

CARACTERIZACIÓN, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LOS FLUJOS DE LODOS Y
DETRITOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA ANGULITO EN GIRÓN, SANTANDER

NÉSTOR RICARDO SUÁREZ ZAMBRANO
JAVIER ALFONSO SUÁREZ SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2006

CARACTERIZACIÓN, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LOS FLUJOS DE LODOS Y
DETRITOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA ANGULITO EN GIRÓN, SANTANDER

NÉSTOR RICARDO SUÁREZ ZAMBRANO
JAVIER ALFONSO SUÁREZ SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil

Director
Jaime Suárez Díaz
MSc. Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2006

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jaime Suárez Díaz, por su colaboración, dedicación e invaluable consejos y recomendaciones.

Al profesor Jorge Alberto Guzmán, por su apoyo y contribución en la elaboración de los modelos.

A todo el personal de Geotecnología Ltda., por su ayuda constante durante el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Hernán Castellanos y al personal del Laboratorio Químico de Suelos de la Universidad Industrial de Santander, por sus consejos y colaboración en el análisis de los suelos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. MOVIMIENTOS EN MASA	23
1.1 GENERALIDADES	24
1.1.1 Factores que influyen en la estabilidad de las laderas.	24
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS MASIVOS	25
1.2.1 Deslizamientos.	25
1.2.2 Flujos.	29
1.2.3 Avalanchas.	35
1.3 MODELAMIENTO	45
1.3.1 Fluido Newtoniano.	46
1.3.2 Fluido Bingham.	47
1.3.3 Fluido Dilatante.	47
1.3.4 Consideraciones de algunos autores.	48
2. SUELOS DISPERSIVOS	50
2.1 GENERALIDADES	50
2.2 CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN	51
2.2.1 Presencia de cationes intercambiables de carga baja en la fracción fina.	52

2.2.2	Grado de salinidad del suelo.	58
2.2.3	Otras variables que pueden alterar el tamaño de la doble capa.	66
2.2.4	Potencial de hidrógeno.	67
2.2.5	Contenido de materia orgánica.	68
2.2.6	Tipos de arcilla.	69
2.3	EFFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	77
2.3.1	Pérdida de resistencia.	77
2.3.2	Cambio en el comportamiento del flujo.	78
2.3.3	Alta susceptibilidad a la erosión.	79
2.3.4	Reducción en la infiltración y conductividad hidráulica.	79
2.3.5	Formación de costras superficiales.	81
2.3.6	Lavado del material fino de la matriz.	82
2.4	POSIBLES SOLUCIONES	83
2.4.1	Aplicación de enmiendas químicas.	83
2.4.2	Revegetalización.	87
3.	DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO EN LA QUEBRADA ANGULITO	89
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	89
3.1.1	Descripción geológica regional.	89
3.1.2	Geomorfología.	95

3.1.3	Clima.	95
3.2	ANTECEDENTES	104
3.2.1	Evento 19 de Octubre de 1931.	105
3.2.2	Evento 14 de Octubre de 1973.	105
3.2.3	Evento 28 de Enero de 1998.	105
3.3	EVENTO DEL 7 AL 12 DE FEBRERO DE 2005	105
3.3.1	7 de Febrero 2005.	106
3.3.2	8 de Febrero 2005.	107
3.3.3	9 de Febrero 2005.	107
3.3.4	10 de Febrero 2005.	108
3.3.5	11 y 12 de Febrero 2005.	108
3.3.6	12 y 13 de Febrero 2005.	109
3.3.7	Relación entre la precipitación y los deslizamientos en la cuenca.	110
3.4	ESTUDIOS DE FENÓMENOS SIMILARES	110
3.4.1	Estado de Vargas, Venezuela, Diciembre de 1999.	111
3.4.2	Eventos en Colombia.	113
4.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	114
4.1	TOPOGRAFÍA	114
4.1.1	Desarrollo del modelo digital de elevación.	115

4.1.2	Selección del método y las variables para la generación de la grilla.	117
4.1.3	Manejo y conversión del modelo digital de elevación a otros formatos.	124
4.2	PRECIPITACIÓN	125
4.2.1	Delimitación de la cuenca.	126
4.2.2	Proceso de espacialización de la precipitación.	127
4.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN	129
4.4	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	130
4.4.1	Análisis granulométrico de suelos por tamizado.	131
4.4.2	Límites de Atterberg de los suelos.	133
4.4.3	Análisis granulométrico de material fino por hidrómetro.	135
4.4.4	Peso específico del suelo y del llenante mineral.	136
4.4.5	Peso unitario del suelo en terreno mediante método del cono de arena.	138
4.4.6	Corte directo drenado.	140
4.4.7	Ensayo visual de dispersión del DAWA.	144
4.4.8	Dispersión por doble hidrómetro.	146
4.4.9	Percolación en el terreno.	148
4.4.10	Coeficiente de permeabilidad por el método de cabeza variable.	150
4.4.11	Ensayo de dispersibilidad por tubificación (pinhole test).	152
4.4.12	Determinación del pH de los suelos.	157

4.4.13	Contenido de cationes intercambiables.	159
4.4.14	Otros ensayos químicos del suelo.	162
4.4.15	Conclusiones principales caracterización geotécnica.	164
5.	ELABORACIÓN DE MODELOS DIGITALES	165
5.1	MODELO DE DESLIZAMIENTOS	165
5.1.1	Consideraciones teóricas.	166
5.1.2	Condiciones y parámetros generales de la cuenca.	174
5.1.3	Elaboración del plano de pendientes.	175
5.1.4	Elaboración del plano de áreas de aporte.	177
5.1.5	Tiempo de recarga para alcanzar equilibrio de drenaje.	180
5.1.6	Planos de estabilidad de taludes para mejores y peores condiciones.	181
5.1.7	Humedad y precipitación necesarias para ocasionar inestabilidad.	183
5.1.8	Conclusiones modelo de deslizamientos.	188
5.2	MODELOS HIDROLÓGICOS	190
5.2.1	Selección y elaboración de secciones de control.	191
5.2.2	Desarrollo del modelo hidrológico en HEC-HMS.	192
5.2.3	Desarrollo del modelo hidrológico en NAM.	201
5.3	CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO	203
5.4	MODELO HIDRÁULICO DEL FLUJO	205

5.4.1	Implementación de HEC-GeoRAS.	205
5.4.2	Modelamiento hidráulico por HEC-RAS.	206
5.4.3	Delimitación de las zonas de inundación.	210
6.	CONCLUSIONES	213
6.1	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	213
6.2	ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS	215
6.3	ASPECTOS GENERALES	216
	BIBLIOGRAFÍA	217
	ANEXO A	222
	ANEXO B	235
	ANEXO C	243
	ANEXO D	245
	ANEXO E	246
	ANEXO F	247
	ANEXO G	263
	ANEXO H	269
	ANEXO I	271

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Deslizamientos de tierra por lluvias. Febrero 12 de 2005. Girón, Santander, Colombia.	23
Figura 2. Deslizamiento rotacional. Armenia, Quindío.	28
Figura 3. Deslizamiento traslacional. Cuenca de la quebrada Angulito.	28
Figura 4. Rocas transportadas por flujo de detritos, Maiquetía, Venezuela 1999.	32
Figura 5. Flujo de detritos. Vargas, Venezuela, 1999.	33
Figura 6. Velocidad de los flujos de detritos, Provincia Yunnan, China.	34
Figura 7. Zona de depositación luego de una avalancha. Matata, Nueva Zelanda, 2005.	36
Figura 8. Formación de avalanchas por altas pendientes en laderas.	39
Figura 9. Avalancha producida por un sismo en el Río Páez, Colombia, 1994.	40
Figura 10. Avalancha de detritos en el volcán Santa Helena, EU. 1980.	43
Figura 11. Avalancha generada por el deshielo del nevado del Ruiz, 1985.	44
Figura 12. Grumo de suelo en agua durante ensayo de dispersión.	51
Figura 13. Esquema de: (a) Celda unitaria sílice-oxígeno y lámina tetraedra y (b) Celda unitaria aluminio-oxígeno y lámina octaedra.	52
Figura 14. Esquema capa difusa de iones o doble capa eléctrica.	54
Figura 15. Esquema de iones sodio y calcio adheridos a laminas de arcilla.	56

Figura 16. Experimento de serie de floculación.	59
Figura 17. Suelo dispersivo de la cuenca de la quebrada Angulito en agua destilada (izquierda) y en solución de cloruro de calcio al 1% (derecha).	59
Figura 18. Clasificación de suelos con problemas de sales.	60
Figura 19. Energía de repulsión y atracción como función de la separación entre partículas bajo tres concentraciones de electrolitos.	61
Figura 20. Sincronización de dipolos fluctuantes generando fuerzas de Van der Waals.	62
Figura 21. Energía de interacción neta como función de la separación entre partículas: (a) Alta concentración de electrolitos. (b) Concentración intermedia de electrolitos. (c) Baja concentración de electrolitos.	64
Figura 22. Tipos de arreglo de partículas arcillosas.	70
Figura 23. Solución de oro (puntos negros) y kaolinita.	70
Figura 24. Partículas de montmorillonita con alto contenido de sodio (izquierda) y alto contenido de calcio (derecha).	72
Figura 25. Atracción de agua a la superficie de la arcilla por hidratación de cationes.	73
Figura 26. Partículas de kaolinita.	74
Figura 27. Esquema de la estructura de: (a) kaolinita, (b) illita y (c) montmorillonita.	76
Figura 28. Partículas de illita.	76
Figura 29. Deslizamientos activados por evento de precipitación, Girón, Santander.	78
Figura 30. Efecto de la dispersión y la floculación en las propiedades de flujo de una suspensión de arcilla.	80

Figura 31. Esquema de la sedimentación de: (a) arcillas dispersas y (b) arcillas floculadas.	81
Figura 32. Reducción de la dispersión del suelo de la cuenca de la quebrada Angulito mediante la adición de yeso en ensayo de pinhole: (a) sin yeso y (b) 1% yeso.	86
Figura 33. Plano de localización general, escala 1:12500.	90
Figura 34. Miembro Órganos en la cuenca de la quebrada Angulito.	92
Figura 35. Zonas de bad-lands en la formación Órganos nivel superior.	94
Figura 36. Efecto orográfico de la cordillera Oriental y la sierra nevada del Cocuy.	96
Figura 37. Ubicación de la ZCI.	98
Figura 38. Interacción de la ZCI con elementos controladores del clima en Colombia.	100
Figura 39. Deslizamientos presentados en la Cuenca de la quebrada Angulito que generaron los flujos. Vista aérea y vista desde la parte alta de la cuenca.	106
Figura 40. Imagen satelital de nubosidad 12 de Febrero 2005, 4:20am.	109
Figura 41. Rocas arrastradas por los flujos, Vargas, Venezuela.	112
Figura 42. Representación del modelo digital de elevación del terreno mediante malla (izquierda) y superficie (derecha).	115
Figura 43. Relación entre el ángulo de inclinación y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) de acuerdo a diferentes valores de R.	121
Figura 44. Relación entre R y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) para ángulos de 80° y 165°.	122

Figura 45. Relación entre R^2 y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) con $R=0.9$ y ángulo= 80° , rango de 0 a 140.	123
Figura 46. Relación entre R^2 y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) con $R=0.9$ y ángulo= 80° , rango de 0 a 10.	124
Figura 47. Vista en 3D de superficie generada del MDE obtenido del sector de la cuenca de la quebrada Angulito.	125
Figura 48. Isoyetas generadas mediante precipitación espacializada sobre la cuenca de la quebrada Angulito.	128
Figura 49. Precipitación horaria promedio en la cuenca de la quebrada Angulito. 0:00 horas del 8 de Febrero a las 12:00 horas del 12 de Febrero.	128
Figura 50. Evapotranspiración horaria en la cuenca de la quebrada Angulito. 20:00 horas del 7 de Febrero a las 0:00 horas del 13 de Febrero.	129
Figura 51. Localización de muestras para ensayos de laboratorio.	132
Figura 52. a) Arcilla meteorizada mimbros finos formación Bucaramanga, presente en la parte alta de la cuenca. b) Materiales granulares de la cuenca, susceptibles a la humedad.	135
Figura 53. Curva granulométrica por hidrómetro del material del manto 2.	136
Figura 54. Remoción de aire atrapado en el picnómetro.	137
Figura 55. Cono de arena.	139
Figura 56. a) Equipo de corte directo. b) Muestra después del ensayo.	141
Figura 57. Envoltorio de falla para muestras no saturadas.	142
Figura 58. Envoltorio de falla para muestras saturadas.	143

Figura 59. Grado de dispersión en la escala de 0 a 5.	145
Figura 60. Ensayo visual de dispersión del DAWA.	145
Figura 61. Ensayo de doble hidrómetro.	147
Figura 62. Ensayo de percolación: (a) Tubo de perforación fijado para dar inicio al ensayo, (b) Perforación punto 3 después del ensayo.	149
Figura 63. Ensayo de permeabilidad, método de cabeza variable.	152
Figura 64. Desarrollo ensayo de pinhole: (a) Equipo del ensayo, (b) Cápsula.	154
Figura 65. Ensayo PINHOLE con nivel piezométrico de 50mm.	155
Figura 66. Ensayo de PINHOLE con nivel piezométrico de 380mm.	156
Figura 67. Soluciones de suelo para determinación de pH.	158
Figura 68. Ubicación de los sitios de muestreo para evaluación de pH.	158
Figura 69. Ubicación de los sitios de muestreo para evaluación de ESP (extracción-muestra).	161
Figura 70. Relación de ESP y pH en los suelos de la quebrada Angulito.	162
Figura 71. Prueba de Emerson en agua destilada (izquierda) y solución de cloruro de calcio al 1% (derecha).	163
Figura 72. Gráfico de Cohesión vs. Humedad Relativa aplicado en el modelo.	173
Figura 73. Plano de pendientes de terreno de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante Surfer v.8.	176
Figura 74. Distribución del área de la cuenca de la quebrada Angulito de acuerdo a su pendiente.	176

Figura 75. Esquema de la distribución de áreas de aporte y la obtención de las direcciones de flujo.	178
Figura 76. Plano de áreas de aporte de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante TARDEM.	179
Figura 77. Plano de direcciones de flujo de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante TARDEM.	179
Figura 78. Plano de áreas de aporte de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante la ecuación (28).	180
Figura 79. Porcentaje del área de la cuenca en equilibrio de drenaje vs. tiempo de recarga.	181
Figura 80. Plano de áreas de aporte para 108 horas de recarga de la cuenca de la quebrada Angulito, considerando el área de aporte máxima.	182
Figura 81. Plano de estabilidad de taludes de la cuenca de la quebrada Angulito bajo las mejores condiciones ($w=0$).	184
Figura 82. Plano de estabilidad de taludes de la cuenca de la quebrada Angulito bajo las peores condiciones ($w=1$).	184
Figura 83. Plano de humedad necesaria para generar inestabilidad. Zonas amarillas requieren $w>1$ (zonas totalmente estables).	185
Figura 84. Plano de precipitación necesaria para generar inestabilidad en los taludes de la cuenca de la quebrada Angulito (viviendas se muestran en negro).	185
Figura 85. Plano de deslizamientos estimados para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:5000 (deslizamientos en rojo y viviendas en negro).	187

Figura 86. Área de la cuenca que presenta inestabilidad vs. Precipitación (tiempo de recarga igual a 108 horas).	188
Figura 87. Registros fotográficos de los niveles alcanzados en los lugares seleccionados para: (a) sección 1 y (b) sección (2).	192
Figura 88. Esquema de las secciones de control: (a) sección 1 y (b) sección 2, escala 1:150 vertical y 1:500 horizontal.	193
Figura 89. Esquema del proceso realizado en HEC-GeoHMS.	196
Figura 90. Modelo conceptual de la subcuenca (izq.) con el método de la onda cinemática (der).	199
Figura 91. Escorrentía estimada mediante HEC-HMS para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito.	201
Figura 92. Escorrentía estimada mediante NAM para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito (se incluye la estimación mediante HMS).	203
Figura 93. Esquema de los procesos realizados en HEC-GeoRAS.	207
Figura 94. Esquema del nivel de inundación para: (a) sección de control 1 y (b) sección de control 2. Escala 1:150 vertical y 1:500 horizontal.	209
Figura 95. Plano de zonas de inundación para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:4000.	211
Figura 96. Plano de zonas de inundación para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en los barrios localizados en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:2000.	212

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Espesor aproximado de la doble capa eléctrica como función de la concentración de electrolitos y valencia de los iones con un potencial de superficie constante.	55
Tabla 2. Valores de floculación para montmorillonita en solución de cloruro de calcio.	85
Tabla 3. Datos precipitación registrados por el IDEAM 7-02-2005.	107
Tabla 4. Datos precipitación registrados por el IDEAM 8-02-2005.	107
Tabla 5. Datos precipitación registrados por el IDEAM 9-02-2005.	108
Tabla 6. Datos precipitación registrados por el IDEAM 10-02-2005.	108
Tabla 7. Datos precipitación registrados por el IDEAM 11-02-2005.	109
Tabla 8 Datos precipitación registrados por el IDEAM 12-02-2005.	110
Tabla 9. Valores de RMS para diferentes métodos de generación de grillas.	119
Tabla 10. Estaciones escogidas para obtención de precipitación en la cuenca de la quebrada Angulito.	126
Tabla 11. Resultados análisis granulométricos.	132
Tabla 12. Límites de Atterberg y clasificación.	134
Tabla 13. Densidad seca y porosidad del suelo en campo.	140
Tabla 14. Resumen resultados ensayo de corte directo.	142
Tabla 15. Ranking de dispersión y respuesta al yeso a diferentes niveles de dispersión de la arcilla.	144

Tabla 16. Resultados ensayo de doble hidrómetro.	147
Tabla 17. Resultados ensayo de percolación.	149
Tabla 18. Valores de pH para las muestras de la figura 67.	157
Tabla 19. Resumen caracterización química de muestras del manto 2.	160
Tabla 20. Precipitación diaria en los primeros 15 días de Febrero 2005.	198
Tabla 21. Parámetros utilizados para el modelo en NAM.	202

RESUMEN

TÍTULO:

CARACTERIZACIÓN, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LOS FLUJOS DE LODOS Y DETRITOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA ANGULITO EN GIRÓN, SANTANDER*

AUTORES:

SUÁREZ ZAMBRANO, Néstor Ricardo

SUÁREZ SÁNCHEZ, Javier Alfonso**

PALABRAS CLAVES:

Dispersión, Flujo hiperconcentrado, Flujo de detritos, Flujo de lodos, Modelamiento de deslizamientos, Modelamiento hidrológico, Modelamiento hidráulico.

DESCRIPCIÓN:

La presente investigación abarca el análisis del fenómeno ocurrido en la cuenca de la quebrada Angulito en Febrero de 2005. En dicha cuenca se activaron un gran número de deslizamientos debido a precipitación extraordinaria, y se generaron flujos hiperconcentrados y de detritos que causaron una catástrofe en la zona.

El trabajo contiene una recopilación de información que trata sobre la dispersión en un suelo, sus métodos de detección y el efecto que esta tiene en las propiedades geotécnicas y reológicas del material y de la solución de suelo. Con el fin de analizar el fenómeno se realizan tres modelos: un modelo de los deslizamientos basado en descripciones teóricas e información contenida en sistemas raster, un modelo hidrológico de precipitación-escurrimiento desarrollado en NAM y HEC-HMS para la estimación de los caudales presentados, y un modelo hidráulico del flujo hiperconcentrado en HEC-RAS. Se realizó una caracterización geotécnica de los materiales, haciendo énfasis en el miembro Órganos nivel superior (estrato donde se presentaron los deslizamientos). Los ensayos de laboratorio incluyen métodos de detección de propiedades dispersivas en un suelo.

El suelo de la cuenca muestra una pérdida drástica y rápida de resistencia al interactuar con el agua, que es atribuida a las propiedades dispersivas en él detectadas. Se plantean posibles estrategias de mitigación y mejoramiento de las condiciones, tales como la adición de enmiendas de yeso y otras sales liberadoras de calcio. Considerando los resultados obtenidos y dada la alta probabilidad de que ocurra un evento de incluso mayores proporciones que el analizado, se recomienda el estudio de estrategias de reubicación para la población localizada en la cuenca.

