzado <input type="checkbox"/> Suspenso <input type="checkbox"/> Enmarchado <input type="checkbox"/> Confundido <input type="checkbox"/> Concéntrico <input type="checkbox"/> Decéntrico <input type="checkbox"/> Múltiple		DESCRIPCIÓN: _____		ESTRUCTURA: ORIENTACIÓN: ESPACIAMIENTO (m)							
CLASIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO																	
TIPO MOVIMIENTO: <input type="checkbox"/> Caída <input type="checkbox"/> Volcanismo <input type="checkbox"/> Deslizamiento <input type="checkbox"/> Faja <input type="checkbox"/> Propagación Lateral <input type="checkbox"/> Represión <input type="checkbox"/> Deform. Grad. Profundas			SUBTIPO MOVIMIENTO: <input type="checkbox"/> Caída de roca <input type="checkbox"/> Caída de detritos <input type="checkbox"/> Caída de tierras <input type="checkbox"/> Volcan. Resural de roca <input type="checkbox"/> Volcan. de roca <input type="checkbox"/> Volcan. masivo reciente <input type="checkbox"/> Deform. rotacional			DESCRIPCIÓN: <input type="checkbox"/> Deform. traslacional <input type="checkbox"/> Deform. en cuña <input type="checkbox"/> Deform. traslacional en cuña <input type="checkbox"/> Deform. traslacional planar <input type="checkbox"/> Avulsión de rocas <input type="checkbox"/> Faja de detritos <input type="checkbox"/> Faja de lodo			DESCRIPCIÓN: <input type="checkbox"/> Deform. por flujo <input type="checkbox"/> Avulsión de detritos <input type="checkbox"/> Faja de tierra <input type="checkbox"/> Crevas de detritos <input type="checkbox"/> Flujo de turba <input type="checkbox"/> Deform. licuación de arena <input type="checkbox"/> Licuación de lama			TIPO MATERIAL: <input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Detritos <input type="checkbox"/> Tierra <input type="checkbox"/> Lodos <input type="checkbox"/> Turba		HUMEDAD: <input type="checkbox"/> Mojado <input type="checkbox"/> Muy Húmedo <input type="checkbox"/> Húmedo <input type="checkbox"/> Liger. húmedo <input type="checkbox"/> Seco		PLASTICIDAD: <input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/> No plástica	
CORONA DEL SUELO: <input type="checkbox"/> Residual <input type="checkbox"/> Sedimentario <input type="checkbox"/> Volcánico <input type="checkbox"/> Aluvial <input type="checkbox"/> Eólico <input type="checkbox"/> Glacial <input type="checkbox"/> Marino																	
MORFOMETRÍA: <input type="checkbox"/> Extr. rápida (5-5 m/año) <input type="checkbox"/> Muy rápida (1-3 m/año) <input type="checkbox"/> Rápida (1-1.8 m/año) <input type="checkbox"/> Moderada (0-3 m/año) <input type="checkbox"/> Lenta (1-1.8 m/año) <input type="checkbox"/> Muy lenta (1-0.5 m/año) <input type="checkbox"/> Est. Lento (1-0.5 m/año)																	
GENERAL: <input type="checkbox"/> Diferencia de altura corona a punta (m) <input type="checkbox"/> Longitud horizontal corona a punta (m) <input type="checkbox"/> Faltólochurne (grados) <input type="checkbox"/> Pendiente de ladera en Front-falla (grados) <input type="checkbox"/> Pendiente de ladera en Pro-falla (grados) <input type="checkbox"/> Dirección del movimiento (grados) <input type="checkbox"/> Ancho del talud (grados)																	
DIMENSIONES DEL TERRENO: <input type="checkbox"/> Ancho de la masa desplazada Wd (m) <input type="checkbox"/> Ancho de la superficie de ruptura Ws (m) <input type="checkbox"/> Longitud de la masa desplazada Ld (m) <input type="checkbox"/> Longitud de superficie de ruptura Lr (m) <input type="checkbox"/> Espesor de la masa desplazada Dd (m) <input type="checkbox"/> Profundidad de superficie de ruptura Dr (m) <input type="checkbox"/> Longitud total (m)																	