* Tesis de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Director Ing. MSc. Jaime Suárez Díaz

ABSTRACT

TITTLE:

CARACTERIZATION, ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF THE DEBRIS AND MUD FLOWS OCCURRED AT THE BASIN OF THE ANGULITO CREEK IN GIRÓN, SANTANDER*

AUTHORS:

SUÁREZ ZAMBRANO, Néstor Ricardo

SUÁREZ SÁNCHEZ, Javier Alfonso**

KEYWORDS:

Dispersion, Hyperconcentrated flows, Debris flows, Mud flows, Slides modeling, Hydrologic rainfall-runoff modeling, Hydraulic modeling.

DESCRIPTION:

The present investigation includes the analysis of the phenomenon occurred at the basin of the Angulito creek on February 2005. At this basin, the elevated levels of precipitation activated many slides and generated debris and hyperconcentrated flows that caused a major catastrophe.

This work contains a compilation of information concerning the dispersion properties of a soil, the methodology of detection of this kind of problems and its effect on the geotechnical and rheological characteristics of the soil and the soil solution. Three models were constructed to analyze the event: a model of the slides based on theoretical descriptions and information contained in raster systems, an hydrological rainfall-runoff model developed using NAM and HEC-HMS to obtain an estimation of the runoff presented, and an hydraulic model of the hyperconcentrated flow created using HEC-RAS. The materials present at the basin were geotechnically characterized, with emphasis on the soil of the superior level of the Órganos member (stratum where most of the slides appeared). The laboratory tests include methods to detect dispersive properties in a soil.

The soil of the basin shows a dramatic and almost spontaneous decrease of resistance when it interacts with water, this behavior is attributed to the dispersive properties found in the material. Possible mitigation strategies and methods to improve the soil conditions were presented; these include soil treatments using gypsum and other calcium releasing salts to reduce soil dispersion. Taking into account the results of the investigation and considering the high probability of an event of even higher proportions to occur, the study of possible strategies to relocate the residences established at the basin is highly recommended.

* Degree project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering

Civil Engineering School

Advisor Eng. MSc. Jaime Suárez Díaz

INTRODUCCIÓN

En el mes de Febrero de 2005 se presentó en el municipio de Girón, departamento de Santander, una catástrofe con cerca de 996 viviendas destruidas, más de 50 muertos y cuantiosas pérdidas económicas, producto del desbordamiento del río de Oro y una gran cantidad de flujos hiperconcentrados y deslizamientos.

El fenómeno fue generado por lluvias extraordinarias ocurridas entre los días 7 y 12 de Febrero, las cuales ocasionaron un aumento drástico en los niveles de escorrentía y activaron un gran número de deslizamientos en la zona. Uno de los principales problemas se presentó en la cuenca de la quebrada Angulito, afluente del río de Oro. En esta cuenca se encuentran localizados los barrios Portal de Castilla, Asocovigirón, Villa Campestre, Angulito y parte de la infraestructura perteneciente a la empresa Transejes de Colombia S.A. Se perdieron varias vidas humanas y un gran número de viviendas fueron destruidas por los flujos hiperconcentrados y de detritos generados en la cuenca.

La presente investigación incluyó: la búsqueda de información acerca del comportamiento de los materiales, flujos y deslizamientos; la recopilación de información geotécnica, geológica e hidrológica, mediante ensayos de laboratorio y campo o extracción de datos de equipos de medición en la zona; y el modelamiento de los deslizamientos y flujos.

La investigación permitió analizar el fenómeno ocurrido, comprender su comportamiento, diagnosticar sus causas, estimar su conducta a futuro y hallar posibles estrategias de mitigación.

La información encontrada será de gran importancia para evaluar la posible aparición de este tipo de eventos en sectores aledaños y de esta manera prevenir que una catástrofe como la ocurrida pueda repetirse.

1. MOVIMIENTOS EN MASA

En Colombia existen condiciones que favorecen la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, tales como la abrupta topografía de las cordilleras, la actividad sísmica, su ubicación en la zona tropical y los altos valores de precipitación.

Los movimientos en masa constituyen un riesgo geológico de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio, sobre todo en áreas de alta pendiente. No obstante, la importancia dada a este tipo de procesos naturales es baja a comparación de aquella otorgada a las inundaciones, los volcanes o terremotos. Por esta razón, la mejor estrategia para reducir sus impactos en la población es la prevención, que precisa de la detección del fenómeno, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos.

Los movimientos masivos son aquellos que desplazan grandes volúmenes de material a lo largo de pendientes; donde se incluye su desprendimiento, transporte y depositación de grandes cantidades por acción del agua (véase figura 1).

Figura 1. Deslizamientos de tierra por lluvias. Febrero 12 de 2005. Girón, Santander, Colombia.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

1.1 GENERALIDADES

Se hace importante determinar las principales causas que activan este tipo de fenómenos y el efecto que muestran algunas variables en los eventos conocidos de remoción en masa, específicamente en los deslizamientos, flujos y avalanchas. Para entender “el por qué” se activan los movimientos en masa, tienen que considerarse las principales características que influyen para la generación de estos fenómenos, tal como se expone a continuación.

1.1.1 Factores que influyen en la estabilidad de las laderas.

La estabilidad de laderas está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores. Desde un punto de vista físico, los movimientos de tierra se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno. Los factores que influyen en la estabilidad dependen de la unión de diversas variables entre las que se encuentran:

- Características del terreno: los lugares montañosos con pendientes fuertes son los que más fácilmente sufren deslizamientos, aunque en ocasiones se presentan pendientes bajas con rocas sueltas o exceso de agua en el subsuelo que permiten su generación.
- Condiciones climáticas: en las regiones lluviosas suele haber espesores grandes de materiales alterados por la meteorización y niveles freáticos altos, lo cual, en conjunto, facilita la aparición de deslizamientos. Las lluvias intensas son el principal factor desencadenante de deslizamientos en Colombia.
- Macizos rocosos con fallas y fracturas: tienen especial importancia en los desprendimientos. En Colombia la mayoría de las caídas de rocas y otros materiales se presentan en lugares en los que el terreno tiene abundantes fracturas y se ha ido produciendo erosión en la base de sus laderas. En estos lugares, cuando llueve intensamente, se pueden producir desprendimientos con facilidad.
- Erosión: corresponde al desprendimiento, transporte y depositación de partículas pequeñas de suelo o roca debido al efecto del movimiento del agua. En ocasiones el flujo se concentra en canales, produciendo surcos y cárcavas. Se puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud, donde los ríos, el mar u otros procesos van erosionando la base de las laderas y provocan gran cantidad de deslizamientos.

- Expansividad de las arcillas: algunas arcillas tienen la propiedad de aumentar su volumen al empaparse. Esto supone que los terrenos arcillosos, en climas en los que se alternan periodos secos con húmedos, se deforman y empujan taludes, rocas, carreteras, etc., provocando deslizamientos y desprendimientos.
- Acciones antrópicas: los movimientos de tierras y excavaciones que se hacen para construir carreteras, ferrocarriles, edificaciones, presas, etc., rompen los perfiles de equilibrio de las laderas y facilitan la aparición de desprendimientos y deslizamientos. De igual forma, los materiales que están en la base de la pendiente suelen ser removidos, siendo esta la zona más vulnerable y la que soporta mayores tensiones, lo que obliga a fijar las laderas con costosos sistemas de sujeción y a estar continuamente rehabilitando las vías de comunicación en muchos lugares.
- Se conoce la acción de otros factores como terremotos, rocas calizas, estructuras kársticas, etc., que en ocasiones provocan movimientos del terreno, pero cuya importancia es comparativamente menor que los citados anteriormente.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS MASIVOS

Considerando que los deslizamientos ocurridos en Febrero de 2005 fueron los principales actores de la catástrofe ocurrida en la cuenca de la quebrada Angulito, se hace importante entrar a observar posibles métodos de clasificación, para de esta manera comprender sus características generales.

1.2.1 Deslizamientos.

Consisten en un descenso masivo y relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales a lo largo de una pendiente. El material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez. El deslizamiento se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, o plano de cizalla, que facilita la acción de la gravedad. Esta superficie se crea por la absorción de agua a una profundidad determinada, lo que implica un cambio de densidad de la capa subyacente. Esto es lo que provoca la existencia de un plano de deslizamiento que aparece sobre un basamento arcilloso. Generalmente son capas arcillosas las que funcionan como superficies de deslizamiento, por su capacidad para retener el agua. Afecta tanto a tierras poco

compactas como a rocas y a material meteorizado y poco compacto que carece de debilidades estructurales.

Sharpe, en 1938, definió los deslizamientos como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas. Según Croizer, un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte¹.

Dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la superficie de deslizamiento el movimiento en masa puede ser superficial, cuando afecta a poco volumen, o profundo, en los casos que se ven afectados grandes volúmenes. En este último caso se presenta un perfil cóncavo o movimiento de rotación.

Los deslizamientos también pueden afectar a rocas compactas si en ellas se encuentra una discontinuidad que funcione como superficie de deslizamiento, en cuyo caso reciben el nombre de deslizamientos en lámina o en capas. En la roca debe encontrarse una fisura que, al alterarse y humedecerse el plano en el que se encuentra, permite el deslizamiento de la parte superior de la roca a lo largo de la pendiente por gravedad.

1.2.1.1 Clasificación de los deslizamientos.

- Según la velocidad: dependiendo de la velocidad, los deslizamientos se pueden clasificar en rápidos y lentos.

- Rápidos: alcanzan velocidades hasta de metros por segundo y se pueden originar en zonas con pendientes muy fuertes y empinadas, donde domina la caída de rocas y residuos que se acumulan formando un talud, o se puede producir al deslizarse una gran masa en segundos o minutos. En esta clasificación se encuentran desprendimientos y flujos de lodo. Este tipo de flujos, donde el agua tiene una participación importante, pueden producirse también sobre pendientes muy bajas siempre y cuando la granulometría de los materiales sea fina (limos y arcillas). Su puesta en movimiento puede

¹ SANTACANA, Núria. Analysis of the Susceptibility of a Hillside to the Break for Superficial Slips to Regional Scale [online]. [España]: University of Catalunya, sep. 2002 [cited September 2004]. Available from internet: <<http://www.tdx.cesca.es/TDX-0713101-113341>>. p. 7.

ser producida por una vibración brusca (caída de un gran bloque rocoso, terremoto, etc.). La velocidad que pueden alcanzar estos flujos es de hasta 100m/seg, con efectos catastróficos².

- Lentos: las velocidades son del orden de centímetros o metros por año. Se caracterizan por transportar gran cantidad de material. Algunas evidencias que muestran la presencia de un deslizamiento lento son: la inclinación de los árboles a favor de la pendiente, la inclinación de cercas, el agrietamiento de casas, etc.

• Según tipo de falla: los deslizamientos se pueden presentar de dos formas, deslizamientos rotacionales o de perfil profundo y traslacionales o planares.

Varnes presenta la siguiente definición de deslizamiento Rotacional: “en un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento”³. En este tipo de deslizamiento la falla tiende a formar una curva, pero no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales de origen residual donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad. Es común que la forma y localización de la superficie de falla esté afectada por las características propias de su estructura, en las que se incluyen las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. En la cabeza del movimiento el desplazamiento es casi vertical y tiene muy poca rotación, sin embargo, se puede observar que generalmente la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta (véase figura 2).

El deslizamiento traslacional consiste en el desplazamiento de una masa a lo largo de una superficie de ruptura, de forma plana u ondulada, que se desplaza hacia abajo, y en el cual no se observa rotación durante su movimiento. Este tipo de deslizamientos fueron los que se presentaron en la cuenca de la quebrada Angulito (véase figura 3), con desprendimientos de material de poca profundidad.

² SEPULVEDA, S. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos. Aplicación en la Quebrada Las Cañas, Región Metropolitana. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Departamento de Geología, 1998. p. 6.

³ VARNES, D. Landslides Types and Process, Special Report 29, Landslides and Engineering practice. Washington: HRB National Research Council, 1958. p. 25.

Figura 2. Deslizamiento rotacional. Armenia, Quindío.



Fuente: INGEOMINAS.

Figura 3. Deslizamiento traslacional. Cuenca de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

Es común encontrar en los deslizamientos traslacionales que la superficie de falla se dispone en zonas de debilidad tales como juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización. Cuando se presentan en zonas de discontinuidad sencilla se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se les conoce como deslizamiento de cuña, y cuando se

presentan sobre un sector que posee varios niveles de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera⁴.

1.2.2 Flujos.

Como se mencionó anteriormente, estos fenómenos corresponden a eventos de erosión en masa que incluyen el desprendimiento, el transporte y la depositación de grandes cantidades de material. Son ocasionados generalmente por influencias de eventos dinámicos del globo terrestre, como sismos, erupciones volcánicas, precipitaciones excepcionales, etc.

Es importante caracterizar estos eventos para conocer su comportamiento y así su posible metodología de análisis. La clasificación que se presenta a continuación es la propuesta por Cruden y Varnes⁵.

Los flujos no son iguales en todos los casos, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan. Según Brunsden⁶, estas son algunas de las formas más frecuentes:

1.2.2.1 Flujos de lodo. Se forman en el momento en que la tierra y la vegetación son debilitadas considerablemente por el agua, generalmente en eventos con tempestades muy intensas que ocurren en épocas excepcionalmente lluviosas, alcanzando gran fuerza cuando se incrementa la intensidad de las lluvias y su duración.

Principalmente, los flujos de lodo ocurren en las laderas en donde se absorben grandes cantidades de agua, produciéndose la saturación total de masas de suelo y, como consecuencia, la licuación de los mismos. Estos flujos pueden ser generados por una pequeña falla o deslizamiento de rotación o traslación, seguido de un canal a través del cual fluye el material viscoso, y finalmente una zona de deposición o acumulación. En las zonas bajas, los flujos de lodo abarcan áreas inmensas. La capa vegetal y el manto de

⁴ SUÁREZ, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 1999. p. 17.

⁵ CRUDEN, D. and VARNES, D. Landslide Types and Processes in Landslides, Investigation and Mitigation. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1996. p. 40.

⁶ BRUNSDEN, D. Mudslides Slope Instability. USA: Jhon Wiley, 1984. p. 363.

suelo residual generalmente se lavan completamente dejando expuesta la roca meteorizada.

Una descripción de las características generales de este tipo de flujo es la que propone Suárez⁷:

Generalmente consisten de altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas), aunque también grandes bloques o cantos de roca. De hecho el fluido se compota como un “**slurry**” homogéneo con una onda frontal y una serie de pulsaciones. De acuerdo con Wan y Chien este tipo de fluidos se convierten en homogéneos a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m³. A medida que la concentración aumenta la estructura de los sedimentos se floclula rápidamente y la viscosidad aumenta en forma fuerte formándose una especie de cohesión de la mezcla suelo – agua.

- Mecánica del movimiento: son flujos viscosos y se caracterizan por pulsos intermitentes (tanto en planta como en perfil). Un evento puede incluir desde 10 hasta cientos de pulsos. A medida que avanza cada onda, esta va adhiriendo nuevos depósitos y se vuelve más delgado y más lento. El periodo de estos flujos varía de 10 a 40 segundos y sus longitudes entre 50 y 300 metros⁸. El frente de onda del flujo intermitente generalmente presenta la mayor amplitud, es alto y empinado y consiste principalmente de grandes bloques de roca.
- Depositación: se forman depósitos de sedimentos provenientes del flujo de lodo de manera gradual. Esto debido a que, cuando el flujo comienza a perder velocidad a causa de la pérdida de energía cinética en las zonas de baja pendiente, éste va depositando sedimentos a lo largo de su recorrido, formando filas paralelas a la dirección del flujo.

⁷ SUÁREZ, J. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos, 2001. p. 174.

⁸ JHONSON, A, Debris Flow Slope Instability, cited by SUÁREZ. Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 175.

1.2.2.2 Flujos hiperconcentrados granulares.

- Descripción del fluido: el flujo hiperconcentrado está formado por una mezcla de partículas gruesas (arenas, gravas y bloques) y agua; por lo que la mezcla no tiene cohesión. Se considera este tipo de flujo si la concentración en volumen de sólidos se encuentra entre 20% y 60%, que corresponde a un peso específico de 2.0ton/m³ aproximadamente⁹. Una pequeña cantidad de arcilla o limo fino en los flujos hiperconcentrados genera cambios importantes en sus propiedades geológicas y, debido a esto, la velocidad de caída de sedimentos presenta características muy diferentes a los otros tipos de flujo. La intensidad de la turbulencia es débil, por lo que este tipo de movimiento no se presenta en fenómenos de pequeña escala.

El fluido se comporta como Newtoniano y se puede aplicar el modelo de Manning para su simulación. Al aumentar la concentración de sedimentos, los flujos hiperconcentrados dejan de comportarse como Newtonianos y pueden convertirse en flujo de detritos (**Debris flows**), modelándose entonces como un fluido Bingham. Los flujos hiperconcentrados pueden convertirse en laminares si las concentraciones de sedimentos son muy altas, especialmente en corrientes pequeñas.

Los flujos ocurridos durante el evento de Febrero de 2005 en el municipio de Girón presentaron características similares. Por esta razón se planteó en el modelo hidráulico que el fluido se comporta de acuerdo a las anteriores consideraciones.

- Mecánica del movimiento: el transporte de sedimentos sigue los patrones generales de la mecánica tradicional del transporte de sedimentos en agua. El flujo tiene dos fases y las partículas se mueven parcialmente como carga de fondo y como carga suspendida. Aunque la velocidad del flujo puede ser muy alta, la superficie de la corriente aparece como suave y calmada.

Cuando la concentración aumenta, la velocidad disminuye gradualmente y la turbulencia desaparece, generándose un exceso de concentración de partículas hasta un punto en que el flujo turbulento se puede transformar en flujo laminar, en donde el peso de las

⁹ HUNGR, O, A Model for the Runout Analysis of Rapid Flow Slides, Debris Flows, and Avalanche, cited by SUÁREZ. Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 177.

partículas es soportado completamente por la fuerza dispersiva y la distribución vertical de concentración de sólidos se vuelve casi uniforme. Si la concentración sigue aumentando, el espacio entre partículas disminuye, perdiendo movilidad y separación entre las mismas, hasta que la concentración se vuelve tan alta que el flujo se bloquea completamente.

- **Depositación:** al disminuir la velocidad, las partículas se van sedimentando; primero los cantos más grandes y pesados y luego las partículas finas, formándose un depósito clasificado de partículas. La velocidad de caída de las partículas en los procesos de deposición disminuye al aumentar la concentración.

1.2.2.3 **Flujo de detritos.** Los flujos de detritos constituyen un fenómeno muy común en las laderas de montaña, dando lugar a una rápida transferencia de sedimentos y, en ocasiones, a situaciones catastróficas que afectan la infraestructura y la seguridad de las personas. Además tienen una gran influencia sobre la morfología de los cauces. En la figura 4 se puede apreciar la magnitud del volumen y tamaño del material que puede llegar a ser transportado.

Figura 4. Rocas transportadas por flujo de detritos, Maiquetía, Venezuela 1999.



Fuente: Universidad Central de Venezuela.

- Descripción del fluido: este proceso de transporte es más común en zonas áridas y semiáridas donde se tienen lluvias poco frecuentes pero violentas, taludes con inclinaciones muy fuertes y vegetación escasa, tal como en los flujos que se presentaron por lluvias excepcionales en el litoral venezolano en Diciembre de 1999 (véase figura 5). Los depósitos de flujo de detritos son característicamente mal clasificados, incluyendo grandes bloques de diferentes tamaños, y no presentan estructuras sedimentarias primarias. Así mismo, son impermeables y no-porosos debido al alto contenido de lodo en la matriz. Este tipo de flujo puede relacionarse como un flujo turbulento de granos en donde no se diferencia una fase líquida o gaseosa, ya que el movimiento se genera a través de la transferencia de momento al colisionar las partículas o bloques que transporta el flujo. Los sedimentos son los que controlan el movimiento y el agua no es tan importante como en los flujos hiperconcentrados. Los flujos no necesariamente son viscosos y son generalmente turbulentos de dos fases: la fase líquida es un **slurry** consistente en agua y partículas finas, y la fase propiamente sólida corresponde a bloques y gravas de gran tamaño¹⁰.