DEFORMACIÓN TERRENO: <input type="checkbox"/> Volumen total (m <sup>3</sup> ) <input type="checkbox"/> Volumen desplazado (m <sup>3</sup> ) <input type="checkbox"/> Área inicial (Km <sup>2</sup> ) <input type="checkbox"/> Área total afectada (Km <sup>2</sup> ) <input type="checkbox"/> Run up (m) <input type="checkbox"/> Distancia de viaje (Km)																	
GEOMORFÍA: <input type="checkbox"/> Ondulación <input type="checkbox"/> Escalonamiento <input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Severa																	
CAUSAS DEL MOVIMIENTO: <input type="checkbox"/> Material flojo y apretado <input type="checkbox"/> Orientación deficiente de discontinuidades <input type="checkbox"/> Contraste de permeabilidad de materiales <input type="checkbox"/> Contraste de rigidez de materiales <input type="checkbox"/> Almacenamiento por empalmamiento/desplazamiento <input type="checkbox"/> Meteoric. por expansión/contracción <input type="checkbox"/> Movimiento tectónico <input type="checkbox"/> Sismo <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> De <input type="checkbox"/> P <input type="checkbox"/> Erupción volcánica <input type="checkbox"/> Uzuza (mm) <input type="checkbox"/> Zrh <input type="checkbox"/> Rrh <input type="checkbox"/> Tzh <input type="checkbox"/> Mhs <input type="checkbox"/> Viento <input type="checkbox"/> Desecho <input type="checkbox"/> Avance/Retraso de glaciares <input type="checkbox"/> Remplazamiento de capas en estratos <input type="checkbox"/> Remplazamiento de arenas <input type="checkbox"/> Desmoronamiento de arenas <input type="checkbox"/> Desmoronamiento rápido de arenas <input type="checkbox"/> Erosión para defluidad por glaciares <input type="checkbox"/> Sacudación para del talud por corriente agua <input type="checkbox"/> Sacudación para del talud por choque <input type="checkbox"/> Sacudación de márgenes de ríos <input type="checkbox"/> Erosión Fluvial <input type="checkbox"/> Carga en la corona del talud <input type="checkbox"/> Erosión subterránea (dilatación, tubificación) <input type="checkbox"/> Infiltración <input type="checkbox"/> Mantenimiento deficiente sistema de drenaje <input type="checkbox"/> Escapes de agua de tuberías <input type="checkbox"/> Deformación o sustrata de vegetación <input type="checkbox"/> Mfencia <input type="checkbox"/> Disposición deficiente de escombros/escombros <input type="checkbox"/> Vibración artificial (tráfico, explosiones, hincado pilotes) <input type="checkbox"/> Erosión Fluvial <input type="checkbox"/> Erosión Fluvial																	
TIPO DE EROSIÓN: <input type="checkbox"/> SUPERFICIAL <input type="checkbox"/> SUBSUPERFICIAL <input type="checkbox"/> TENDIDA <input type="checkbox"/> ESTADO: <input type="checkbox"/> Bajas <input type="checkbox"/> Moderadas <input type="checkbox"/> Severas <input type="checkbox"/> FLUVIAL: <input type="checkbox"/> Sostr. fondo <input type="checkbox"/> Sostr. lateral <input type="checkbox"/> EOLICA: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No																	
COBERTURA Y USO DEL SUELO: <input type="checkbox"/> Vég. herbácea <input type="checkbox"/> Bosques/Serba <input type="checkbox"/> Matorrales <input type="checkbox"/> Campos de agua <input type="checkbox"/> Cultivos <input type="checkbox"/> Construcciones <input type="checkbox"/> Pastos <input type="checkbox"/> Sin cobertura <input type="checkbox"/> Ganadería <input type="checkbox"/> Agricultura <input type="checkbox"/> Remoción <input type="checkbox"/> Vivienda <input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Área protegida <input type="checkbox"/> Vías <input type="checkbox"/> Zona arqueológica <input type="checkbox"/> Zona industrial <input type="checkbox"/> Sin uso																	
AUTOR: _____ AÑO: _____ TÍTULO: _____ EDITOR: _____ CIUDAD: _____ PÁGINAS: _____																	

Fuente: Tomado y modificado de PMA: GCA, 2007.

## Anexo C. Formato usado para la captura de los movimientos en masa tipo catalogo

FORMATO MODIFICADO PARACATALOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA									
Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas								IMPORTANCIA* Alta <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/>	
DATOS DE REGISTRO									
INICIADOR*		FECHA EVENTO*		FECHA REPORTE*		INSTITUCION*			
LOCALIZACION GEOGRAFICA									
POR DIVISION POLITICA			COORDENADAS GEOGRAFICAS			REFERENTES GEOGRAFICOS			
Departamento*		Urbes*		UTM (Easting)*					
Municipalidad*		Long (SRM)*		Altitud*					
Veredas*		Proyeccion: Magna *							
CLASIFICACION DEL MOVIMIENTO									
TIPO MOVIMIENTO			SUBTIPO MOVIMIENTO						
Caída	<input type="checkbox"/>	Caída de roca	<input type="checkbox"/>	Desliz. traslacional	<input type="checkbox"/>	Desliz. por flujo	<input type="checkbox"/>	Desliz. licuación de arena	<input type="checkbox"/>
Volcanismo	<input type="checkbox"/>	Caída de detritos	<input type="checkbox"/>	Desliz. en caña	<input type="checkbox"/>	Avulsión de detritos	<input type="checkbox"/>	Desliz. licuación roca fracturada	<input type="checkbox"/>
Deslizamiento	<input type="checkbox"/>	Caída de tierras	<input type="checkbox"/>	Desliz. traslacional en cuña	<input type="checkbox"/>	Flujo de tierra	<input type="checkbox"/>	Prosig. lateral lenta	<input type="checkbox"/>
Flujo	<input type="checkbox"/>	Volcan. Resaca de roca	<input type="checkbox"/>	Desliz. traslacional planar	<input type="checkbox"/>	Crevasca de detritos	<input type="checkbox"/>	Prosig. lateral licuación	<input type="checkbox"/>
Preparación Lateral	<input type="checkbox"/>	Volcan. de roca	<input type="checkbox"/>	Avulsión de rocas	<input type="checkbox"/>	Flujo de cenizas	<input type="checkbox"/>	Regurgitación de suelos	<input type="checkbox"/>
Reparación	<input type="checkbox"/>	Volcan. macizo rocoso	<input type="checkbox"/>	Flujo de detritos	<input type="checkbox"/>	Flujo de cenizas	<input type="checkbox"/>	Sedimentación	<input type="checkbox"/>
Deform. Gradual Profunda	<input type="checkbox"/>	Desliz. rotacional	<input type="checkbox"/>	Flujo de lodo	<input type="checkbox"/>	Desliz. licuación de lodo	<input type="checkbox"/>	Gravitación (en permeabilidad)	<input type="checkbox"/>
POBLACION AFECTADA			DAÑOS						
Mercado			TIPO			INFRAESTRUCTURA, ACTIVIDADES ECONOMICAS, DAÑOS AMBIENTALES		TIPO DAÑO	
Vivienda			CANTIDAD			UNIDAD		VALOR (US\$)	
Desaparecidos			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
Personas			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
Familias			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
TIPO DE DAÑO: Infraestructura; edificios, carreteras, inst. educativa, puentes, servicios publicos, vía ferrea, torre conducción eléctrica, obras lineales, planta eléctrica, torre de energía, capa asfáltica, galpones, tanque almacenamiento, espaldones, distrito riego, puentes peatonales, puentes viales, acueducto, [económicos: agricultura, ganadería, cultivos, semovientes, transporte pasajeros y carga. Ambientales: parques, bosques, planta tratamiento de agua.			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
			I   T   A					DS   SM   BS   DT   NC	
NOTAS: 1. Infraestructura, 2. Económicas, 3. Ambientales, 4. Daño leve, 5M. Daño moderado, 6M. Daño grave, 7M. Daño total, 8M. No cuantificable									
NOTAS: (Por ejemplo causas y observaciones generales)									

Fuente: Tomado y modificado de PM

**Anexo D. Tabla de calificación en términos de susceptibilidad de las unidades morfogenéticas**

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgn
Ac	Antropico	Canteras	4
Aca	Antropico	Canal Artificial	3
Ae	Antropico	Espolones	2
Aemb	Antropico	Embalses	1
Aemc	Antropico	Explotación minera	3
Ap	Antropico	Presa	1
Apt	Antropico	Plantas de tratamiento de aguas residuales	3
Ar	Antropico	Planos y campos de llenos antrópicos	4
Arb	Antropico	Rellenos de basuras	4
Are	Antropico	Rellenos de escombros y/o escombreras	4
Arm	Antropico	Rompeolas	3
Asa	Antropico	Salinas	1
Ase	Antropico	Excavaciones	3
Asp	Antropico	Superficies de explanación	3
At	Antropico	Tajamares	2
Ata	Antropico	Terrazas agrícolas	3
Da	Denudacional	Altiplano	3
DACr	Denudacional	Colina residual de altiplano	3
DACrd	Denudacional	Colina residual disectada de altiplano	3
DACre	Denudacional	Colina remanente de altiplano	3
DACred	Denudacional	Colina remanente disectada de altiplano	3
DACrem	Denudacional	Cerro remanente o relicto de altiplano	3
DACremd	Denudacional	Colina remanente muy disectada de altiplano	4

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
DAcrmd	Denudacional	Colina residual muy disectada de altiplano	4
DAcrs	Denudacional	Cerro residual de altiplano	3
DAeem	Denudacional	Escarpe de erosión mayor de altiplano	4
DAeeme	Denudacional	Escarpe de erosión menor de altiplano	4
DAld	Denudacional	Loma denudada de altiplano	4
DAldebl	Denudacional	Lomo denudado bajo de longitud larga de altiplano	3
DAldebm	Denudacional	Lomo denudado bajo de longitud media de altiplano	3
DAldi	Denudacional	Lomeríos disectados de altiplano	3
DAlmd	Denudacional	Lomeríos muy disectados de altiplano	4
DAlpd	Denudacional	Lomeríos poco disectados de altiplano	3
DAlor	Denudacional	Loma residual de altiplano	3
DAlres	Denudacional	Lomo residual de altiplano	4
DAmo	Denudacional	Montículo y ondulaciones denudacionales de altiplano	3
DApcr	Denudacional	Planicie colinada residual de altiplano	3
DAsa	Denudacional	Superficie de erosión o aplanamiento de altiplano	3
Dc	Denudacional	Cima	3
Dco	Denudacional	Cono o lóbulo coluvial y de soliflucción	4
Dcr	Denudacional	Colina residual	3
Dcrd	Denudacional	Colina residual disectada	3
Dcre	Denudacional	Colina remanente	3
Dcred	Denudacional	Colina remanente disectada	3
Dcrem	Denudacional	Cerro remanente o relicto	3
Dcremd	Denudacional	Colina remanente muy disectada	4
Dcrmd	Denudacional	Colina residual muy disectada	4
Dcrs	Denudacional	Cerro residual	3
Dct	Denudacional	Cono de talus	4