Figura 5. Flujo de detritos. Vargas, Venezuela, 1999.



Fuente: Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

¹⁰ SUÁREZ. Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 179.

La ocurrencia de los flujos de detritos está relacionada con dos factores importantes: la intensidad de lluvia y la cantidad de sedimentos disponibles para que sean transportados por el agua.

- Mecánica del movimiento: generalmente ocurre en zonas de alta pendiente, ya que esta facilita el transporte de grandes partículas a altas velocidades. Por esta razón este tipo de flujos se hace enormemente destructivo, debido a la gran energía que toma al descender por las laderas (véase figura 6).

Figura 6. Velocidad de los flujos de detritos, Provincia Yunnan, China.



Fuente: University of Canterbury, New Zealand.

La mecánica del movimiento se hace muy similar a la que toman los flujos hiperconcentrados, aclarando que se diferencian en cuanto a tamaños de partículas transportadas y concentración de sedimentos. El movimiento posee gran energía con velocidades que pueden llegar a superar los 7m/s.

Wole y Hachich hablan de este tipo de flujos como ocasionados por deslizamientos traslacionales producto de lluvias intensas. Destacan que usualmente ocurren en laderas con pendientes entre 40° y 45°, desarrollan anchos entre 7m y 50m y longitudes muy variables, excediendo en algunos casos los 500m con profundidades superiores a 1m. El

peso unitario saturado del suelo varía entre 17 y 18 KN/m³, y la sobrecarga por vegetación se encuentra usualmente en un rango de 0 a 3Kpa¹¹.

1.2.3 Avalanchas.

Aún cuando el término Avalanchas se refiere a los aludes de nieve, su nombre es utilizado comúnmente para designar los flujos extraordinarios de agua con lodos y detritos que ocurren en los cauces de los ríos por causa de sismos, erupciones volcánicas o lluvias intensas, en zonas de índices pluviométricos excepcionalmente altos y generalmente con ausencia de vegetación¹². Cuando una Avalancha es producida por una explosión volcánica se denomina Lahar.

Las avalanchas de tierra son flujos de materiales de suelo o residuos de roca, generalmente entremezclados con agua y extremadamente rápidos, en los cuales la dinámica del movimiento controla su comportamiento. Aunque las avalanchas corresponden generalmente a flujos saturados, la saturación no es prerrequisito para su ocurrencia y en ocasiones se presentan avalanchas de materiales secos.

Las avalanchas son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados, que involucran masas considerables de suelo o roca, generalmente con un volumen importante de agua de saturación. Estos forman una masa de comportamiento hidráulico complejo que puede lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo, afectando áreas relativamente grandes dentro de una cuenca. Las avalanchas pueden lograr velocidades de más de 20 m/s (70 Km/h).

1.2.3.1 Características físicas. Hidráulicamente las avalanchas son flujos de lodo y detritos de alta viscosidad, compuestos por agua, coloides, arenas y piedras. El flujo de líquido y sólidos se puede tratar aproximadamente como el de un fluido newtoniano que está definido por dos características físicas: Densidad y Viscosidad.

¹¹ WOLLE, C and HACHICH, W. Rain Induced Landslides in Southeastern Brazil. *En*: International Congress of Soil Mechanics. (12° : 1989 : Rio de Janeiro). Proceedings of the XII International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989. p. 1639-1642.

¹² SILVA, Gustavo. Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas [en línea]. [Colombia]: Universidad Nacional de Colombia. [citado Jun 2005]. Disponible en internet: <<http://www.geocities.com/gsilvam/#publicaciones>>. p. 1.

La densidad de los lodos está comprendida entre 1.0 gr/cm³ y 2.0 gr/cm³. El valor más bajo se aplica cuando el volumen de sólidos en la mezcla fluida es inferior al 20% del total; el más alto cuando esa relación es superior al 80%.

La viscosidad absoluta del agua clara a 20°C de temperatura es de 1 centipoise. En lodos muy espesos la viscosidad absoluta puede alcanzar valores próximos a 6000 poises.

La figura 7 muestra la zona de depositación luego de una avalancha, en donde se observan los niveles alcanzados por los sedimentos y el tipo de material transportado.

Figura 7. Zona de depositación luego de una avalancha. Matata, Nueva Zelanda, 2005.



Fuente: University of Canterbury, New Zealand.

1.2.3.2 Eventos Generadores de Avalanchas. Según Suárez¹³, los eventos generadores para que ocurran las avalanchas pueden ser:

¹³ SUÁREZ. Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 185.

- Lluvias intensas: muchos investigadores han propuesto correlaciones entre precipitaciones y deslizamientos, todas ellas orientadas a predecir eventos catastróficos como los flujos de la quebrada Angulito. Entre ellos encontramos algunos comentarios sobre éste tópico.

Vargas correlacionó deslizamientos exclusivamente con intensidad de lluvia, concluyendo que cuando la intensidad supera los 100mm/día la probabilidad de deslizamientos es muy alta. Aboshi sugirió que se puede predecir la falla de laderas correlacionando la lluvia total caída durante dos semanas antes del día previo y la lluvia de dicho día. Gudicini e Iwasa, basados en registros de lluvias de nueve regiones en Brasil, presentaron una correlación tentativa de lluvias y deslizamientos. Ellos formularon las siguientes conclusiones: 1) cuando la lluvia excede 250-300mm la ocurrencia de deslizamientos es inminente, 2) es muy probable la ocurrencia de deslizamientos cuando los registros de lluvia alcancen 8% a 17% de la precipitación media anual, siempre que existan lluvias precedentes. 3) Eventos lluviosos mayores que el 20% de la precipitación media anual tienden a generar dimensiones de catástrofes.

Brand recomienda una tabla que correlaciona cuatro niveles de gravedad de deslizamientos (de nulo a desastroso). Ésta tabla ha sido utilizada como base para los sistemas de alerta en Hong Kong. Según este autor, una intensidad de lluvia de 70mm/h aparenta ser el umbral por encima del cual ocurrirían los deslizamientos. Además considera que las lluvias precedentes no constituyen un factor de importancia para su ocurrencia, con la excepción de pequeños deslizamientos, los cuales normalmente se generan con lluvias de baja intensidad y corta duración. El autor considera que tal solo pocos días de lluvias antecedentes pueden ser significativos.

Wolle y Hachich¹⁴, basados en investigaciones de deslizamientos inducidos por lluvias en Sierra do Mar, al sureste de Brasil, definieron un umbral de lluvia de 180mm/día para la ocurrencia de deslizamientos, partiendo de que el suelo ha sido previamente humedecido por lluvia continua. Concluyeron que sin este último requisito, los efectos de lluvias aún fuertes estarían limitados a deslizamientos de menor escala.

¹⁴ WOLLE, Op. cit., p. 1639-1642.

Bhandari sugirió un umbral de intensidad de lluvia de 200mm/día con el fin de definir un sistema de alerta temprano, basado en estudios de deslizamientos en Sri Lanka. De acuerdo a estos autores las intensidades de lluvia mayores a dicho valor, deben ser consideradas premoniciones de catástrofes.

Las experiencias en zonas tropicales indican que precipitaciones intensas son las responsables de la mayor parte de los deslizamientos de taludes inestables. Dependiendo de las características físicas y geotécnicas de los taludes, el evento "lluvia" que puede generar un deslizamiento tiene condiciones propias para cada caso particular. Esta lluvia que está asociada a un deslizamiento de determinada magnitud en un sitio particular se conoce como "lluvia crítica" y se define por su Intensidad, Duración y Frecuencia. Estos parámetros indican hasta cierto grado la posibilidad de que la infiltración sea mayor que la exfiltración y así mismo, el caudal de agua requerido para que se generen los flujos.

Para analizar el factor lluvia como mecanismo de formación de avalanchas se hace importante definir los siguientes parámetros y variables.

- Susceptibilidad: la susceptibilidad a la ocurrencia de avalanchas por lluvia de una cuenca depende de los siguientes factores:

Permeabilidad del suelo: Sitar describe la ocurrencia de flujo de detritos como el resultado de un aumento rápido de la presión de poros durante el periodo de la lluvia intensa. Plantea que la situación crítica ocurre cuando se presenta una condición de flujo subterráneo paralelo a la superficie del talud¹⁵.

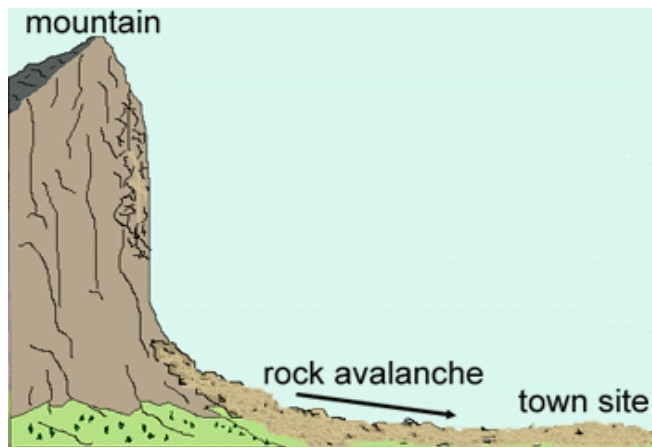
Para que se formen las avalanchas, la saturación por infiltración debe ser más rápida que la capacidad de drenaje interna de los materiales, de tal manera que se genere un aumento rápido de la presión interna y un flujo de agua subterránea paralelo a la superficie del talud. Además se requiere una capacidad alta de infiltración para permitir la

¹⁵ SITIAR, N. Initiation of Rainfall Induced Debris Flows. En: Simposio Panamericano de Deslizamientos. (1º : 1989 : Guayaquil). I Simposio Panamericano de Deslizamientos. Guayaquil, Ecuador, 1989. p. 23.

entrada rápida de agua y alta permeabilidad para facilitar la formación de flujos. Por esta razón es que en los suelos residuales fracturados se presenta un alto grado de susceptibilidad a avalanchas.

Pendiente en las laderas: para la ocurrencia de avalanchas se requiere que los deslizamientos o denudación de las laderas sea rápido o que haya un aporte de grandes volúmenes de material en poco tiempo. Debido a esto, las altas pendientes son una variable importante al analizar la posibilidad de que los deslizamientos terminen en una avalancha (véase figura 8).

Figura 8. Formación de avalanchas por altas pendientes en laderas.



Fuente: Department of Geological Science, Long Beach

Pendiente y sección del cauce: un perfil típico de una corriente se divide en tres zonas, que son el desprendimiento, transporte y deposición. En la primera zona se requiere generalmente una pendiente mayor de 25° para generar movimientos de remoción en masa, aunque puede ser de hasta 15° . La segunda zona requiere pendientes mayores a 10° . Según Vandine¹⁶, a los 15° la depositación de diques y terrazas puede iniciar, sin embargo, en el cono de deyección, la depositación comienza una vez el gradiente disminuye a valores de menos de 10° .

¹⁶ VANDINE, D. Debris Flows and Debris Torrents in the South Canadian Cordillera. Montreal: Vandine Geological Engineering Services, 1985. p. 35.

Es importante considerar estas variables ya que, al llegar la mezcla de sedimentos y agua al cauce, se requiere una pendiente mínima para que se generen altas velocidades. Los cauces con pendientes superiores al 10% y sección en forma de “V” favorecen la formación de estos fenómenos.

Propiedades de la cuenca de drenaje: el área de drenaje debe ser lo suficientemente grande como para suministrar gran cantidad de material y elevados niveles de agua con lodo. Algunas propiedades de la cuenca que deben ser cuantificadas para determinar su propensión a la aparición de avalanchas son: longitud del cauce, área de drenaje, altitud, forma de la cuenca, densidad y estructura de drenaje, hidrología e hidrogramas de avenidas, cobertura vegetal, rugosidad del fondo del cauce, geología y geotecnia de sus suelos. En Colombia algunas cuencas que han generado estos fenómenos tienen áreas desde 1 Km² hasta 150 Km², como en el caso de la avalancha del Río Páez en el departamento del Cauca (véase figura 9).

Figura 9. Avalancha producida por un sismo en el Río Páez, Colombia, 1994.



Fuente: R.L. Schuster, USGS.

– Magnitud del fenómeno climático: se puede decir que zonas con alta pluviosidad son menos susceptibles a avalanchas, pues su régimen climático siempre a estado controlando los cambios y modificaciones en sus suelos, a diferencia de las zonas secas con bajos índices de pluviosidad en donde el periodo de recurrencia de eventos de lluvias extremas es más alto, ya que entre mayor sea la diferencia entre la lluvia máxima

esperada y la lluvia promedio se hace mayor la probabilidad para la ocurrencia de las avalanchas. Cuando se presentan lluvias muy por encima de los promedios y de las máximas ocurridas en los últimos años, se pueden generar deslizamientos, ya que la estructura que conforma el talud no había estado sometida a esa saturación. Estos fenómenos pueden ser más probables si se presentan precipitaciones mayores a las máximas registradas en las últimas décadas en la zona.

- Intensidad de lluvia crítica: la intensidad de la lluvia es un factor importante en la formación de avalanchas, ya que, dependiendo de las características geotécnicas del material, se puede generar acumulación de agua, sobresaturación de los suelos y posterior flujo en el momento en que la rata de infiltración sea mayor que la exfiltración.

- Magnitud de la lluvia antecedente: determinar el volumen de lluvia antecedente a la lluvia activadora de los deslizamientos es un parámetro clave en el análisis de estos eventos, puesto que de esta manera se evalúa el nivel de saturación de los taludes en el momento en que se presenta la lluvia con mayor intensidad y activadora de los flujos¹⁷.

- Área afectada: la cantidad de material deslizado depende de las características topográficas, geológicas y geotécnicas, de la meteorización, la susceptibilidad morfológica y la cobertura vegetal que se tengan en la cuenca. Además, el área denudada depende de la magnitud del evento climático y de las características de los deslizamientos. También es determinante la profundidad de estos.

- Sedimentos aportados al flujo: determinada el área de denudación se puede calcular una cantidad total probable de sedimentos incorporados al flujo de la corriente durante el tiempo de avalancha (el cual generalmente no es mayor a una hora).

- Avalanchas por deslizamientos aislados: como se ha dicho anteriormente, cuando en una cuenca se presentan deslizamientos y estos alcanzan el cauce principal, se pueden

¹⁷ VARGAS, M. Effect of Rainfall and Ground Water Levels. En: International Symposium on Soils Mechanics and Foundation Engineering. (4º : 1971 : New York). Panamerican Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering and 4th International Symposium on Soils Mechanics and Foundation Engineering. New York, 1971. p. 138-141.

lograr velocidades importantes, con las cuales se avanzan distancias considerables, generando a su paso enormes catástrofes. Al avanzar el flujo, éste va aumentando por la adición de los materiales que encuentra a su paso (por deslizamientos aislados en diferentes áreas de la cuenca) y por el raspado y socavación del fondo. Su magnitud se encuentra directamente relacionada con las características de la cuenca y de los materiales que conforman su estructura.

- Represamiento de cauces de agua: se presentan generalmente cuando un deslizamiento represa un río, cañada o canal, generándose una gran acumulación de agua. Esto trae como consecuencia una posible avalancha debido al rompimiento de la presa por acción del aumento de los esfuerzos ejercidos por el nivel de agua aguas arriba. Para este tipo de análisis es importante determinar el volumen de agua represada y el volumen de sedimentos.

- Avalanchas por caudales y velocidades extraordinarias: cuando se presenta una lluvia intensa se genera una superficie de agua de escorrentía que baja a lo largo de las laderas, en donde se hace propicia la inducción de una superficie potencial para que halla un deslizamiento pues esta depende del grado de inestabilidad de las laderas y de sus características geológicas y geotécnicas. La presión del agua produce una disminución de la resistencia al cortante y al mismo tiempo una fuerza o presión paralela a la superficie del terreno, creando inestabilidad por la relación entre fuerzas activadoras del movimiento y las fuerzas de resistencia, provocando así corrientes en dirección de la escorrentía.

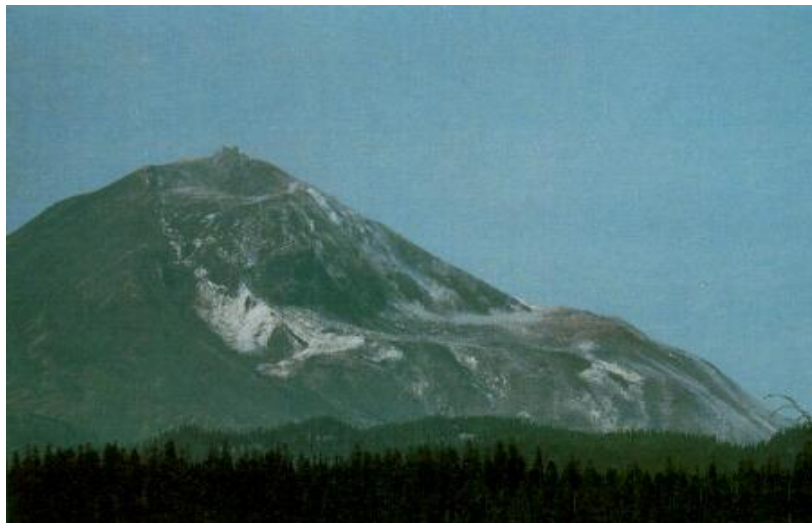
El aumento de caudal en los cauces debido a este efecto incrementa de manera considerable la socavación de los sedimentos en el fondo y genera una hiperconcentración de sólidos en el flujo de agua, llegando a tener concentraciones tan altas que pueden considerarse como avalanchas.

- Sismos: un sismo puede generar un flujo de lodos cuando, por causa del fenómeno natural, se producen deslizamientos de las laderas y estos alimentan el caudal sólido de la corriente, o forman presas naturales que luego se rompen y producen olas de gran magnitud. Las características de las avalanchas dependen tanto de los volúmenes del deslizamiento como de la capacidad de las corrientes para transportarlos.

- Volcanes: los lahares son flujos de lodo y piedras que se originan cuando un volcán coronado con un casquete de hielo explota y produce su deshielo parcial o total¹⁸. Dependiendo de las características de la explosión y del volumen del deshielo se genera un caudal líquido de cierta magnitud que corre hacia las corrientes superficiales de drenaje que se encuentran en la región. En su recorrido el caudal líquido atrapa material sólido y se mezcla con él, formando el fluido viscoso (véase figura 10).

La magnitud del lahar que se forma está relacionada con las siguientes componentes de la erupción volcánica:

Figura 10. Avalancha de detritos en el volcán Santa Helena, EU. 1980.

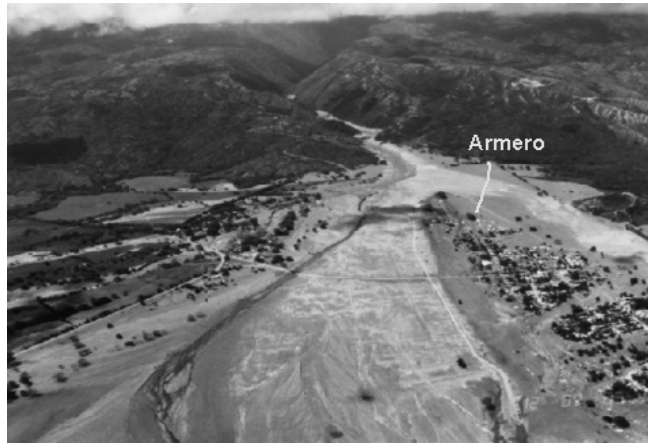


Fuente: Instituto Politécnico Nacional, Ecuador.

- Tipo de erupción: el tipo de erupción volcánica puede ser explosivo con expulsión de piroclastos, como el que ocurrió en el Volcán Nevado del Ruiz en 1985 (véase figura 11), o de flujo de lava como las producidas en 1929 y 1943 en el volcán Vesubio.