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Dfe	Denudacional	Cono flujos de detritos	4
Ddi	Denudacional	Cono de deslizamiento indiferenciado	4
Ddrt	Denudacional	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	4
Ddtr	Denudacional	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	4
Deem	Denudacional	Escarpe de erosión mayor	4
Deeme	Denudacional	Escarpe de erosión menor	4
Def	Denudacional	Escarpe faceteado	4
Dft	Denudacional	Cono o lóbulo de Flujo indiferenciado	4
Dg	Denudacional	Glacis	3
Dga	Denudacional	Glacis de acumulación	4
Dge	Denudacional	Glacis de erosión	3
Di	Denudacional	Inselberg	3
Dicad	Denudacional	Cono o lóbulo de avalancha de detritos	4
Dicar	Denudacional	Cono o lóbulo de avalancha de rocas	4
Dld	Denudacional	Loma denudada	4
Dlde	Denudacional	Lomo denudado	4
Dldeac	Denudacional	Lomo denudado alto de longitud corta	4
Dldeal	Denudacional	Lomo denudado alto de longitud larga	4
Dldeam	Denudacional	Lomo denudado alto de longitud media	4
Dldebc	Denudacional	Lomo denudado bajo de longitud corta	3
Dldebl	Denudacional	Lomo denudado bajo de longitud larga	3
Dldebm	Denudacional	Lomo denudado bajo de longitud media	3
Dldemc	Denudacional	Lomo denudado moderado de longitud corta	4
Dldeml	Denudacional	Lomo denudado moderado de longitud larga	4
Dldemm	Denudacional	Lomo denudado moderado de longitud media	4
Dldi	Denudacional	Lomeríos disectados	3

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Dle	Denudaciones	Ladera erosiva	3
Dlfd	Denudacional	Cono o lóbulo de flujo de detritos	4
Dlfl	Denudacional	Cono o lóbulo de flujo de lodo	4
Dlmd	Denudacional	Lomeríos muy disectados	4
Dlo	Denudacional	Ladera ondulada	3
Dlor	Denudacional	Loma residual	3
Dlpd	Denudacional	Lomeríos poco disectados	3
Dlres	Denudacional	Lomo residual	4
Dmab	Denudacional	Mesa de Abanico	4
Dmo	Denudacional	Montículo y ondulaciones denudacionales	3
Dp	Denudacional	Planicie	3
Dpa	Denudacional	Pedimentos de acumulación	4
Dpad	Denudacional	Planos aterrazados o duricostras	3
Dpcd	Denudacional	Planicie colinada denudada	3
Dpcr	Denudacional	Planicie colinada residual	3
Dpd	Denudacional	Pedimentos	4
Dpe	Denudacional	Pedimentos de erosión	3
Dpn	Denudacional	Penillanura o peneplanicie	3
Dsa	Denudacional	Superficie de erosión o aplanamiento	3
Dsd	Denudacional	Sierra denudada	4
Dsr	Denudacional	Sierra residual	3
Dtcs	Denudacional	Terrazas o mesas calcretas o silicretas	3
Dts	Denudacional	Terrazas sobreelevadas o colgadas	4
Fa	Fluvial	Albardones o dique natural	2
Faa	Fluvial	Abanico aluvial	3
Faaa	Fluvial	Abanico aluvial antiguo	3

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Faas	Fluvial	Abanico aluvial sub-reciente	3
Faaac	Fluvial	Abanico aluvial actual	3
Faai	Fluvial	Abanico aluvial incisado	4
Fac	Fluvial	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados, Bajada	3
Fbc	Fluvial	Barra compuesta	2
Fbl	Fluvial	Barra longitudinal	2
Fbp	Fluvial	Barra puntual	2
Fca	Fluvial	Cauce aluvial	1
Fcd	Fluvial	Cuenca de decantacion (Basines)	2
Fcdy	Fluvial	Cono de deyeccion	4
Fco	Fluvial	Complejo de orillales	2
Fdc	Fluvial	Divagación de cause activo	2
Fdd	Fluvial	Delta de desborde natural	3
Fdl	Fluvial	Delta lacustrino	2
Fea	Fluvial	Escarpe de abanico fluvial	3
Flg	Fluvial	Laguna	1
Flm	Fluvial	Lago en media luna	1
Fma	Fluvial	Meandro abandonado	2
Fpa	Fluvial	Plano anegadizo	2
Fpac	Fluvial	Planicie aluvial confinada	2
Fplac	Fluvial	Plano lacustre	2
Fpi	Fluvial	Plano o llanura de inundacion	2
Fpl	Fluvial	Plano y artesa lagunar	2
Fpla	Fluvial	Planicie y delta lacustrino	2
Fta	Fluvial	Terraza de acumulacion	2
Ftae	Fluvial	Escarpe de terraza de acumulacion	3

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Ftan	Fluvial	Terraza de acumulación antigua	2
Ftas	Fluvial	Terraza de acumulación subreciente	2
Fte	Fluvial	Terraza de erosión	1
Ftee	Fluvial	Escarpe de terraza de erosion	3
Sbh	Estructural	Barra homoclinal	4
Sce	Estructural	Cerro estructural	4
Sces	Estructural	Colina estructural	4
Scor	Estructural	Cornisa estructural	4
Sct	Estructural	Cuenca de tracción	3
Sc	Estructural	Cuesta	4
Sdd	Estructural	Domo diapírico	4
Slfe	Estructural	Escarpe de linea de falla	4
Sme	Estructural	Escarpe de meseta	4
Se	Estructural	Espinazo	4
Ses	Estructural	Espolón	4
Sesac	Estructural	Espolón alto de longitud corta	4
Sesal	Estructural	Espolón alto de longitud larga	4
Sesam	Estructural	Espolón alto de longitud media	4
Sesbc	Estructural	Espolón bajo de longitud corta	3
Sesbl	Estructural	Espolón bajo de longitud larga	3
Sesbm	Estructural	Espolón bajo de longitud media	3
Sesmc	Estructural	Espolón moderado de longitud corta	4
Sesml	Estructural	Espolón moderado de longitud larga	4
Sesmm	Estructural	Espolón moderado de longitud media	4
Sefc	Estructural	Espolón facetado	4
Sefcac	Estructural	Espolón facetado alto de longitud corta	4

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Sefcal	Estructural	Espolón facetado alto de longitud larga	4
Sefcam	Estructural	Espolón facetado alto de longitud media	4
Sefcbc	Estructural	Espolón facetado bajo de longitud corta	3
Sefcbl	Estructural	Espolón facetado bajo de longitud larga	3
Sefcbm	Estructural	Espolón facetado bajo de longitud media	3
Sefcmc	Estructural	Espolón facetado moderado de longitud corta	4
Sefcml	Estructural	Espolón facetado moderado de longitud larga	4
Sefcmm	Estructural	Espolón facetado moderado de longitud media	4
Sefes	Estructural	Espolón festoneado	4
Sefesac	Estructural	Espolón festoneado alto de longitud corta	4
Sefesal	Estructural	Espolón festoneado alto de longitud larga	4
Sefesam	Estructural	Espolón festoneado alto de longitud media	4
Sefesbc	Estructural	Espolón festoneado bajo de longitud corta	3
Sefesbl	Estructural	Espolón festoneado bajo de longitud larga	3
Sefesbm	Estructural	Espolón festoneado bajo de longitud media	3
Sefesmc	Estructural	Espolón festoneado moderado de longitud corta	4
Sefesml	Estructural	Espolón festoneado moderado de longitud larga	4
Sefesmm	Estructural	Espolón festoneado moderado de longitud media	4
Sft	Estructural	Faceta triangular	4
Sgf	Estructural	Gancho de flexión	4
Slcp	Estructural	Ladera contrapendiente	4
Sclc	Estructural	Ladera de contrapendiente de cuesta	4
Selc	Estructural	Ladera de contrapendiente de espinazo	4
Ssalc	Estructural	Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal	4
Sshlc	Estructural	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	4
Ssslc	Estructural	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	4

Cod_Gmf	Ambiente	Unidad	CalMfgen
Sl	Estructural	Lomos	4
Sles	Estructural	Ladera escalonada	4
Sle	Estructural	Ladera estructural	4
Scle	Estructural	Ladera estructural de cuesta	4
Sele	Estructural	Ladera estructural de espinazo	4
Ssale	Estructural	Ladera estructural de sierra anticlinal	4
Sshle	Estructural	Ladera estructural de sierra homoclinal	4
Sssle	Estructural	Ladera estructural de sierra sinclinal	4
Ssp	Estructural	Laguna de falla	1
Sloe	Estructural	Lomerios estructurales	4
Slf	Estructural	Lomo de falla	4
Slft	Estructural	Lomo de falla con faceta triangular	4
Slo	Estructural	Lomo de obturación	4
Sm	Estructural	Meseta estructural	4
Sp	Estructural	Plancha	4
Svc	Estructural	Plano aluvial confinado	4
Ss	Estructural	Sierra	4
Ssan	Estructural	Sierra anticlinal	4
Ssbe	Estructural	Sierra de barras estructurales	4
Ssh	Estructural	Sierra homoclinal	4
Sss	Estructural	Sierra sinclinal	4
Sslp	Estructural	Sierra y lomos de presión	4
Smle	Estructural	Superficie tabular de meseta	4
Sbf	Estructural	Terraza o berma de fallamiento	4
Svl	Estructural	Volcán de lodo	4
Sloes	Estructural	Lomo estructural	4