¹⁸ SHAFFER, Jen. Landslides & Mudslides [online]. [USA]: Oregon University, 2002 [cited December 2002]. Available from internet: <<http://www.wildfirenews.com/forests/forest/analysis.html>>

Figura 11. Avalancha generada por el deshielo del nevado del Ruiz, 1985.



Fuente: INGEOMINAS.

- Frecuencia, magnitud y duración del evento: la frecuencia del evento tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia de una erupción de determinadas magnitud y dirección. La magnitud se refiere a la energía liberada por el volcán, la cual determina el área de deshielo, la altura que alcanzan los materiales expulsados y la temperatura de los piroclastos si la erupción es explosiva, o el caudal de lavas y su temperatura en caso de flujo de lavas.

- Volumen del casquete de hielo: la duración del evento explosivo es un factor que influye significativamente en la determinación del volumen de deshielo y en la magnitud del caudal líquido que se genera.

- Transporte: en el tramo inicial de formación, el caudal que es producido por el evento que genera la avalancha fluye sobre el terreno; en su recorrido captura material suelto y comienza a formar los lodos. En estas condiciones el caudal total y la viscosidad se incrementan a medida que el flujo se acumula y se dirige hacia las corrientes principales de drenaje. Estas se definen a partir de una sección de entrada cuya localización depende de las condiciones topográficas de la zona. En la sección de entrada se sintetizan las características del caudal en la forma de un hidrograma trapezoidal de entrada del flujo viscoso.

En el tramo de transporte de lodos y de incremento del volumen de sólidos, una vez que el caudal entra al cauce su comportamiento hidráulico queda definido por las ecuaciones de continuidad, energía y cantidad de movimiento en canales. Generalmente el primer tramo del canal es encañonado, de fuerte pendiente, y tiene gran capacidad de transporte.

El tratamiento del problema puede ser sencillo o complicado, dependiendo de las simplificaciones que permitan los cálculos. La ecuación de continuidad debe contemplar tanto el aspecto variable del flujo como las ganancias de caudales sólido y líquido en aquellos tramos donde la socavación del lecho, los deslizamientos de los taludes y los aportes de tributarios sean importantes. La aplicación de la ecuación de energía incluye la determinación de gastos por fricción interna y por fricción entre el fluido y el contorno. El cambio en la cantidad de movimiento está relacionado con las fuerzas que ejerce el fluido sobre el contorno del cauce en razón de la fricción y de los cambios de dirección.

- Depósito de material sólido: a continuación del tramo de alta pendiente se presenta un tramo de transición, en el cual la pendiente va cambiando de alta a media y luego a baja. En este tramo se combinan los procesos de transporte del flujo de lodos y de depósito inicial de material sólido. El tramo de entrega corresponde al tramo final de la corriente, donde la pendiente del cauce es pequeña, y desemboca en una planicie inundable que se prolonga hasta su entrega a un río o al mar. En la planicie inundable se deposita una parte de los lodos, formando capas.

1.3 MODELAMIENTO

En zonas de alta montaña es común la localización de tormentas intensas, las cuales activan procesos de movimiento de material (flujos y avalanchas) y con ello una cantidad importante de transporte de sedimentos. En los cauces de alta pendiente, la descarga del sedimento aumenta a medida que avanza el flujo, lo que puede causar un aumento excesivo en la concentración sólida, que en muchos casos excede el 50%¹⁹. Éste es el caso de los flujos y avalanchas que transportan grandes volúmenes de sedimentos río

¹⁹ BRUFAU, P. *et al.* Mathematical Modeling of Debris Flow. En: Journal de Recherches Hydrauliques. U.S.A. Vol. 38 (2000); p. 2-3.

abajo, depositándolos en abanicos aluviales, que generalmente corresponden a sitios poblados.

Es común la práctica de imponer protecciones de tipo estructural y no estructural con el fin de reducir el impacto de un flujo o de una avalancha, realizando una zonificación de áreas de alto riesgo y desarrollando planes de emergencia. Los planes de protección requieren la descripción de los eventos, que pueden definirse por medio de simulaciones con bases matemáticas fundamentadas en los modelos de fluidos que se explican a continuación.

1.3.1 Fluido Newtoniano.

Los fluidos newtonianos se comportan de acuerdo con la ley descrita por la ecuación (1), que describe el esfuerzo cortante como proporcional al gradiente de velocidades o la velocidad de deformación tangencial. Por lo tanto, para estos fluidos, la gráfica del esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidades es una línea recta que pasa por el origen y cuya pendiente es la viscosidad.

$$\tau = \mu \left(\frac{dV}{dy} \right) \quad (1)$$

Siguiendo las consideraciones de Newton, Manning desarrolló un modelo para analizar el comportamiento hidráulico de este tipo de fluidos, en el que se incluyen un coeficiente de rugosidad y la pendiente de la línea de energía, que para canales abiertos se aproxima a la pendiente del fondo del canal.

Éste modelo se ajusta muy bien a flujos con alto contenido de agua, como lo son los flujos de lodos y los flujos hiperconcentrados, debido a sus características newtonianas viscosas y turbulentas²⁰. De esta manera, su comportamiento puede ser aproximado de la siguiente forma:

$$q_t = \frac{1}{n} h^{5/3} \text{Sin}^{1/2} \theta \quad (2)$$

²⁰ SUÁREZ. Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 170.

Donde q es el caudal unitario, h la altura de la lámina, n el coeficiente de rugosidad del fondo del cauce y θ la pendiente del canal.

El valor a tomar como coeficiente de rugosidad es tal vez el parámetro más difícil de evaluar, ya que no solamente depende de la rugosidad del canal sino también de las características del flujo. Se debe considerar que este coeficiente varía de acuerdo a los niveles del flujo en el canal, ya que, según Chien y Wan, este será mayor a medida que el espesor del flujo aumente. Éste modelo es aplicable hasta concentraciones de 1000 kg/m^3 , y es el que se implementará en el modelamiento de los flujos de lodos y detritos que se presentaron en la cuenca de la quebrada Angulito.

Se puede considerar que el flujo permanece Newtoniano hasta una concentración de sólidos del 60%.

1.3.2 Fluido Bingham.

Este modelo de fluido es aplicado especialmente a avalanchas. Se fundamenta en el modelo de fluido viscoso desarrollado por Coulomb, de acuerdo a la semejanza en el comportamiento del fluido. Se representa por la ecuación (3), en donde ζ es la resistencia al cortante en la base del flujo, C es la cohesión, Φ el ángulo de fricción interna y n_c el coeficiente de viscosidad.

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi + n_c \left(\frac{dV}{dy} \right) \quad (3)$$

1.3.3 Fluido Dilatante.

Modelo de fluido aplicado al análisis de flujos de detritos, según la teoría desarrollada por Takahashi, la cual se puede expresar de forma general mediante la ecuación (4):

$$\tau = n_c \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 \quad (4)$$

La teoría de Takahashi demuestra que para el caso de flujos de detritos, en el cual predominan las colisiones entre partículas, el modelo de fluido dilatante es el apropiado, ya que se basa en el flujo turbulento. Además consideró el flujo como una mezcla bifásica,

con una fase sólida y otra líquida, donde los esfuerzos en el flujo intersticial y una constante R son función de la concentración de sólidos y características de las partículas que conforman el flujo. El modelo de fluido de detritos propuesto por Takahashi se describe según la ecuación (5).

$$q_T = \frac{2}{5} Rh^{5/2} \sin^{1/2} \theta \quad (5)$$

1.3.4 Consideraciones de algunos autores.

Algunas investigaciones abarcan el comportamiento del flujo y la mecánica del movimiento de masas en dos categorías. El primero incluye modelos empíricos apuntados a proporcionar las herramientas prácticas en la predicción del flujo, mientras que la segunda agrupa modelos matemáticos que describen el comportamiento físico de movimiento en masa.

1.3.4.1 Modelos empíricos. Heim fue el primero en notar una relación entre el volumen de avalanchas de roca y su distancia de viaje. Scheidegger, en 1973, formalizó esta relación definiendo una correlación entre el volumen del deslizamiento, la rata de la altura total de caída, H, y la distancia del flujo, L, basado en 33 datos históricos de avalanchas de roca. La proporción H/L determina el ángulo de fricción efectivo y ha sido considerada por muchos autores como una medida de movilidad.

Li²¹, en 1983, también demostró las correlaciones existentes entre el volumen del deslizamiento de roca y H/L, así como entre el volumen del caído de roca y las áreas cubiertas por la deposición, llamadas el método de predicción área-volumen del flujo.

Todos los modelos empíricos descritos fueron desarrollados sobre datos de avalanchas de roca comprendidos entre 0.1 a 1 Mm³. Sin embargo, Cannon, en 1989, encontró relaciones lineales existentes entre la distancia de viaje y el volumen inicial de material para los flujos de detritos. Además, Corominas, en 1996, mostró una correlación lineal entre el volumen y ángulo de alcance para todos los tipos de falla. Él encontró que todos

²¹ Li, T. A Mathematical Model for Predicting the Extent of a Major Rockfall, cited by AYOTTE, Dana. Predicting the Runout Behaviour of Debris Flows and Debris Avalanches. Vancouver, Canada: University of British Columbia. p. 2.

los tipos de movimientos en masa muestran una disminución continua en el ángulo de alcance a medida que aumenta el volumen inicial. Esta correlación incluye la dispersión del flujo atribuida a las obstrucciones del canal.

El análisis de flujos superficiales generados por lluvias intensas, similares a los que ocurrieron en la quebrada Angulito, han sido estudiados por muchos investigadores tales como Harp et al. (1995), Jonson y Sitar (1990), Eisbacher y Clague (1981) y Hollines y Kovacs (1981). Estos últimos propusieron un método de predicción de deslizamientos superficiales y flujos torrenciales, basado en observaciones de periodos de lluvias intensas durante Febrero de 1980 en California. Mediante un análisis gráfico se relacionó la pendiente de las laderas naturales con características geotécnicas del material que fue removido. Características tales como el límite líquido, límite de contracción y porcentajes de material que pasa los tamices No. 40 y No. 200, fueron analizadas. De esta forma se concluyó que, para la ocurrencia de deslizamientos en forma de flujos superficiales, los porcentajes de material pasante de los tamices No. 40 y No. 200 deben ser mayores en las laderas con menores pendientes. Los gráficos que relacionan el límite líquido y el de contracción revelan que, en el momento de la falla, estos aumentan a medida que la pendiente de la ladera disminuye.

1.3.4.2 Modelos matemáticos. Muchos autores han propuesto modelos matemáticos para simular el comportamiento de flujos y avalanchas, basados fundamentalmente en el concepto de conservación de la masa y velocidad. De esta forma, el fluido se muestra como una sola fase, con densidad constante, o dos fases, con densidad variable.

Existen diversas alternativas para el modelamiento de flujos mediante herramientas matemáticas que pueden ser aplicados de acuerdo a las propiedades que este presente y a la información existente. Sin embargo, los flujos de detritos y avalanchas son un fenómeno complejo que involucra el movimiento de material heterogéneo, que fluctúa desde agua y lodo hasta cantos rodados y restos de madera. Por consiguiente es muy difícil encontrar una única relación constitutiva aplicable a todas las partes del flujo que pueda llegar a predecir su comportamiento a cabalidad.

2. SUELOS DISPERSIVOS

Uno de los principales problemas a solucionar en el análisis de los eventos ocurridos durante Febrero de 2005 en el municipio Girón, Santander, es encontrar las causas que terminaron por provocar la activación de los deslizamientos. Una vez logrado este objetivo será posible llegar a determinar posibles medidas correctivas que reduzcan de manera considerable el riesgo para los pobladores de la zona.

Dentro de las principales causas o activadores del fenómeno se pueden encontrar algunas propiedades físico-químicas del material de suelo, dentro de las que sobresale la dispersión.

2.1 GENERALIDADES

Como suelos dispersivos se conocen aquellos materiales en los cuales, dado un contacto directo con agua, sus partículas se separan y el agregado se desintegra (véase figura 12). El agua, en este tipo de suelos, induce una eliminación súbita de las fuerzas electroquímicas que mantienen unidas las partículas de arcilla. De esta forma la arcilla se expande perdiendo sus fuerzas de atracción, causando un hinchamiento generalizado del material con su subsiguiente pérdida de resistencia.

Lo anterior indica un comportamiento altamente peligroso en términos de resistencia del material en un suelo dispersivo. Mientras un material que no presenta dispersión posee características con bajo nivel de discordancia en estado seco y saturado (posee propiedades de resistencia similares), un suelo dispersivo muestra grandes diferencias en sus resistencias pre y post humedecimiento.

Es así, que en estado seco, un material dispersivo posee una resistencia tal que le permite la formación de taludes de alta pendiente. Luego, bajo la acción del agua normalmente procedente de eventos de precipitación elevada, la resistencia del material

disminuye drásticamente llegando a una pérdida total de cohesión y un posterior colapso, lo que da lugar a numerosos deslizamientos.

Figura 12. Grumo de suelo en agua durante ensayo de dispersión.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

La dispersión puede ser causada por diferentes factores tales como: la presencia o carencia de algunos cationes intercambiables, la existencia de ciertos tipos de arcilla, el pH del suelo, entre otros. Los problemas de dispersión son considerados como el efecto conjunto de los factores antes mencionados, de tal manera que solo cuando estos se presentan simultáneamente de manera adversa, se pueden llegar a obtener valores de dispersión lo suficientemente elevados para causar problemas de resistencia importantes. En general, los problemas de dispersión suelen ocurrir en suelos con arcillas de baja o media plasticidad y contenidos de montmorillonita, especialmente sódica.

2.2 CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, existen diversas causas de la dispersión en un suelo, dentro de las que se encuentran:

- La presencia de algunos cationes de carga baja en la estructuras del material fino en conjunto con la carencia de cationes de carga alta.
- Grado de salinidad del suelo.

- La presencia de algunos tipos de arcilla.
- El pH.
- Presencia o no de materia orgánica.

La identificación de un suelo dispersivo se logra mediante el análisis y caracterización del mismo a partir de los parámetros mencionados a continuación. Se debe tener en cuenta que ninguno de estos puede brindar, de manera individual, valoraciones aceptables sobre problemas de dispersión en un suelo. Por el contrario, se considera que los factores deben ser analizados en conjunto para llegar a conclusiones acertadas.

2.2.1 Presencia de cationes intercambiables de carga baja en la fracción fina.

En primera instancia se debe tener en cuenta que la fracción arcillosa difiere en gran medida del componente areno-limoso del suelo no solo en tamaño, sino en composición mineralógica. La arcilla, a diferencia de su contraparte básicamente silícea, consta primordialmente de láminas cristalinas planares formadas por dos unidades básicas: tetraedros sílice-oxígeno y octaedros aluminio- o magnesio-oxígeno-hidroxilo (véase figura 13). Estas se encuentran superpuestas una sobre otra.

Figura 13. Esquema de: (a) Celda unitaria sílice-oxígeno y lámina tetraedral y (b) Celda unitaria aluminio-oxígeno y lámina octaedral.



Fuente: van Olphen.

La alta simetría y las dimensiones similares de las unidades básicas facilitan la formación de enlaces entre los oxígenos de las láminas. De esta manera, el cuarto oxígeno del sílice-oxígeno tetraedral es compartido con el aluminio oxígeno-hidroxilo octaedral. Lo

anterior da a lugar a la formación de láminas unitarias formadas ya sea por una lámina de sílice y una de aluminio, como es el caso de la kaolinita, o dos láminas de sílice y una de aluminio, smectita e illita.

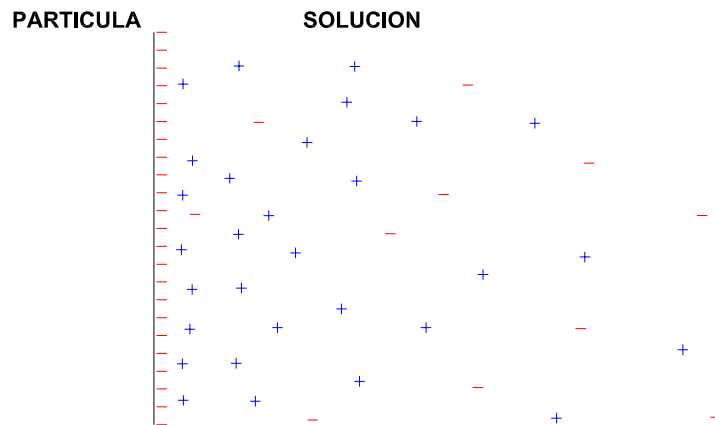
Debido a las imperfecciones presentes en el material arcilloso es normal que algunos iones sílice (Si^{4+}) sean remplazados por iones Aluminio (Al^{3+}) y estos a su vez por iones Magnesio (Mg^{2+}). Lo anterior produce un desequilibrio de carga en las partículas de arcilla, otorgándole a estas una carga total negativa, que es luego equilibrada mediante la atracción de iones positivos (cationes) provenientes de la solución que los rodea y conocidos como iones de equilibrio. Estos cationes se adhieren momentáneamente a la superficie de las partículas de arcilla y pueden ser fácilmente reemplazados o intercambiados con aquellos presentes en la solución, por lo que se les conoce con el nombre de cationes intercambiables. La capa de iones que cubre las partículas de arcilla y compensa su carga básicamente negativa es llamada la doble capa eléctrica.

Los iones de equilibrio se encuentran bajo la acción de dos fuerzas simultáneas: una atracción hacia la superficie de la partícula de arcilla debida a la diferencia de cargas y una tendencia a separarse de esta y moverse hacia la solución debido a que allí su concentración es menor. Este efecto termina por generar una distribución de equilibrio donde la concentración de cationes desciende gradualmente a medida que la separación con la superficie de la partícula aumenta. Se debe entender que la doble capa eléctrica está compuesta tanto por un exceso de iones de carga positiva como de una deficiencia de iones de carga negativa, igual a aquella de la superficie de la partícula (véase figura 14).

Existen diferentes cationes que pueden ser atraídos por las partículas de arcilla, dentro de los que se encuentra: iones hierro (Fe^{3+}), aluminio (Al^{3+}), cobre (Cu^{2+}), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+). Según Madero²², en la mayoría de los suelos los principales cationes son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , en proporciones generales de 80% Ca, 15% Mg, 5% (Na+K).

²² MADERO, E. Reacciones de Superficie en el Suelo. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 1994. p. 20.

Figura 14. Esquema capa difusa de iones o doble capa eléctrica.



Fuente: Esquemas investigación.

El material arcilloso no posee ninguna predilección marcada por algún tipo de catión específico, de tal manera que, siendo un ejemplo, si existiera en el suelo un contenido alto de iones intercambiables de calcio y luego este fuese tratado con agua rica en sodio, con el tiempo los cationes calcio serían reemplazados en su mayoría por iones Na^+ .

Según la teoría de Gouy, si se tienen dos iones de diferente valencia, el ión de mayor carga es predominantemente acumulado sobre la superficie cargada de la partícula de arcilla²³. En términos de equilibrio, los iones de cargas altas tienden a presentar una mayor eficiencia a la hora de neutralizar las cargas negativas de las partículas de arcilla, reduciendo el hinchamiento del material y su dispersión. De esta forma, la presencia de iones Ca^{2+} o Al^{3+} producirá una mayor estabilidad en la estructura de suelo, mientras que la aparición de elevadas concentraciones de iones sodio (Na^+) tenderá a generar un posible desequilibrio con problemas de dispersión.

Cuando existe un elevado porcentaje de iones sodio en relación a otros cationes, suelen presentarse problemas de dispersión. Estos iones interfieren en las uniones electroquímicas presentes en la arcilla, causando su separación. De igual manera, la hidratación de los cationes al entrar estos en contacto con agua causa un aumento de tamaño y el hinchamiento del material con su posterior descomposición.

²³ VAN OLPHEN, H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. United States of America: John Wiley, 1963. p. 49.

Entrando a considerar la doble capa eléctrica es posible entender la manera en la que la presencia de cationes de baja carga puede generar problemas de estabilidad en las partículas coloidales. Se comprende que la presencia de estas capas de cationes genera una repulsión entre las partículas debido a que poseen igual carga. A medida que el tamaño de la doble capa aumenta se generará una mayor repulsión y las partículas se verán forzadas a mantenerse más separadas entre sí, generándose de esta manera una mayor tendencia a la dispersión. De acuerdo a los cationes que componen dichas capas estas poseerán un mayor o menor espesor, es decir, si una doble capa eléctrica se compone de cationes de una sola valencia esta poseerá el doble de las partículas, y por ende un mayor espesor, a si se encontrara compuesta por cationes de doble valencia (véase tabla 1). El tamaño de la doble capa se encuentra igualmente influenciado por la concentración de electrolitos en la solución, lo cual se explicará posteriormente ...véase numeral 2.2.2...

Considerando lo anterior, se entiende que la presencia de altos contenidos de iones sodio intercambiables aumentan considerablemente el espesor de la doble capa eléctrica, incrementando la separación entre partículas y sus fuerzas de repulsión, y generando una mayor tendencia a la aparición de problemas de dispersión.

Tabla 1. Espesor aproximado de la doble capa eléctrica como función de la concentración de electrolitos y valencia de los iones con un potencial de superficie constante.

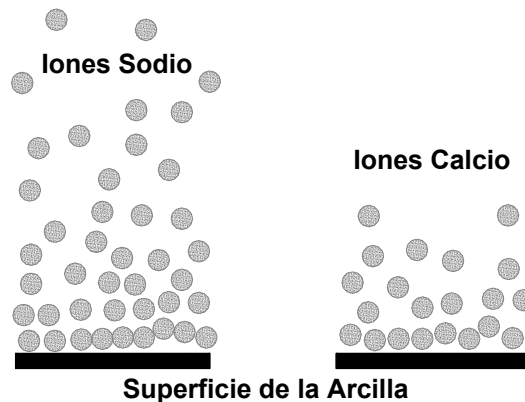
Concentración de iones de carga opuesta a la de la partícula moles/litro	Espesor de la doble capa, Å	
	iones monovalentes (Na ⁺)	iones divalentes (Ca ²⁺)
0.01	1000	500
1	100	50
100	10	5

Fuente: van Olphen.

Uno de los factores importantes a la hora de describir el fenómeno anteriormente mencionado, es la manera según la cual los cationes se aglomeran sobre las partículas. El calcio y el magnesio tienden a formar nubes más densas en los alrededores de las

partículas de arcilla y más cercanas a las mismas, lo que disminuye el efecto de dispersión (véase figura 15). Se entiende que la presencia de iones calcio, aluminio u otros de altas cargas, tienden a estabilizar la estructura del suelo ya que ocupan lugares donde de otra manera se encontrarían iones Na^+ .

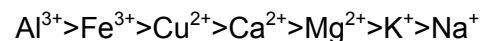
Figura 15. Esquema de iones sodio y calcio adheridos a laminas de arcilla.



Fuente: Esquemas investigación.

En este aspecto hay que considerar los efectos adversos que pueden existir debido a la presencia de algunos cationes que, aun provocando una mayor estabilidad, pueden llegar a causar problemas peores. Tal es el caso de los iones Al^{3+} , que pueden reducir la dispersión de un suelo, pero de igual manera generar problemas para el crecimiento de las plantas debido a su alta toxicidad para las mismas.

En términos generales se considera que a medida que la carga del catión aumenta se tendrá una mayor estabilidad el suelo. En la mayoría de los casos el efecto de estabilización según el catión sigue el siguiente orden:



Para cuantificar la presencia de los diferentes cationes en el suelo se utilizan términos tales como la capacidad de intercambio catiónico o **Cation Exchange Capacity** (CEC) y el porcentaje de sodio intercambiable o **Exchangeable Sodium Percentage** (ESP).

El CEC está íntegramente relacionado con la carga negativa presente en las partículas de arcilla. Este puede entenderse como la capacidad que posee el material arcilloso de atraer y retener cationes en relación a su masa. El CEC se ve influido por el tipo de material presente en el suelo: mientras la montmorillonita y la bentonita poseen un valor de CEC generalmente elevado, la illita posee un CEC intermedio y la kaolinita valores relativamente bajos. El humus o materia orgánica posee valores de CEC bastante altos, que pueden llegar a ser de 2 a 10 veces superiores a los de las arcillas. Los limos y las arenas, al no poseer carga, no presentan valor alguno de CEC.

Conociendo el efecto adverso de una elevada presencia de iones sodio en relación a otros cationes, se hace importante cuantificar dicho contenido. Esto se logra mediante la determinación del porcentaje de sodio intercambiable del suelo. El ESP consiste en la relación entre el contenido de sodio intercambiable, generalmente expresado en me/100gr de suelo, y el CEC:

$$ESP(\%) = \frac{\text{Concentracion}(Na^+)}{CEC} \quad (6)$$

Lo anterior indicaría una mayor tendencia a la aparición de problemas de dispersión en suelos con valores elevados de ESP. Algunos autores y entidades, van de Graaff²⁴ y el **Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization**²⁵ (CSIRO), hablan de un límite de 6% en ESP antes de encontrar problemas de dispersión importantes, mientras que otros, Zhang²⁶, hablan de un límite de 15% o incluso de valores tan bajos como 2%, Mitchell²⁷.

²⁴ VAN DER GRAAFF, Robert and PATTERSON, Robert A. Explaining the Mysteries of Salinity, Sodicity, SAR and ESP in On-site Practice [online]. [Armidale, Australia]: Lanfax Laboratories, sep. 2001 [cited September 22 2005]. Available from internet: <<http://www.lanfaxlabs.com.au/papers/P47-mysteries.PDF>>. p. 363.

²⁵ COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION. The Australian Soil Classification [online]. (Australia): CSIRO Land and Water, 2004. Available from internet: <http://www.clw.csiro.au/aclep/asc_re_on_line/so/sodosols.htm>

²⁶ ZHANG, Hailin. Interpreting Soil Salinity Analyses [online]. [Oklahoma, USA]: Oklahoma State University, s.f. Available from internet: <http://www.soiltesting.okstate.edu/Extn_Pub/lab%20publications/L-297.pdf>, p. 2.

²⁷ MITCHELL, James K. Fundamentals of Soil Behavior. United States of America: John Wiley, 1976. p. 133.

Los suelos que poseen porcentajes de sodio intercambiable (ESP) elevados son conocidos con el nombre de suelos sódicos. Aunque se hace mención de la frecuente presencia de dispersión en estos tipos de suelo, debe entenderse que el ESP, de manera individual, no es buen indicativo de este tipo de problemas. Existen otros factores que actúan de manera simultánea sobre el suelo y que de igual forma deben ser analizados antes de llegar a cualquier tipo de conclusiones.

2.2.2 Grado de salinidad del suelo.

Como regla general se considera que una alta concentración de sales produce que las partículas finas presentes en el suelo se unan o floculen. De esta manera, se observa que la salinidad actúa de forma contraria a la sodicidad, reduciendo la dispersión del suelo y favoreciendo la floculación de las partículas. Lo anterior explica el por qué los ríos, generalmente turbios por su alto contenido de partículas finas en suspensión, se transforman en aguas cristalinas al llegar al mar, con un ambiente altamente salino. Las partículas finas, al encontrarse en una solución salina con alta concentración de electrolitos, se aglomeran, floculan y sedimentan rápidamente al fondo.

En la figura 16 se observa el grado de floculación de un tipo de coloide en relación a la concentración de electrolitos, a medida que esta última aumenta, aumenta de igual manera la floculación y sedimentación de las partículas.

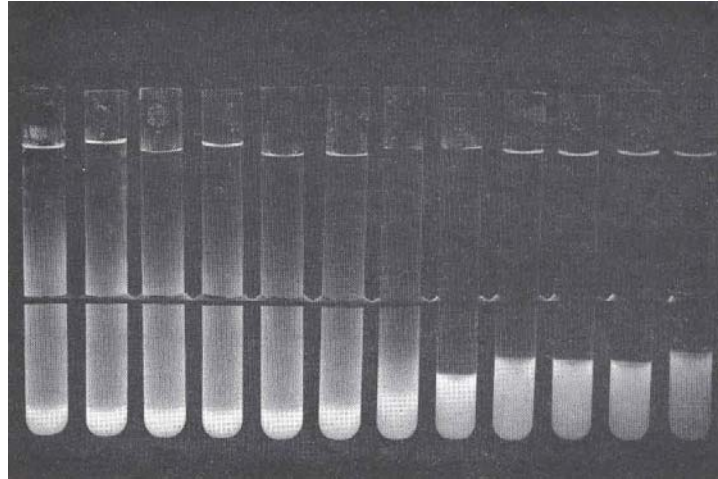
La salinidad de un suelo se determina comúnmente mediante el ensayo de conductividad eléctrica (CE) de una mezcla suelo-agua, conocido como extracto saturado. Dicha mezcla suele realizarse con una relación suelo-agua delimitada por el punto de fluencia, lo que generalmente consiste en una proporción de 1:2 a 1:5.

A medida que la salinidad de un suelo aumenta igualmente aumenta su CE. Esto ocurre debido a que el suelo aporta una mayor cantidad de electrolitos al agua, lo que acrecienta su capacidad de conducción.

Las arcillas que entran en suspensión pueden aglomerarse y sedimentar en la medida en que la concentración de electrolitos en la solución alcance su límite de floculación (véase figura 17), que crece en conjunto con el ESP. Es así que, ante un valor de ESP elevado,

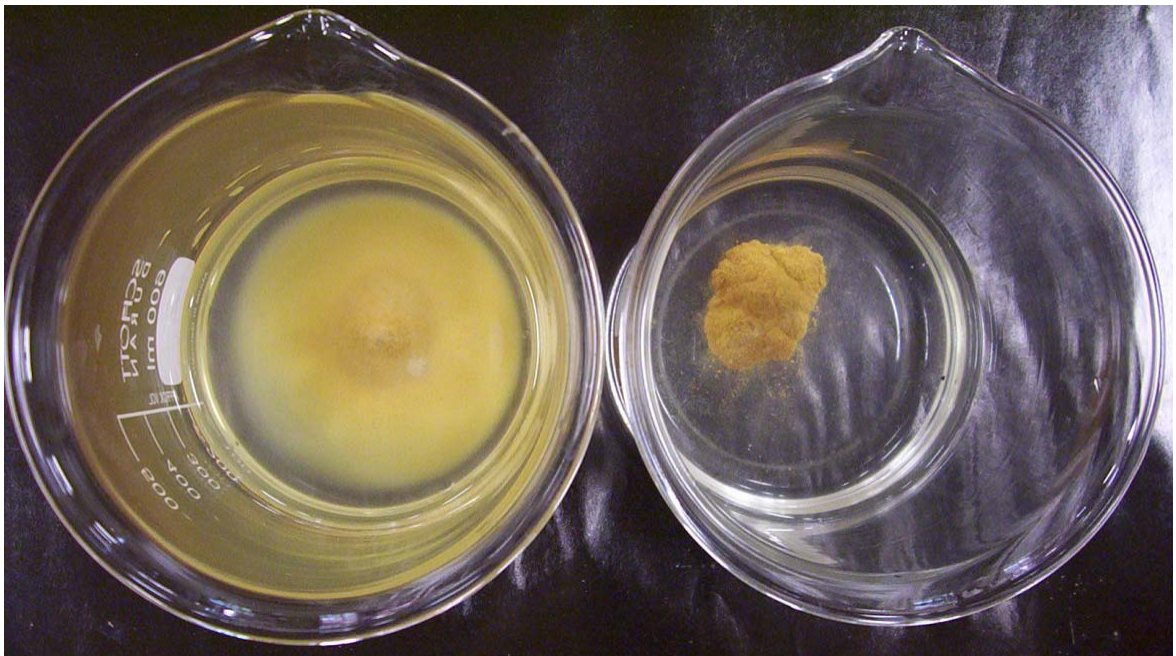
se necesitará de un mayor contenido de electrolitos en el agua y por ende de una mayor salinidad del suelo para evitar un efecto de dispersión.

Figura 16. Experimento de serie de floculación.



Fuente: van Olphen.

Figura 17. Suelo dispersivo de la cuenca de la quebrada Angulito en agua destilada (izquierda) y en solución de cloruro de calcio al 1% (derecha).



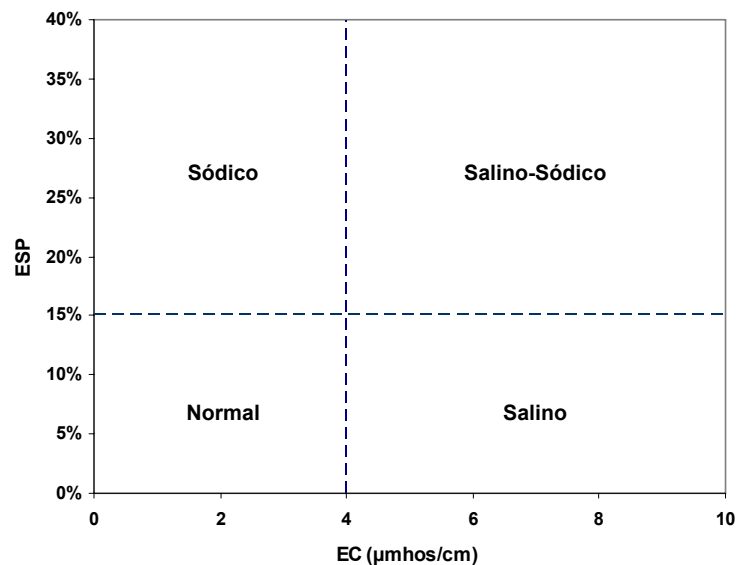
Fuente: Archivo fotográfico investigación.

Esto ayuda a explicar por qué, durante un evento de precipitación sobre un suelo de baja salinidad y rico en contenido de sodio intercambiable, el agua lluvia (de baja conductividad eléctrica y con reducido contenido de electrolitos) genera la rápida disociación de las partículas finas, produciendo de esta manera un alto grado de dispersión.

Teniendo en cuenta el grado de salinidad del suelo expresado en términos de CE y su contenido de sodio (ESP), es posible estimar la presencia de problemas de dispersión cuando este presente un valor mayor a 6% de ESP y un CE menor a 4000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Un suelo puede ser clasificados en tres tipos de acuerdo a su salinidad y sodicidad: salino (exceso de sales solubles), sódico (exceso de sodio intercambiable) o salino-sódico (exceso de ambos parámetros). En la figura 18 se observa el sistema de clasificación anterior, donde se considera un suelo como normal si este posee un $\text{ESP} < 15\%$ y $\text{EC} < 4000 \mu\text{mhos/cm}$, como salino si este tiene $\text{ESP} < 15\%$ y $\text{EC} > 4000 \mu\text{mhos/cm}$, como suelo sódico si posee $\text{ESP} > 15\%$ y $\text{EC} < 4000 \mu\text{mhos/cm}$ y como salino sódico si su $\text{ESP} > 15\%$ y $\text{EC} > 4000 \mu\text{mhos/cm}$.

Figura 18. Clasificación de suelos con problemas de sales.

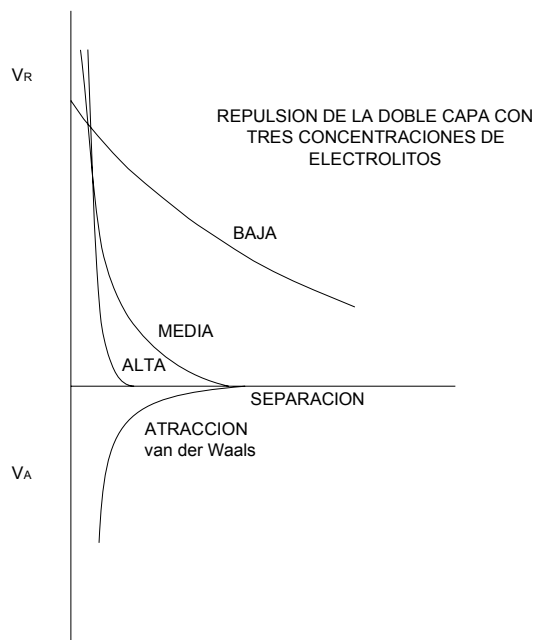


Fuente: Esquemas investigación.

Para explicar con una mayor facilidad el efecto de la salinidad de un suelo y de esta manera la concentración de electrolitos en solución, se deben entender primero los mecanismos de atracción y repulsión entre las partículas de coloide. De esta manera, y mediante la realización de balances de fuerzas, es posible comprender el comportamiento de las partículas de arcilla.

2.2.2.1 Repulsión entre dobles capas eléctricas. Cuando dos partículas de arcilla se aproximan entre si en suspensión, existe una fuerza de repulsión entre sus capas difusas de cationes debido a que estas poseen igual carga. De esta forma se entiende que se debe realizar un trabajo para que las dos partículas se junten. El trabajo realizado para traer las partículas desde el infinito hasta un punto determinado, o potencial de repulsión, puede ser calculado y cumple una función cercana a exponencial con una disminución a medida que la separación entre las partículas aumenta (véase figura 19).

Figura 19. Energía de repulsión y atracción como función de la separación entre partículas bajo tres concentraciones de electrolitos.



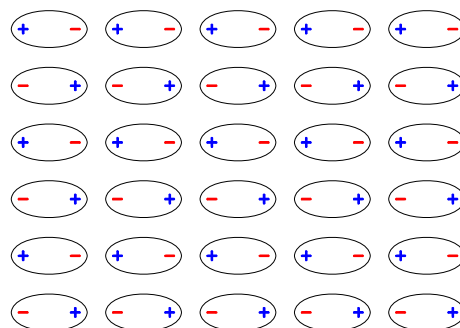
Fuente: Esquemas investigación.

El grado de repulsión se encuentra relacionado con la concentración de electrolitos en la solución debido a que este factor regula el espesor de la doble capa; entre menor sea la

concentración de electrolitos en la solución el espesor de la doble capa será mayor debido a que las fuerzas de difusión que intentan separar los cationes de la superficie de la partícula serán igualmente mayores. Este fenómeno ocurre debido a que las partículas intentarán ir a donde su concentración sea menor, a medida que la concentración de electrolitos en la solución disminuye la fuerza de escape de los cationes aumenta y de esta manera aumenta el espesor de la doble capa eléctrica.

2.2.2.2 Atracción por fuerzas de van der Waals. El fenómeno de la floculación evidencia la existencia de fuerzas de atracción entre los coloides. Considerando que las fuerzas de repulsión permanecen igualmente durante la floculación de la arcilla se espera que las fuerzas de atracción deban encontrarse en un rango de magnitud similar a estas. Una posible explicación de la fuente de las fuerzas de atracción son las fuerzas de van der Waals o dipolos inducidos fluctuantes. En un átomo y en un determinado momento es muy poco probable, si no imposible, que los electrones se encuentren rodeando el núcleo de manera uniformemente distribuida. Lo anterior se encuentra reflejado en que una mayor cantidad de electrones se encontrará en un sector del átomo, mientras que en otro sector existirá una deficiencia de estos; esto ocasiona que una zona del átomo posea una carga negativa en dicho momento mientras que la zona opuesta ostentará una carga positiva. De esta manera el dipolo generado induce igualmente numerosos dipolos en los átomos vecinos, produciendo una sincronización en la fluctuación de estos (véase figura 20) y de esta manera la atracción entre las partículas.

Figura 20. Sincronización de dipolos fluctuantes generando fuerzas de Van der Waals.



Fuente: Esquemas investigación.

Aunque las fuerzas de van der Waals a primera vista pareciesen no ser lo suficientemente elevadas como para contrarrestar el efecto provocado por la repulsión entre las dobles capas eléctricas, o actuar a distancias lo suficientemente lejanas debido a que su atracción decae rápidamente con la distancia de separación, es importante anotar que las fuerzas intermoleculares de van der Waals son aditivas. Lo anterior indica que la atracción total entre partículas que poseen un número elevado de moléculas es igual a la suma de las fuerzas de atracción entre cada una de las moléculas que la componen y sus correspondientes en otra. Esto resulta en una fuerza de atracción lo suficientemente elevada como para competir con la fuerza de repulsión entre capas de cationes y con un decaimiento menor en relación a la distancia de separación. Las fuerzas de van der Waals, al igual que la densidad de carga de la partícula de arcilla, no se ven influenciadas por la concentración de electrolitos en solución.