<b>Cod_Gmf</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Unidad</b>	<b>CalMfgen</b>
Slel	Estructural	Ladera estructural de loma	4
Slcpl	Estructural	Ladera estructural de loma	4
See	Estructural	Escarpe estructural	4
Sla	Estructural	Loma anticlinal	4
Slcpco	Estructural	Ladera contrapendiente de colina	4
Sleco	Estructural	Ladera estructural de colina	4
Secp	Estructural	Escarpe Contrapendiente	4

**Anexo E. Tabla de clasificación en términos de susceptibilidad de los depósitos cuaternarios**

Ambiente	Depósito	Geoforma Asociada	Equivalente geológico	Califica
Denuclacional	Depósitos coluviales	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción y Conos de deyección, Glacis de acumulación	Qc/Qd/Q2v/Qtl/Q/Q2c/Qdp/Qcc/Qdt/Qac/Qtf/Qgd1/Qgd2	5
	Depósitos de detritos	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional de detritos, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de detritos.	Qco/Q/Qdt	4
	Depósitos de tierras	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional de tierras, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional de tierras	Qco	5
	Depósitos de terraza sobre elevada	Terraza sobreelevada o colgada	Qt1	4
	Depósitos costros ferruginosas o calcáreas	Planos aterrazados o durlocostras, Terrazas o mesas calcietas o silicretas	Qcf	1
	Depósitos lodos	Cono o lóbulo de flujo de lodo	Qfl	5
Fluvial y Lagunar	Depósitos de cauce y llanura aluvial	Cauce activo y abandonado, albardones, barras, cuencas de decantación, lagos en media luna, lagunas naturales, meandros abandonados, planicie o llanura de inundación, planicies y deltas lacustrinos, planos anegadizos, planos y artesas lagunares	Qal2/Qac/Qar/Qal/Q2-a/Qalu Qal/Q2cal/Qo1/Qa/Q2-ald/Qb/Qal/Q2-alor/Qal/Qo2/Q2alh/Q2alca	1
	Depósitos de terrazas aluvial	Terrazas de erosión, terrazas de acumulación subreciente, terrazas de acumulación antigua, terrazas de deposición y escarpes de terraza	Qt1/Qt2/Q2t2	2
	Depósitos paudales	Artesas lagunares y planos anegadizos.	Q2m/Q2alp	1
	Depósitos lagunares	Lagos en media luna y meandros abandonados.	Q2l/Ql/Q2l/Qtl/Qlp	1
	Depósitos de abanicos aluviales	Abanicos fluviotorrenciales, conos de deyección, deltas de desborde natural, deltas lacustrinos y escarpes de abanicos fluviales.	Qab/Q2cal/Qc/Q1ab/Q2g/Q1ab/Qaa/Qap1/Qcal	3
Marino	Depósitos marino aluviales	Llanuras costeras	Q2mim (Q2ml)/Qes	2

Tomado parcialmente del documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000

## Anexo F. Tabla de clasificación de la resistencia de la roca según hoke.

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0,25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield high ambiguous results.

Grado	Termino	Propuesta de calificación
R6	Extremadamente dura	1
R5	Muy dura	1
R4	Dura	2
R3	Moderadamente dura	3
R2	Blanda	4
R1	Muy blanda	5
R0	Extremadamente blanda	5

Tomado del documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 (SGC, 2013).

**Anexo G. Tabla de clasificación de la textura propuesta por INGEOMINAS 2004**

<b>Textura/Fábrica</b>	<b>Características</b>
Cristalina Masiva	En rocas de cualquier origen (ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas y mármoles.
Cristalina Foliada y Rocas de falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, filitas, esquistos, milonitas.
Cristalinas Bandeadas	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis.
Clásticas Cementadas	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: areniscas, conglomerados.
Clásticas Consolidadas	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: arcillolitas, lodolitas, shales.

<b>Fabrica/estructura</b>	
<b>Atributo</b>	<b>Propuesta de Calificación</b>
N/A	0
Cristalina Masiva	1
Cristalinas Bandeadas	2
Clásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4
Cristalina Foliada y Rocas de falla	5

Tomado del documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000

## Anexo H. Reglas propuestas en el presente trabajo que modelaron el sistema de lógica difusa

1. If (GEO is alto) And (MGEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is muyalto) And (ACU is muyalto) Then (SUSCEP is muyalto)
2. If (RUGO is muyalto) And (USR is muyalto) And (CUR is alto) And (DENSI is muyalto) Then (SUSCEP is muyalto)
3. If (GEO is alto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is alto) Then (SUSCEP is alto)
4. If (RUGO is alto) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is alto)
5. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is moderado) And (PEN is moderado) And (ACU is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
6. If (USR is alto) And (CUR is moderado) And (RUGO is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
7. If (GEO is bajo) And (MGEN is bajo) And (MDINA is bajo) And (PEN is bajo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
8. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is bajo) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is bajo)
9. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
10. If (RUGO is muybajo) And (USR is moderado) And (CUR is bajo) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is muybajo)
11. If (GEO is moderado) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is moderado) Then (SUSCEP is muyalto)
12. If (RUGO is alto) And (USR is bajo) And (CUR is alto) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muyalto)
13. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is muyalto) And (PEN is moderado) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
14. If (RUGO is moderado) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is muyalto)
15. If (GEO is alto) And (MGEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is muyalto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
16. If (RUGO is bajo) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muyalto)
17. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
18. If (GEO is alto) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muyalto) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
19. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is muyalto)
20. If (GEO is alto) And (MGEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is muyalto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
21. If (GEO is muyalto) And (MGEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is muyalto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
22. If (RUGO is moderado) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is alto)
23. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is alto)
24. If (GEO is muyalto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is muyalto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
25. If (RUGO is bajo) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
26. If (GEO is alto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
27. If (GEO is moderado) And (MGEN is alto) And (MDINA is moderado) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is alto)
28. If (RUGO is bajo) And (USR is alto) And (CUR is alto) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is alto)
29. If (GEO is bajo) And (MGEN is alto) And (MDINA is bajo) And (PEN is alto) And (ACU is moderado) Then (SUSCEP is alto)
30. If (RUGO is alto) And (USR is alto) And (CUR is alto) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is alto)
31. If (GEO is muybajo) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is muyalto) Then (SUSCEP is alto)
32. If (RUGO is muybajo) And (USR is alto) And (CUR is muyalto) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is alto)
33. If (GEO is alto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is muyalto) Then (SUSCEP is moderado)
34. If (RUGO is muybajo) And (USR is bajo) And (CUR is moderado) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
35. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is bajo) And (PEN is moderado) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is moderado)
36. If (RUGO is muyalto) And (USR is alto) And (CUR is alto) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is moderado)
37. If (GEO is moderado) And (MGEN is alto) And (MDINA is moderado) And (PEN is moderado) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
38. If (RUGO is moderado) And (USR is bajo) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
39. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is muyalto) And (PEN is moderado) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
40. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is bajo) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
41. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is bajo) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
42. If (RUGO is muyalto) And (USR is alto) And (CUR is alto) And (DENSI is alto) Then (SUSCEP is moderado)
43. If (GEO is moderado) And (MGEN is moderado) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
44. If (RUGO is bajo) And (USR is moderado) And (CUR is bajo) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
45. If (GEO is bajo) And (MGEN is moderado) And (MDINA is alto) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
46. If (GEO is bajo) And (MGEN is bajo) And (MDINA is bajo) And (PEN is bajo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
47. If (RUGO is bajo) And (USR is alto) And (CUR is bajo) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is bajo)