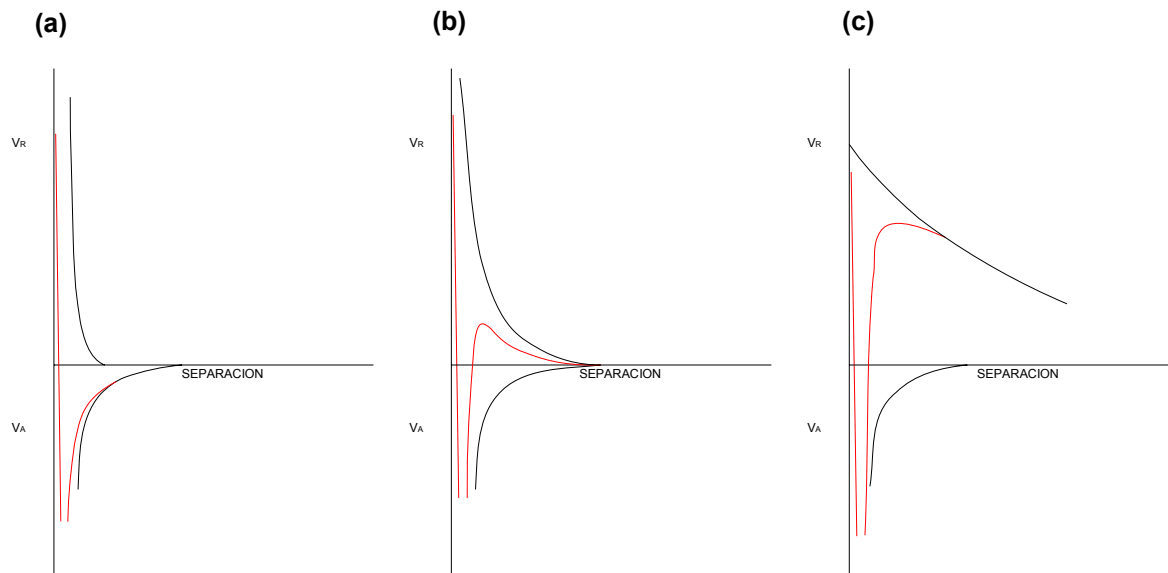
2.2.2.3 Sumatoria de las cargas de repulsión y atracción. La fuerza resultante de las fuerzas de repulsión (doble capa eléctrica) y de atracción (van der Waals) se obtiene sumando cada una de estas de acuerdo a la distancia de separación entre partículas.

En la construcción de las fuerzas resultantes se deben tener en cuenta dos fuerzas adicionales: la repulsión de Born y la energía necesaria para la remoción del agua presente en la superficie de las partículas (generalmente de entre una y dos capas monomoleculares). La repulsión de Born hace relación a la fuerza que impide que los cristales sean penetrados entre sí. Para comprender la segunda fuerza es necesario entender que las partículas generalmente poseen algunas capas de agua adheridas a su superficie, así el suelo se encuentre en estado seco. El agua presente no supera por lo general dos capas monomoleculares sobre la arcilla, pero, en el caso que las partículas se acerquen a distancias menores al espesor de las capas de agua de ambos cristales, será necesario aplicar cierta energía para su remoción. Esta energía de repulsión sólo se observa a partir de separaciones entre partículas menores o cercanas a 10 Å.

Las anteriores fuerzas son responsables del rápido incremento en la fuerza resultante y su paso a estado de repulsión en condiciones de muy baja separación entre partículas. De esta manera se obtienen gráficas que muestran el comportamiento de las fuerzas en

relación a la distancia de separación y la concentración de electrolitos. La figura 21 muestra estas gráficas para baja (a), media (b) y alta (c) concentración de electrolitos con potencial de repulsión en la parte superior (V_R) y de atracción en la parte inferior (V_A).

Figura 21. Energía de interacción neta como función de la separación entre partículas: (a) Alta concentración de electrolitos. (b) Concentración intermedia de electrolitos. (c) Baja concentración de electrolitos.



Fuente: Esquemas investigación.

Como se puede observar en dichas gráficas, el comportamiento de un suelo con bajo, medio y alto contenido de sales difiere enormemente. Cuando se tienen bajas o medias concentraciones de electrolitos se observa una atracción con valores máximos cuando las partículas se encuentran relativamente cerca entre si. A distancias de separación mayores se observa un efecto pronunciado de repulsión. Cuando se presentan concentraciones de electrolitos elevadas este último efecto no se muestra y se observa una relación de atracción prácticamente a cualquier distancia de separación, a excepción de distancias demasiado reducidas.

Analizando esta información se obtiene que las partículas en suspensión se aglomeran o floculan en la medida en que su movimiento de difusión las lleve al punto de separación

donde se encuentra el máximo valor de atracción. En el caso de concentraciones bajas o medias de electrolitos, las partículas deben superar distancias de separación con niveles de fuerzas de repulsión, por lo que el grado de aglomeración se verá reducido. Esto no ocurre cuando se tienen altas concentraciones de sales, que provoca la desaparición de los niveles de repulsión y genera que las partículas se atraigan durante todo el recorrido de unión, dando lugar a una coagulación rápida.

En condiciones de niveles medios de concentración de electrolitos ocurre una floculación lenta. En los casos de concentraciones bajas el proceso de coagulación es retardado a tal punto que las partículas pueden tomar semanas o meses para flocular.²⁸

La parte de la curva de energía de interacción neta que muestra un grado de repulsión a separaciones elevadas es conocida con el nombre de “barrera energética”. De esta manera, bajo condiciones de concentraciones medias y bajas de electrolitos, los coloides se ven forzados a superar estas barreras antes de flocular.

Esto explica porqué los suelos tienden a ser más estables cuando poseen contenidos de sales considerables y de esta manera altas concentraciones de electrolitos en solución. Esta característica del suelo genera una disminución en el espesor de la doble capa y por ende la eliminación de las barreras energéticas, lo que facilita enormemente la floculación de las partículas y disminuye la presencia de problemas de dispersión. El caso contrario ocurre en suelos con bajos contenidos de sales.

El porcentaje de sodio intercambiable afecta de manera similar. Un alto ESP del suelo se ve reflejado en un aumento del espesor de la doble capa, generando un efecto que asemeja una disminución de electrolitos en la solución y de esta forma provocando una mayor inestabilidad.

En conclusión, se puede afirmar que la floculación ocasionada por la concentración de electrolitos está gobernada por el efecto que esta tenga sobre el espesor de la doble capa

²⁸ VAN OLPHEN, Op. cit., p. 41.

eléctrica. Esta conclusión puede ser igualmente aseverada para el caso de las concentraciones de sodio intercambiable.

2.2.3 Otras variables que pueden alterar el tamaño de la doble capa.

El espesor de la doble capa eléctrica se ve alterado de acuerdo a las siguientes variables²⁹: densidad de carga de la superficie (σ) o potencial de superficie (ψ_0), concentración de electrolitos en solución (η_0), valencia de los cationes que componen la doble capa (v), constante dieléctrica del medio (D) y temperatura (T). Lo anterior ocurre de acuerdo a la siguiente ecuación, donde $1/K$ representa el espesor de la doble capa:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{DkT}{8\pi\epsilon_0\epsilon^2v^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Como ya se ha mencionado, una baja concentración de electrolitos aumenta considerablemente el espesor de la doble capa, aumentando los problemas de expansión de la arcilla y tendiendo a la aparición de problemas de dispersión. La presencia de cationes de baja valencia actúa de manera análoga. Con mayor exactitud se puede mencionar que el espesor de la doble capa disminuye inversamente a la valencia de los cationes y a la raíz cuadrada de la concentración de electrolitos e incrementa con la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del medio y la temperatura, manteniendo los otros parámetros como constantes.

Es importante analizar el comportamiento de la doble capa en relación a las otras variables. La densidad de carga de la arcilla está relacionada principalmente con el tipo de arcilla presente; mientras una kaolinita posee bajas densidades de carga de superficie, una smectita poseerá valores elevados. Una mayor densidad de carga superficial implica la necesidad de atracción de un mayor número de cargas positivas y de esta manera un aumento significativo del espesor de la doble capa. Se entiende así que las arcilla de smectita tenderán a poseer mayores espesores de doble capa que arcillas de kaolinita, siendo las primeras las más propicias a presentar problemas de inestabilidad por expansión y dispersión. Este tema será tratado a mayor profundidad posteriormente ...véase el numeral 2.2.6...

²⁹ MITCHELL, Op. cit., p. 118.

Las otras dos variables (temperatura y constante dieléctrica del medio) pueden ser analizadas en conjunto. Considerando que el medio presente es por lo general agua, la constante dieléctrica solo se verá afectada por la temperatura. Un aumento de temperatura se verá reflejado en la disminución de la constante dieléctrica del medio. De esta manera se considera que el efecto sobre la doble capa ocasionado por un cambio de temperatura puede ser despreciado debido a que el producto de esta y la constante dieléctrica permanece prácticamente constante.

Se considera entonces que el espesor de la doble capa se encontrará influenciado principalmente por la concentración de electrolitos, la valencia de los cationes y el tipo de arcilla.

2.2.4 Potencial de hidrógeno.

El potencial de hidrógeno (pH) del suelo puede afectar en gran medida el comportamiento del mismo. Un aumento de pH está fuertemente relacionado a la disminución de la carga positiva encontrada en los bordes de las partículas de arcilla y que produce la atracción borde-cara ...véase el numeral 2.2.5... en los arreglos formados por estas. De esta manera, un aumento en el pH del suelo puede provocar un colapso en las conexiones existentes entre las partículas de arcilla, lo que causaría una mayor susceptibilidad a la existencia de problemas de dispersión. De hecho, según Mitchell³⁰, se considera que para mantener un completo estado de suspensión o dispersión de las partículas, evitando la floculación, es frecuentemente necesario mantener un nivel de pH elevado en el medio.

Por esto se considera que, según McBride³¹, “arcillas con una sodicidad dada son más dispersivas con un pH elevado que con uno bajo”. De esta manera, según Zhang³², se puede esperar un comportamiento dispersivo en un suelo con ESP mayor a 15%, EC menor a 4000 $\mu\text{mhos/cm}$ y un pH comprendido entre 8.5 y 10. De hecho, un pH superior a 8.5 es un buen indicativo de la sodicidad en un suelo, aunque no de manera inversa.

³⁰ MITCHELL, Op. cit., p. 127.

³¹ McBRIDE, M. Environmental Chemistry of Soils, cited by VAN DER GRAAFF, Op. cit., p. 4.

³² ZHANG, Op. cit., p. 2.

Existen casos de suelos con pH tan bajo como 6 y niveles de sodio intercambiable superiores a 15%.

En términos generales, el pH afecta en mayor medida a las arcillas de kaolinita, siendo seguidas por las illitas en un último lugar las smectitas.

2.2.5 Contenido de materia orgánica.

Aunque los contenidos elevados de materia orgánica son reconocidos en el contexto ingenieril como causa de serios problemas en el suelo, tales como alta plasticidad, alta compresibilidad, baja permeabilidad y baja resistencia; niveles no muy elevados de este tipo de materiales puede ser benéfico para el control de problemas de dispersión en un suelo. En estos casos la dispersión en el material es reducida debido principalmente a dos factores: una disminución en la interacción agua-coloide y la generación de uniones físico-químicas entre las partículas.

La materia orgánica está compuesta primordialmente de polímeros catiónicos, aniónicos o no iónicos de diversas formas y composición, con un alto (>100.000) o bajo (<1000) peso molecular. Debido a la distribución de cargas en las arcillas, los cationes orgánicos son absorbidos por las superficies planares, mientras que los aniones son adheridos a los bordes. Las moléculas orgánicas no cargadas interactúan con las partículas de arcilla mediante grupos polares o fuerzas de Van der Waals.

Las partículas de arcilla muestran una mayor preferencia por cationes orgánicos que inorgánicos, por lo que al encontrarse ante la presencia de cationes del primer tipo, estos entran a reemplazar los cationes que antes se encontraban adheridos a las partículas de arcilla. Los cationes orgánicos poseen en su estructura cadenas de hidrocarburos que, al adherirse a la superficie de la arcilla, desplazan las moléculas de agua que allí se encontraban. El resultado son partículas de arcilla con carga negativa compensada mediante la atracción de cationes orgánicos y que no son mojadas por el agua. En conclusión, se puede afirmar que los cationes orgánicos dificultan el contacto arcilla-agua, disminuyendo el efecto de dispersión en arcillas dispersivas.

De manera similar los polianiones orgánicos poseen a lo largo de cadena molecular cargas positivas y negativas originadas por la aparición de carboxilos, hidroxilos, amidas y algunos otros grupos polarizados en su estructura. Estas cargas generan enlaces con las partículas de arcilla, las cuales forman arreglos a manera de rosario brindando una mayor estabilidad. Estos compuestos han sido utilizados exitosamente, aunque con altos costos, para el mejoramiento de las condiciones del material bajo el nombre de acondicionadores de suelo.

Considerando el efecto de la materia orgánica y el pH sobre los suelos es posible concluir que un material, a pesar de poseer niveles elevados de ESP, puede ser estable si es lo bastante ácido (bajo pH) o posee un alto contenido de materia orgánica.

2.2.6 Tipos de arcilla.

El material arcilloso se encuentra unido entre sí debido a la existencia de fuerzas electroquímicas entre las partículas, lo que genera una atracción ligada a la propiedad de cohesión en un suelo.

Las fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla son de dos tipos:

- Electrostáticas: presente entre caras cargadas negativamente y bordes con carga positiva o, como en el caso de la illita, entre iones de potasio e interláminas adyacentes.
- Fuerzas de Van der Waals.

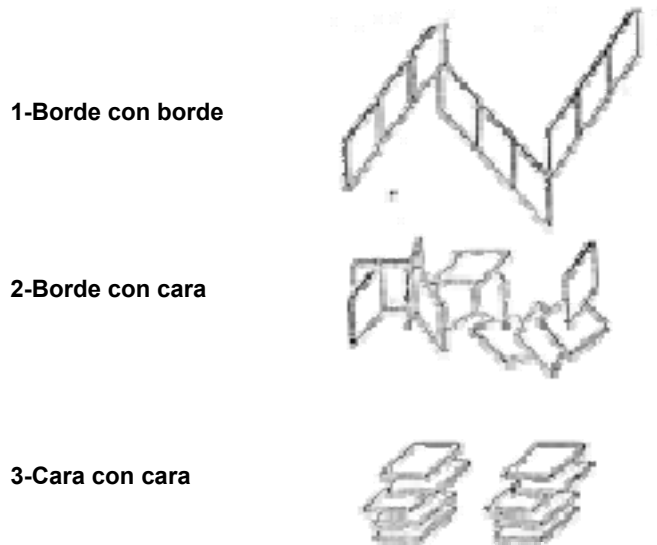
Las partículas, de forma planar, suelen formar arreglos de acuerdo a su contenido mineralógico y sus propiedades electroquímicas. Dichos arreglos pueden ser: borde con borde, borde con cara o cara con cara (véase figura 22).

Según van Olphen³³, es conocido que bajo condiciones propicias la superficie de los bordes de las partículas de arcilla posee cargas positivas. Una prueba de laboratorio que puede corroborar dicha aseveración consiste en mezclar arcillas del tipo kaolinita con una solución negativa de oro y observar lo sucedido mediante un microscopio electrónico. Tal como se muestra en la figura 23, las partículas de oro cargadas negativamente se

³³ OLPHEN, Op. cit., p. 91.

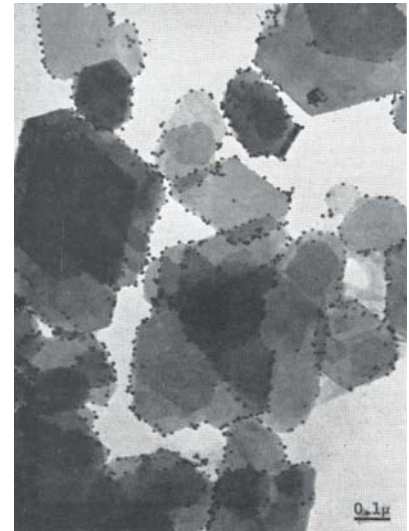
adhieren a los bordes de las partículas de kaolinita, lo que indicaría la presencia de cargas positivas en estos.

Figura 22. Tipos de arreglo de partículas arcillosas.



Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Figura 23. Solución de oro (puntos negros) y kaolinita.



Fuente: van Olphen.

La presencia de dichas cargas explica la formación de estructuras tipo castillo de naipes mediante enlaces borde-cara. Esto debido a la presencia de cargas de signo contrario encontradas en las superficies de las partículas (carga negativa) y los bordes de estas (carga positiva).

De acuerdo a sus propiedades físico-químicas, algunos tipos de arcilla suelen ser más propensos a la aparición de problemas de dispersión que otros, ya sea por su composición mineralógica, forma, distribución, entre otros factores. A continuación se explican las características de los tipos de arcillas más comunes, así como su tendencia a la dispersión:

2.2.6.1 Smectita. Las arcillas del tipo smectita se forman generalmente en ambientes con niveles relativamente elevados de pH. Igualmente su formación se ve altamente favorecida por la presencia de condiciones climáticas áridas donde la evaporación excede los valores de precipitación.

La smectita está compuesta por tres láminas: dos láminas tetraedrales de sílice y una octaedral de aluminio. En su estructura, la esmectita puede presentar sustitución de iones sílice de las láminas tetraedrales por iones Al, de menor valencia. Igualmente los iones Al que componen las láminas octaedrales suelen ser reemplazados por iones Mg divalentes o iones Fe, Cr, Zn, todos de menor valencia. Debido a su pequeño tamaño, estos iones pueden llegar a ocupar la posición donde en otra ocasión se encontrarían los iones Al y Si, por lo que estos reemplazos se conocen con el nombre de intercambios isomórficos.

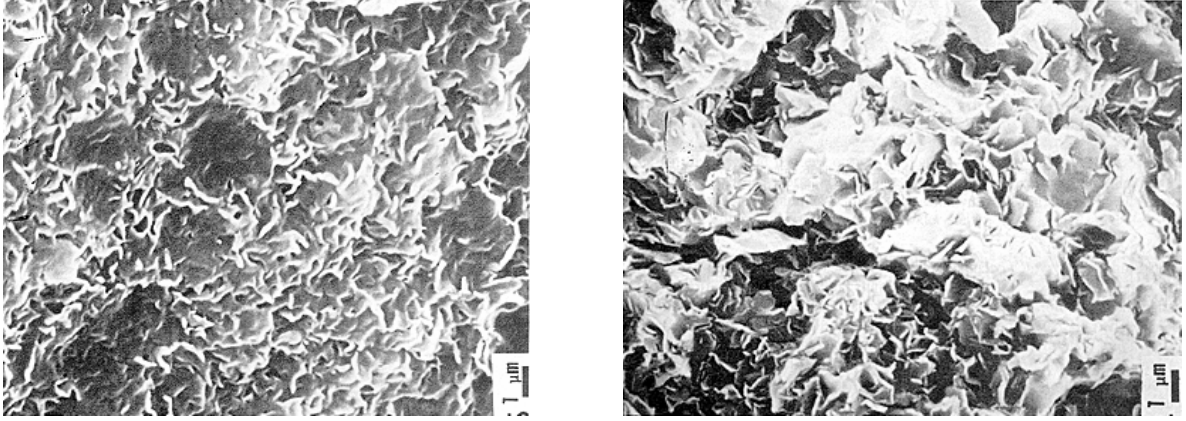
El desequilibrio de cargas ocasionado por la sustitución de los iones es compensado mediante la atracción de cationes presentes en la solución. Dichos cationes intercambiables se pueden localizar tanto en la superficie exterior de la partícula de arcilla así como entre las láminas unitarias. Lo anterior ocasiona un aumento en la separación de las láminas que componen las partículas de smectita, facilitando la entrada de otros cationes o de moléculas de agua.

Cationes intercambiables, ya sea de sodio, calcio, magnesio, aluminio, u otros, tienden a cubrir toda la extensión de las superficies de las láminas unitarias de las partículas de smectita, cargadas negativamente. Debido a lo anterior, es normal encontrar valores de CEC de entre 70 a 100 me/100g de arcilla.

La fuerza de las uniones depende en gran medida del tipo y cantidad de cationes presentes. Es así que mientras una arcilla del tipo montmorillonita (perteneciente al grupo esmectita) con alto contenido de cationes sodio presenta una alta separación entre sus partículas, una arcilla similar pero con una elevada presencia de cationes de calcio muestra una separación mucho menor (véase figura 24).

Cuando las partículas de smectita entran en contacto, ya sea con agua o vapor de agua, las moléculas de esta pueden penetrar entre sus láminas unitarias. La hidratación de las láminas genera un fenómeno conocido como hinchamiento interlaminar, que puede llegar a duplicar el volumen del material. Las láminas unitarias de smectita se hidratan mediante la absorción de entre una y cuatro láminas monomoleculares de agua.

Figura 24. Partículas de montmorillonita con alto contenido de sodio (izquierda) y alto contenido de calcio (derecha).

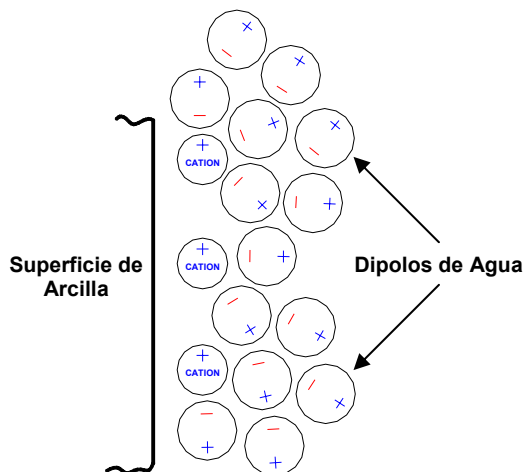


Fuente: FAO.

El agua absorbida es fijada a la superficie de las láminas unitarias mediante dos posibles mecanismos: la hidratación de los cationes atraídos por la arcilla y que se encuentran entre las láminas unitarias (véase figura 25) o el establecimiento de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua y aquellas de oxígeno presentes en las láminas.

Es importante anotar que el hinchamiento causado por la hidratación de las láminas unitarias sólo representa un porcentaje del aumento de volumen total al que se ve sometida la smectita. Luego del hinchamiento por la hidratación de las partículas ocurre otro fenómeno conocido como hinchamiento osmótico. Este evento se encuentra asociado a la fuerza de repulsión existente entre las dobles capas eléctricas de las partículas. Es decir, un primer hinchamiento por hidratación aumenta el grado de separación entre las partículas, facilitando que estas lleguen a un punto tal que las fuerzas de van der Waals, que antes las mantenían unidas, no ejerzan la suficiente fuerza de atracción. De esta manera, la fuerza resultante será una fuerza de repulsión ...véase numeral 2.2.2..., facilitando la separación de las partículas y propiciando la aparición de problemas de dispersión. El hinchamiento osmótico llega a un punto tal que puede ser detenido por la formación de enlaces cruzados entre los bordes positivos y las caras negativas de las partículas de arcilla. Cuando se presenta un fenómeno de dispersión dichos enlaces no se presentan, facilitando la separación de las partículas y su posterior dispersión.

Figura 25. Atracción de agua a la superficie de la arcilla por hidratación de cationes.



Fuente: Esquemas investigación.

La aparición de smectita, incluso en pequeñas cantidades, puede afectar enormemente el comportamiento del suelo. Bajos porcentajes de estas arcillas presentes en una arcilla de kaolinita pueden generar problemas de dispersión³⁴, debido a que las partículas de smectita suelen depositarse en los bordes positivos de las de kaolinita. Esto impide un buen contacto borde-cara entre las partículas, dificultando su floculación.

2.2.6.2 Kaolinita. Suelen formarse en suelos con una elevada presencia de aluminio y bajas concentraciones de sílice. Igualmente, su formación se ve favorecida por niveles bajos de pH y condiciones climáticas con precipitaciones elevadas.

Las arcillas de kaolinita están conformadas por dos láminas: una de sílice tetraedral y una de aluminio octaedral. Las partículas de kaolinita poseen forma plana, con cargas positivas ubicadas en los bordes fracturados del material cuando se encuentra en condiciones de pH bajo y cargas negativas en sus caras.

³⁴ AGASSI, Menachem. Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. United States of America: Marcel Dekker, 1996. p. 4.

Debido a lo anterior, las partículas de kaolinita suelen formar arreglos cara con cara en suelos con un pH elevado o borde con cara en caso de bajo pH (véase figura 26). El cambio de carga en el borde en condiciones de bajo y alto pH explica, según Mitchell³⁵, el por qué es normal encontrar bajos valores de CEC en kaolinitas expuestas a un ambiente de bajo pH y valores superiores de CEC en ambientes neutros o básicos.

Figura 26. Partículas de kaolinita.



Fuente: FAO.

Las kaolinitas no presentan normalmente problemas de expansión como ocurre en el caso de las montmorillonitas, por lo que igualmente es poco común encontrar en ellas problemas de dispersión. Lo anterior no puede tomarse como regla general, ya que en algunas ocasiones arcillas con altos contenidos de kaolinita pueden tornarse poco estables cuando se presentan pequeños porcentajes de smectitas, como se ha mencionado anteriormente.

Las uniones entre las partículas suelen ser del tipo Van der Waals o conexiones O-OH, lo que genera fuerzas de unión elevadas impidiendo la penetración de moléculas de agua. Igualmente, los espacios entre láminas unitarias son lo suficientemente reducidos para impedir la entrada de iones, por lo que todos los cationes compensadores de carga se

³⁵ MITCHELL, Op. cit., p. 35.

deben ubicar sobre la superficie exterior del grupo de láminas unitarias que compone la partícula.

Esto, en conjunto con un bajo intercambio isomórfico, donde un solo sílice de las láminas tetraedrales entre 400 es reemplazado por iones de menor carga, ayuda a explicar la baja capacidad de intercambio catiónico esperada en este tipo de arcillas. Los valores de CEC en kaolinitas no suelen superar los 10me/100g de arcilla.

2.2.6.3 Illita. Las illitas suelen formarse bajo condiciones similares a los de las smectitas. La principal diferencia es la necesidad de elevados contenidos de potasio en el suelo.

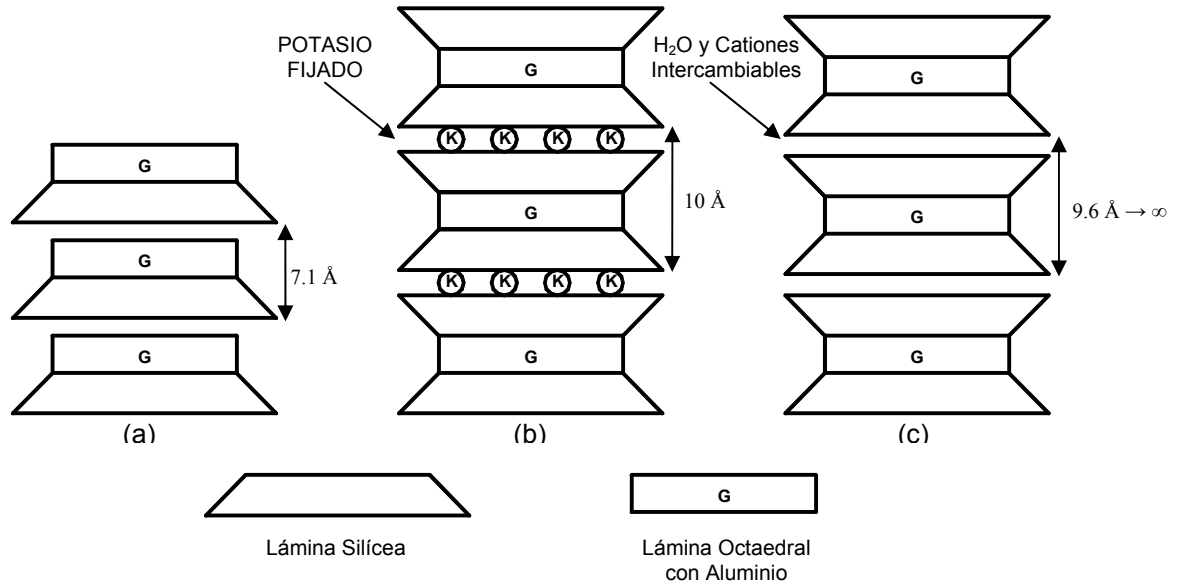
Igualmente, la illita posee una estructura bastante similar a aquella de la smectita. De manera análoga a esta última, la estructura de la illita está compuesta por tres láminas: dos de sílice tetraedral y una de aluminio octaedral. La diferencia entre estos dos tipos de arcilla recae en que, en el caso de la illita, las substituciones de iones que producen el desequilibrio de cargas ocurren principalmente en las láminas tetraedrales de sílice y los cationes que la compensan son iones potasio, que se ubican entre sus láminas unitarias (véase figura 27).

Dichos cationes aumentan las fuerzas que mantienen unidas a las láminas de arcilla, generando un efecto similar al ocurrido en la kaolinita e impidiendo la entrada de cationes o moléculas de agua. De esta manera, en las arcillas pertenecientes al grupo illita, sólo los iones externos son intercambiables; por ello estas suelen tener valores de CEC de entre 20 a 40 me/g de arcilla, mucho menor a aquellos de las smectitas.

Las partículas de illita presentan superficies bastante irregulares (véase figura 28), lo que solo permite un contacto muy pobre entre las caras y los bordes de las mismas. Debido a esto las fuerzas de atracción se debilitan, presentándose posibles problemas de dispersión. En términos generales, según Ward³⁶, se considera que existe un aumento en la dispersión a medida que crece el contenido de illita en la fracción arcillosa del suelo.

³⁶ WARD, Phillip. Dispersion of Saline and Non-saline Natric Mollisols and Alfisols [online]. Soil Science, Lippincott Williams & Wilkins, August 2004. Available from internet: <www.soilsci.com/pt/re/soilsci/fulltext.00010694-200408000-00002.htm>

Figura 27. Esquema de la estructura de: (a) kaolinita, (b) illita y (c) montmorillonita.



Fuente: Esquemas investigación.

Figura 28. Partículas de illita.



Fuente: FAO.

2.3 EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Un suelo dispersivo puede presentar diversos efectos sobre el suelo, dentro de los que se encuentran:

- Pérdida de resistencia ante la acción del agua.
- Cambios en las propiedades reológicas.
- Alta susceptibilidad a la erosión.
- Reducción de la infiltración y conductividad hidráulica.
- Formación de costras superficiales.
- Lavado del material fino de la matriz.

La reducción de la infiltración y conductividad hidráulica y la formación de costras superficiales suelen ser aspectos generalmente tratados en términos de problemas agrícolas.

2.3.1 Pérdida de resistencia.

La disminución en la resistencia de un suelo dispersivo ocurre debido a la pérdida de cohesión ocasionada cuando el material se encuentra en contacto con agua. En estos casos, la fuerza de los enlaces electroquímicos que mantienen unidas las partículas que componen la fase arcillosa del suelo disminuye drásticamente, al punto de presentarse la separación de las partículas. De esta manera, mientras un material dispersivo puede poseer una buena resistencia en estado seco con valores relativamente elevados de cohesión, esta luego puede verse fuertemente reducida ante la acción del agua.

Dicho problema tiende a ser crítico en zonas de baja precipitación con posible ocurrencia de fenómenos de lluvias elevadas muy por encima de la media del sector. Cuando esto ocurre, el clima árido permite la formación de taludes de alta pendiente, dada la buena resistencia del material en estado seco. Estos taludes son luego desestabilizados durante la ocurrencia de eventos de precipitación elevada, lo que conduce a la aparición de un gran número de deslizamientos en un tiempo reducido.

Lo anterior refleja lo ocurrido en Febrero de 2005 en algunas zonas del municipio de Girón, departamento de Santander (véase figura 29), donde debido a lluvias torrenciales

se activaron un gran número de deslizamientos en un tiempo cercano a 108 horas. Lo anterior, en conjunto con el agua de escorrentía, condujo a la formación de una serie de flujos de lodos y detritos que terminaron por ocasionar graves daños a la población.

Figura 29. Deslizamientos activados por evento de precipitación, Girón, Santander.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

2.3.2 Cambio en el comportamiento del flujo.

Las propiedades reológicas de un flujo dependen principalmente de cuatro factores: la viscosidad del medio, la concentración de la materia en suspensión, el tamaño y forma de las partículas en suspensión y las fuerzas de interacción entre estas.

En términos generales, si la fuerza de acción presente entre las partículas en suspensión es lo suficientemente baja como para ser despreciada, el flujo se comportará a grandes rasgos como un flujo Newtoniano. En estos casos el gradiente de velocidad es directamente proporcional al esfuerzo cortante, pasando por el origen, y su coeficiente de proporcionalidad es conocido como viscosidad. La relación entre la viscosidad de la solución y aquella del medio líquido, conocida como viscosidad relativa, es mayor que uno, representando un aumento en la viscosidad del fluido al encontrarse con material en suspensión.

En la mayoría de los casos de flujos de material arcilloso en agua, la fuerza de atracción entre partículas no puede ser despreciada. De esta manera, cuando existen fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla se debe esperar un aumento de la viscosidad de la solución mayor a que si estas no existieran. Esto ocurre debido a que se debe ejercer un mayor esfuerzo cortante con el fin de romper los enlaces de atracción entre las partículas y de esta manera generar un flujo con una determinada velocidad. El comportamiento en este tipo de casos es similar al de un flujo tipo Bingham.

De esta manera la dispersión, al generar la ruptura de la estructura de las partículas y eliminar sus fuerzas de atracción, provoca una reducción en el esfuerzo límite (aquel a partir del cual se genera un flujo del material). Cuando las partículas pierden sus fuerzas de atracción se puede observar igualmente cierta reducción en los valores de viscosidad de la solución, sin embargo, el efecto de la dispersión adquiere una mayor importancia en la reducción del esfuerzo cortante límite.

De esta manera soluciones compuestas de partículas altamente dispersas pasan de poseer características relativas a un flujo Bingham, a presentar un comportamiento semejante a un flujo Newtoniano. Dicho efecto puede ser observado en la figura 30.

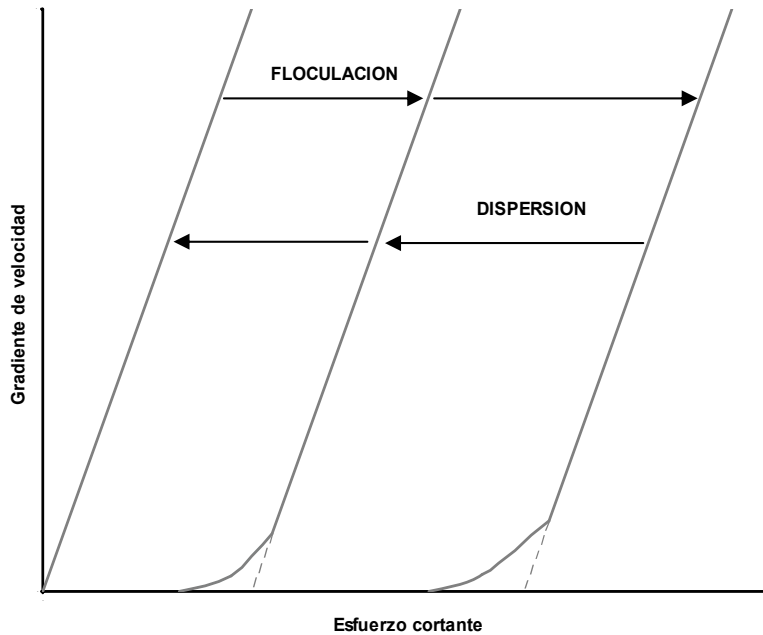
2.3.3 Alta susceptibilidad a la erosión.

Los suelos dispersivos poseen baja resistencia en estado saturado, lo que facilita su transporte por parte del agua y favorece de esta manera la erosión. Es común encontrar en suelos dispersivos problemas producto de erosión del tipo túnel, incluso llegando a la formación de cárcavas. El desprendimiento de material producto de este tipo de fenómenos puede llegar a ser muy considerable.

2.3.4 Reducción en la infiltración y conductividad hidráulica.

Las arcillas dispersivas, a causa de su disociación ante la acción del agua y su reducido tamaño en este estado, tienden a llenar los poros que presenta el suelo que las contiene. De esta forma, la presencia de un material dispersivo en concentraciones considerables restringe de manera significativa el movimiento del agua y del aire en el suelo, dificultando la infiltración y disminuyendo la conductividad hidráulica en este.

Figura 30. Efecto de la dispersión y la floculación en las propiedades de flujo de una suspensión de arcilla.



Fuente: Esquemas investigación.

Un suelo con alto contenido de material dispersivo puede perder su estructura bajo el efecto del agua. Debido a esto, los macroporos, grietas y fisuras por los cuales circula rápidamente el agua en el suelo son igualmente destruidos, dificultando su movimiento y reduciendo la permeabilidad.

Debido a la dispersión de la arcilla, esta puede ser fácilmente transportada y acumulada en los niveles inferiores. Como resultado, la capa superficial de un suelo dispersivo puede poseer una textura gruesa y suelta, aunque más abajo el material puede mostrar una estructura columnar o prismática, masiva y dura de baja permeabilidad, producto de la dispersión de la estructura del suelo y la acumulación de arcilla.

De esta manera la dispersión puede reducir en gran medida el agua disponible para las plantas, al igual que el oxígeno en la zona de raíces, lo que origina serios problemas de tipo agrícola. Sin embargo, no es correcto relacionar la dispersión con un suelo de baja

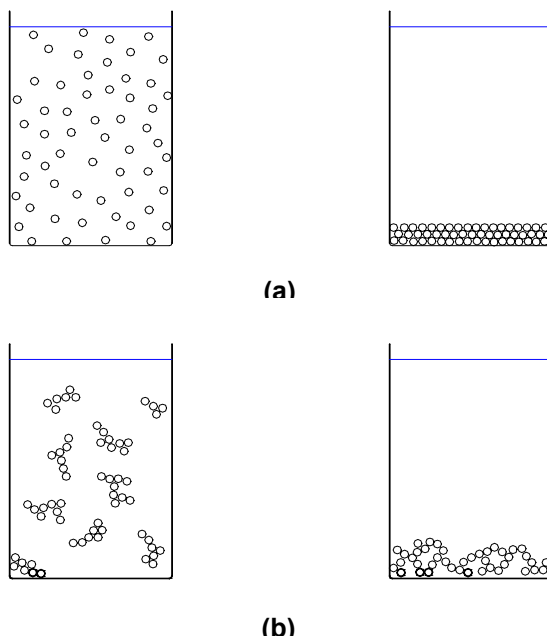
permeabilidad. Arenas y suelos turbosos pueden contener una alta concentración de sodio intercambiable y no obstante una alta permeabilidad.

2.3.5 Formación de costras superficiales.

La formación de costras en la superficie del terreno es un fenómeno característico de suelos dispersivos con alto contenido de material fino. Su causa principal está basada en el efecto de disociación causado por las gotas de lluvia al chocar con el suelo, que desprende material y coloca partículas finas en suspensión.

Normalmente el material en suspensión flocula y sedimenta, formando una capa sobre el suelo con una estructura abierta y permeable. En suelos dispersivos esto no sucede. En estos casos el material fino en suspensión se disgrega debido a la reducida concentración de electrolitos presentes en el agua lluvia y su baja conductividad eléctrica. Estas partículas son luego depositadas sobre el suelo en forma de manto (véase figura 31). Debido al efecto de disociación presente en el material, la capa formada por las partículas tiende a poseer una estructura cerrada y muy poco permeable que dificulta la infiltración y el brote de las plantas, generando así serios problemas para su crecimiento y desarrollo.

Figura 31. Esquema de la sedimentación de: (a) arcillas dispersas y (b) arcillas floculadas.