48. If (GEO is muybajo) And (MGEN is bajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is bajo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
49. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is moderaddo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
50. If (RUGO is bajo) And (USR is bajo) And (CUR is bajo) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is bajo)
51. If (RUGO is moderado) And (USR is bajo) And (CUR is alto) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is bajo)
52. If (GEO is bajo) And (MGEN is alto) And (MDINA is bajo) And (PEN is moderaddo) And (ACU is moderado) Then (SUSCEP is bajo)
53. If (RUGO is moderado) And (USR is bajo) And (CUR is bajo) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is bajo)
54. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
55. If (RUGO is muybajo) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
56. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
57. If (RUGO is alto) And (CUR is moderado) And (USR is alto) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
58. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is bajo) And (PEN is bajo) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
59. If (RUGO is muybajo) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
60. If (GEO is bajo) And (MGEN is bajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) And (ACU is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
61. If (GEO is bajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is bajo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muybajo)
62. If (RUGO is muybajo) And (USR is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
63. If (GEO is muybajo) And (MGEN is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is bajo) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muybajo)
64. If (RUGO is bajo) And (USR is bajo) And (CUR is muybajo) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is muybajo)
65. If (GEO is moderado) And (MGEN is alto) Then (SUSCEP is alto)
66. If (GEO is bajo) And (MGEN is moderado) And (MDINA is bajo) And (PEN is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
67. If (GEO is bajo) And (MGEN is moderado) And (RUGO is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
68. If (MGEN is moderado) And (MDINA is bajo) And (RUGO is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
69. If (MDINA is moderado) And (PEN is muybajo) And (RUGO is muybajo) Then (SUSCEP is bajo)
70. If (GEO is muybajo) And (MGEN is alto) And (MDINA is bajo) And (PEN is moderaddo) And (RUGO is moderado) Then (SUSCEP is alto)
71. If (GEO is muybajo) And (MGEN is moderado) And (PEN is bajo) And (RUGO is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
72. If (GEO is muybajo) And (PEN is bajo) And (RUGO is muybajo) Then (SUSCEP is bajo)
73. If (GEO is muybajo) And (MGEN is moderado) And (PEN is muybajo) And (RUGO is muybajo) And (USR is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
74. If (PEN is bajo) And (RUGO is muybajo) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is bajo)
75. If (MGEN is alto) And (MDINA is muybajo) And (ACU is bajo) And (CUR is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
76. If (GEO is muybajo) And (PEN is muybajo) And (USR is bajo) Then (SUSCEP is bajo)
77. If (GEO is bajo) And (MGEN is moderado) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
78. If (GEO is bajo) And (MDINA is muybajo) And (PEN is muybajo) And (RUGO is muybajo) Then (SUSCEP is muybajo)
79. If (RUGO is muybajo) And (USR is muybajo) And (CUR is moderado) Then (SUSCEP is muybajo)
80. If (GEO is bajo) And (CUR is moderado) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is muybajo)
81. If (USR is muybajo) And (MDINA is muybajo) And (MGEN is moderado) Then (SUSCEP is muybajo)
82. If (GEO is bajo) And (MGEN is alto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is bajo) Then (SUSCEP is alto)
83. If (GEO is moderado) And (MGEN is alto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is bajo) Then (SUSCEP is moderado)
84. If (GEO is alto) And (MGEN is moderado) And (MDINA is moderado) And (PEN is alto) Then (SUSCEP is alto)
85. If (GEO is moderado) And (MDINA is muyalto) And (PEN is alto) And (RUGO is moderado) Then (SUSCEP is alto)
86. If (GEO is alto) And (MDINA is moderado) And (PEN is bajo) And (RUGO is bajo) Then (SUSCEP is alto)
87. If (RUGO is moderado) And (USR is moderado) And (CUR is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
88. If (GEO is alto) And (CUR is moderado) And (DENSI is moderado) Then (SUSCEP is alto)
89. If (GEO is moderado) And (CUR is moderado) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is alto)
90. If (USR is alto) And (MDINA is muyalto) And (MGEN is alto) Then (SUSCEP is alto)
91. If (USR is moderado) And (MDINA is moderado) And (MGEN is alto) Then (SUSCEP is alto)
92. If (GEO is muyalto) And (MGEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (PEN is alto) And (ACU is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
93. If (GEO is muyalto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (PEN is muyalto) And (ACU is alto) Then (SUSCEP is muyalto)
94. If (GEO is muyalto) And (PEN is muyalto) And (RUGO is alto) Then (SUSCEP is muyalto)
95. If (MGEN is alto) And (PEN is muyalto) And (MDINA is muyalto) And (USR is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
96. If (MDINA is muyalto) And (RUGO is bajo) And (USR is bajo) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is muyalto)
97. If (GEO is muyalto) And (DENSI is bajo) And (MDINA is alto) And (CUR is moderado) And (PEN is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
98. If (MGEN is alto) And (USR is alto) And (RUGO is muybajo) And (ACU is moderado) And (GEO is muyalto) Then (SUSCEP is muyalto)
99. If (MGEN is alto) And (PEN is muybajo) And (RUGO is bajo) And (CUR is moderado) And (USR is alto) Then (SUSCEP is muyalto)
100. If (GEO is muyalto) And (MDINA is alto) And (ACU is muybajo) And (DENSI is bajo) And (PEN is muybajo) Then (SUSCEP is muyalto)
101. If (PEN is bajo) And (ACU is moderado) And (RUGO is bajo) And (USR is bajo) And (CUR is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
102. If (DENSI is muybajo) And (MGEN is alto) And (GEO is muyalto) And (MDINA is alto) And (USR is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
103. If (USR is bajo) And (MGEN is alto) And (GEO is muyalto) And (PEN is bajo) And (CUR is moderado) Then (SUSCEP is muyalto)
104. If (MDINA is alto) And (ACU is muybajo) And (RUGO is muybajo) And (DENSI is muybajo) And (MGEN is alto) Then (SUSCEP is muyalto)
105. If (GEO is muyalto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) Then (SUSCEP is muyalto)
106. If (GEO is muyalto) And (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (DENSI is bajo) Then (SUSCEP is muyalto)
107. If (GEO is alto) And (MDINA is moderado) And (PEN is alto) And (DENSI is muybajo) Then (GEO is moderado)
108. If (GEO is alto) And (MGEN is alto) And (MDINA is moderado) Then (SUSCEP is moderado)
109. If (GEO is alto) And (MDINA is moderado) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is moderado)
110. If (GEO is muyalto) And (PEN is muybajo) And (RUGO is muybajo) Then (SUSCEP is alto)
111. If (GEO is muyalto) And (MGEN is alto) And (PEN is muybajo) Then (SUSCEP is alto)
112. If (MGEN is alto) And (MDINA is alto) And (DENSI is muybajo) Then (SUSCEP is alto)