Fuente: Esquemas investigación.

2.3.6 Lavado del material fino de la matriz.

Este fenómeno puede presentarse en suelos con contenidos bajos de arcillas dispersivas. La presencia relativamente baja de estas arcillas no permite que ejerzan su acción impermeabilizante en el suelo, en general, según Agassi³⁷, suelos de smectita con contenido de arcillas menores o cercanos al 10% no generan una impermeabilización marcada debido a que la arcilla dispersiva no se encuentra en cantidades suficientes para bloquear los poros del suelo ni generar costras superficiales impermeables. De esta manera, en estos casos, se obtiene un suelo con propiedades dispersivas pero con una alta permeabilidad.

Lo anterior lleva a la generación de diversos problemas geotécnicos del suelo. La alta permeabilidad permite una rápida acción del agua, lo que facilita su efecto en el suelo produciendo una pérdida de resistencia prácticamente momentánea. Esto facilita la formación de deslizamientos con niveles de precipitación no muy elevados.

De igual manera, los suelos dispersivos altamente permeables son muy propensos al lavado de la fase fina de la matriz. Lo anterior ocurre porque, al entrar en contacto con agua lluvia de baja salinidad, las arcillas dispersivas entran fácilmente a formar una suspensión de partículas muy finas y dispersas. Estas partículas pueden ser fácilmente transportadas por el flujo de agua, lo que termina por generar un rápido lavado del material fino, destruyendo la estructura del suelo y causando su posterior colapso.

Por lo anterior se considera que suelos dispersivos con una permeabilidad alta pueden presentar serios problemas de resistencia y estabilidad. Los suelos presentes en la cuenca de la quebrada Angulito en el municipio de Girón, Santander, presentan ambas características. Es así que se considera que la gran cantidad de deslizamientos presentados entre el 8 y el 12 de Febrero de 2005 en esta zona están estrechamente relacionados con el fenómeno antes descrito.

³⁷ AGASSI, Op. cit., p. 4.

2.4 POSIBLES SOLUCIONES

2.4.1 Aplicación de enmiendas químicas.

Los tratamientos utilizados para el mejoramiento de las características físicas y químicas de los suelos dispersivos consisten primordialmente en el uso de enmiendas con productos químicos tales como el yeso y la cal.

Las enmiendas trabajan generalmente de una manera muy similar. Estos compuestos poseen en su estructura iones calcio que son liberados y entran a formar parte del suelo.

De esta manera, las enmiendas reducen la dispersión en un suelo debido a dos efectos importantes:

- A corto plazo, la implementación de enmiendas de cal y yeso aumenta el contenido de sales en el suelo que, de igual manera, genera un incremento en la concentración de electrolitos. Ante eventos de precipitación, el agua lluvia disuelve estos electrolitos, adquiere una mayor conductividad eléctrica y genera la floculación de los coloides.
- Con el tiempo, los iones calcio liberados por las enmiendas entran a reemplazar los cationes de sodio (Na^+) normalmente adheridos a las partículas de arcilla en suelos dispersivos. De esta forma, a medida que los cationes Ca^{2+} reemplazan los correspondientes de sodio, la dispersión del suelo se reduce y este adquiere mayor estabilidad.

El tipo y cantidad de mejorador químico depende de las características del suelo, de la velocidad de sustitución de sodio deseada y de limitaciones económicas; un mejorador económico está relacionado generalmente a una sustitución más lenta. Las características del suelo más importantes a analizar son: el contenido de carbonatos de metales alcalino-térreos y el pH.

Los tipos más comunes de enmiendas utilizadas para el mejoramiento de suelos con altos porcentajes de sodio intercambiable son:

- Sales solubles de calcio: cloruro de calcio y yeso.
- Ácidos o formadores de ácido: azufre, ácido sulfúrico, sulfato de aluminio, cal-azufre.

- Sales de calcio de baja solubilidad: roca caliza molida, subproductos de la cal usados en los ingenios azucareros.

Cada tipo de enmienda debe ser utilizada dependiendo principalmente del tipo de suelo: 1) suelos que contienen carbonatos de materiales alcalino-térreos, 2) suelos libres de carbonatos de materiales alcalino-térreos y pH mayor a 7.5, 3) suelos libres de carbonatos de materiales alcalino-térreos y pH menor a 7.5.

En el caso de presentarse un suelo del grupo 1, tanto las sales solubles de calcio como los ácidos o formadores de ácidos pueden ser utilizados, sin embargo el uso de caliza será inútil. La aplicación de ácidos o formadores de ácidos a suelos de los grupos 2 y 3 tenderá a generar una alta acidificación. Si la acidificación es suficiente para bajar demasiado el pH del suelo se debe considerar solo la aplicación de sales solubles de calcio, a menos que también se aplique caliza. Se debe tener en cuenta que la acidificación del suelo en regiones áridas hasta un pH de 6 a 6.5 se considera benéfica para el crecimiento de las plantas.

Aunque la aplicación de caliza en suelos de los grupos 2 y 3 es benéfica, se debe considerar que la efectividad de esta enmienda disminuye drásticamente al aumentar el pH del medio debido a que la solubilidad del CaCO_3 se reduce en medios básicos. Se considera que el uso de caliza se hace útil cuando se tiene un pH menor a 7, lo que lo hace altamente ventajoso para suelos del grupo 3 pero de poca eficacia para suelos del grupo 2.

La aplicación de hidróxidos de calcio puede mostrarse altamente útil para el mejoramiento de las condiciones de suelos dispersivos. Forsythe³⁸ reporta el exitoso tratamiento de suelos dispersivos en numerosas represas en Mississippi mediante la aplicación de tratamientos con hidróxido de calcio o cal hidratada (CaOH_2) de entre 0.5 a 3%.

³⁸ FORSYTHE, P. Experiences in Identification and Treatment of Dispersive Clays in Mississippi Dams. En: Symposium Presented at the American Society for Testing and Materials (ASTM). (79th : 1976 : Chicago). Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. Chicago: ASTM, 1976. p. 135.

El cloruro de calcio es posiblemente una de las mejores fuentes de iones calcio debido a su alta solubilidad en el agua, pero su costo elevado hace que su uso sea poco frecuente. Las cantidades de cloruro de calcio necesarias para generar la floculación de una montmorillonita sódica y cálcica se muestran en la tabla 2, obsérvese que los valores de concentración de CaCl_2 son mucho mayores (hasta 10 veces) en el caso de una montmorillonita sódica debido principalmente al tamaño de su doble capa eléctrica y su mayor inestabilidad.

Tabla 2. Valores de floculación para montmorillonita en solución de cloruro de calcio.

Solución (Concentración de 0.25%)	Valor de floculación (meq/lit)
	CaCl_2
Montmorillonita sódica	2.3-3.3
Montmorillonita cálcica	0.17-0.23

Fuente: van Olphen.

El ácido sulfúrico y los sulfatos de hierro y aluminio son de reacción rápida. El ácido sulfúrico es lo suficientemente económico para su aplicación en campo, pero los sulfatos de hierro y aluminio no son económicamente recomendables.

El yeso y el azufre, debido a su bajo costo, son los mejoradores utilizados con mayor frecuencia. El azufre, debido a la necesidad de la acción microbiana para la formación de sulfato, se considera de acción lenta; incluso, algunos experimentadores reportan haber encontrado una oxidación incompleta del azufre un año o más después de su aplicación.

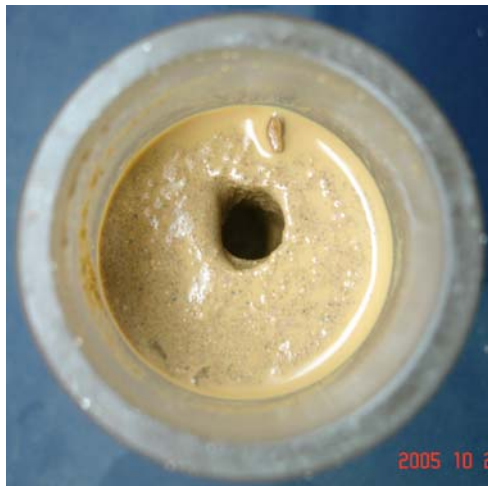
Se debe tener cuidado en la aplicación de cada uno de los componentes ya que su uso en condiciones poco propicias puede acrecentar los problemas presentes en el suelo. El uso del yeso en suelos ácidos produce el reemplazo de los cationes magnesio y potasio, lo que puede generar su escasez en la zona de raíces.

Igualmente, la aplicación de yeso puede generar algunos problemas para la ganadería de la zona, ya que las reses se pueden mostrar reacias a consumir la vegetación que se encuentre cubierta de partículas de yeso; este comportamiento puede continuar en tanto

el yeso no sea lavado de las hojas de las plantas. La cal puede producir una reducción en la infiltración y aumento en la formación de costras superficiales.

Con el fin de determinar las cantidades de enmienda a utilizar para solucionar posibles problemas de dispersión en un suelo se hace necesaria la implementación de pruebas de laboratorio. La prueba que muestra mejores resultados es la conocida como ensayo de **pinhole**, que determina las características dispersivas de un suelo mediante el análisis de la erosión causada por un flujo de agua que pasa por entre el material. Diferentes concentraciones de enmienda pueden ser aplicadas al material de prueba para, de esta manera, determinar las cantidades suficientes a implementar para solucionar los problemas de dispersión del suelo (véase figura 32).

Figura 32. Reducción de la dispersión del suelo de la cuenca de la quebrada Angulito mediante la adición de yeso en ensayo de pinhole: (a) sin yeso y (b) 1% yeso.



(a)



(b)

Fuente: Archivo fotográfico investigación.

Las enmiendas a aplicar pueden ser adicionadas mediante diferentes mecanismos. En la agricultura el tratamiento más frecuentemente utilizado es la aplicación directa de la enmienda en la de la capa superficial del suelo. La mezcla se realiza mediante arados. En el caso de las presas se realizan normalmente dos tipos de aplicación: la aplicación directa de la enmienda sobre el material o su aplicación mediante una mezcla con el agua que entra en el sistema. En algunos casos, tales como en la represa sobre el río Cardinia

en Melbourne, Australia³⁹, la aplicación de enmiendas mediante su disolución en agua puede verse como una alternativa bastante viable para la solución de problemas de dispersión. Las posibles formas de aplicación de las enmiendas seleccionadas para el caso de la cuenca de la quebrada Angulito deben todavía ser estudiadas.

2.4.2 Revegetalización.

Con el fin de obtener resultados satisfactorios en un menor tiempo, es recomendable estudiar de manera simultánea a la aplicación de enmiendas químicas una posible estrategia de revegetalización de la zona afectada.

Los trabajos de revegetalización deben ser en lo posible realizados mediante la siembra de especies nativas de la zona, con el fin de no alterar el ecosistema presente en el sector. Con este fin, se deben estudiar factores importantes tales como el clima, la hidrología y la accesibilidad al agua, la disponibilidad de nutrientes para las plantas en relación a los requeridos por estas e incluso la topografía del sector para determinar estrategias de siembra.

En caso de no encontrarse especies que se adapten a las características del sector afectado o que no contribuyan de manera importante a la estabilidad de los taludes, se debe considerar la implementación de estrategias de revegetalización mediante plantas ajenas al ecosistema de la zona. Una de las principales alternativas es la utilización de vetiver. Esta especie posee algunas cualidades que la hacen altamente propicia para su utilización en condiciones agrestes y donde se requiere la obtención de mejoras en la estabilidad de los suelos en poco tiempo. El vetiver puede desarrollarse en suelos áridos con pocos o prácticamente ningún nutriente, en taludes de alta pendiente y sin la necesidad de mantenimientos. De igual manera puede soportar incluso el efecto de incendios forestales, mostrándose como una alternativa propicia para el mejoramiento de las condiciones de estabilidad en zonas no aptas para el crecimiento y desarrollo de otras especies.

³⁹ GRANT, K. *et al.* Protecting a Dispersive Soil Storage by Water Treatment. En: Symposium Presented at the American Society for Testing and Materials (ASTM). (79th : 1976 : Chicago). Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. Chicago: ASTM, 1976. p. 191.

La aplicación de estrategias de revegetalización debe ser estudiada de manera simultánea a la aplicación de las enmiendas, ya que la utilización de ciertos mejoradores químicos, tales como el yeso, puede facilitar el crecimiento y desarrollo de especies que de otra manera no podrían ser utilizadas. Esto ocurre debido a que las enmiendas trabajan de igual manera como abonos y mejoradores de las condiciones del suelo, facilitando el desarrollo de las plantas y aumentando la cantidad de nutrientes disponibles para estas.

3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO EN LA QUEBRADA ANGULITO

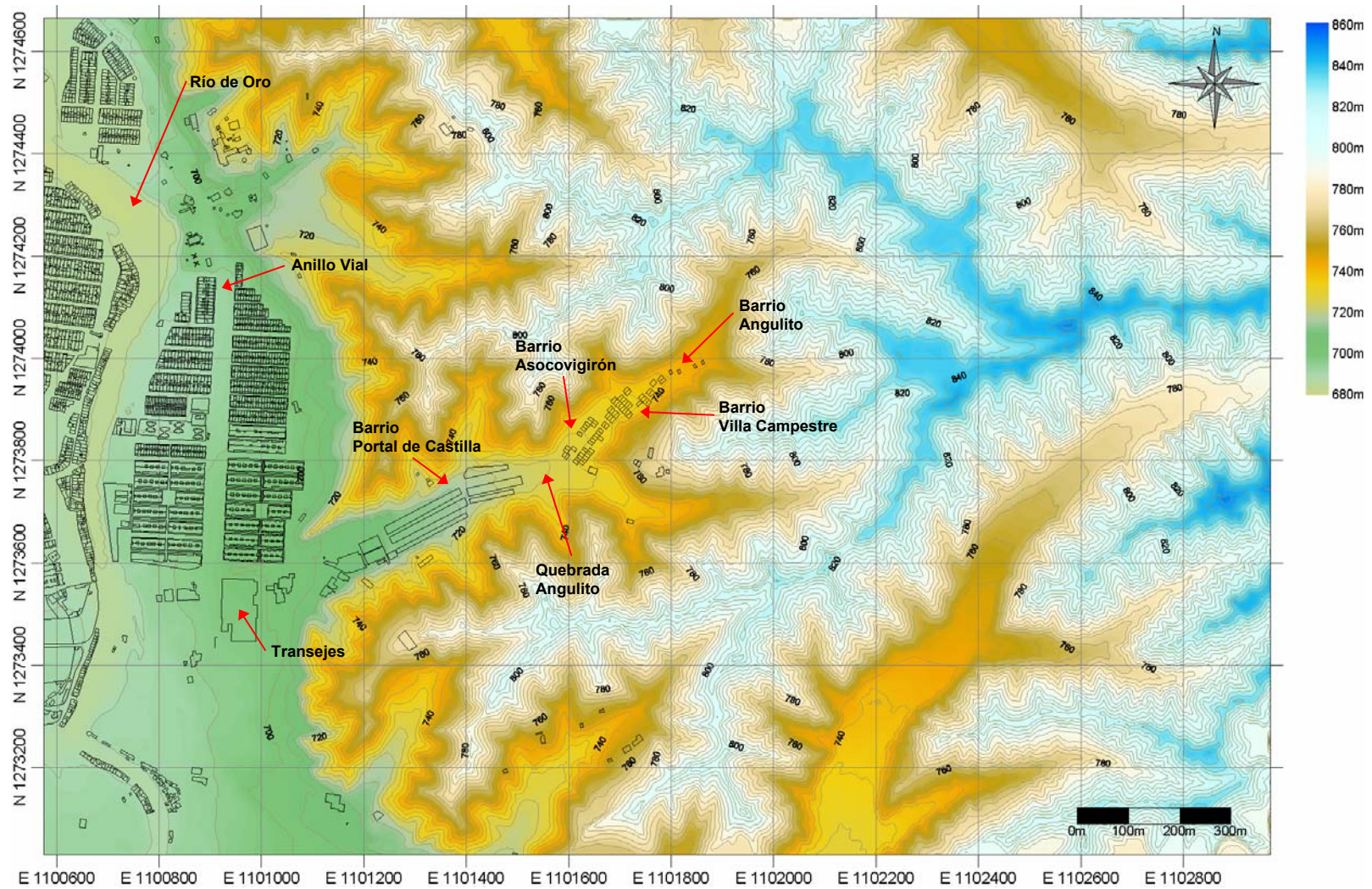
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

La quebrada Angulito se encuentra ubicada en el noroeste de la meseta de Bucaramanga, haciendo ésta parte de la depresión tectónica en la zona de falla del sistema de las fallas del Suárez y Río de Oro. Cuenta con aproximadamente 2 kilómetros de longitud y 500 metros de ancho y se encuentra localizada al oriente de las instalaciones de Transejes. Aparentemente la quebrada Angulito tuvo un cauce profundo y ancho hasta desembocar al Río de Oro y que posteriormente fue obstaculizada por rellenos implementados con el fin de construir urbanizaciones tales como el Portal de Castilla y el oriente de lo que es hoy la zona de Transejes en el sector del Rincón de Girón (véase figura 33). Estos depósitos son intercalaciones de materiales arenosos característicos del río de Oro y de limos provenientes del sector de la quebrada Angulito, los espesores en este sector varían de dos a siete metros. Estudios realizados en el Rincón de Girón, cerca de Transejes, muestran depósitos de limos blandos de más de 5 metros de espesor.

3.1.1 Descripción geológica regional.

El sector de la quebrada Angulito pertenece a la formación Bucaramanga en depósitos Cuaternarios, encontrándose por encima de las rocas más antiguas de la zona, siendo estas de origen sedimentario pertenecientes a la formación Bocas, de edad Triásico. Estos depósitos cubren gran parte de la zona del municipio de Girón, sobre los cuales se ha desarrollado su casco urbano y se ha depositado el valle del río de Oro. En la quebrada Angulito estos depósitos se encuentran representados localmente por el miembro Órganos (Qbo).

Figura 33. Plano de localización general, escala 1:12500.



Fuente: Archivo digital investigación.

3.1.1.1 Formación Bucaramanga. Descrita inicialmente por De Porta (1958), corresponde a un depósito sedimentario aluvial de edad Cuaternario, morfogenéticamente definido como un abanico aluvial, asociado a un control tectónico en su desarrollo y depositación. Su espesor aumenta de oriente a occidente en la meseta de Bucaramanga y aunque el valor real de éste se desconoce, algunos cortes geológicos permiten estimar, en los sectores más profundos, valores promedio cercanos a los 250 m.

De acuerdo con la granulometría, morfología, agentes de transporte y fuentes de los materiales, esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, donde alternan materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombros, canal y lagunar. En la zona de la quebrada Angulito, como se mencionó anteriormente, esta unidad se encuentra representada por el miembro Órganos, la cual es descrita a continuación.

3.1.1.2 Miembro Órganos (Qbo). Definido por Hubach (1952), aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga según exploraciones del Ingeominas.

Se caracteriza por erosionarse fácilmente, formando surcos, cárcavas y tierras malas que dan formas de estoraques que alcanzan alrededor de 15 metros de altura y sobre él se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo⁴⁰.

Como se puede observar en la figura 34, en la quebrada Angulito este miembro se presenta como una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos y conglomeráticos, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. De acuerdo con Bueno y Solarte, el ambiente de depositación del Miembro Órganos se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales.

La edad del Miembro Órganos podría abarcar el Pleistoceno medio. Geomorfológicamente este segmento desarrolla una forma típica que da origen a su nombre Órganos por la similitud

⁴⁰ GEOTECNOLOGÍA. Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen I: Geología y Geotecnia. Bucaramanga: CDMB, 2005. p. 7.

de los estoraques con los tubos de estos instrumentos, dando la geoforma típica de las llamadas tierras malas con pendientes de 30-70 grados. El drenaje es denso dendrítico y de cañadas profundas.

Figura 34. Miembro Órganos en la cuenca de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

El miembro Órganos se caracteriza por la formación de zonas saturadas subsuperficiales de profundidad entre 0.5m y 1.0m, ya que la infiltración es mediana para lluvias de baja intensidad y de hasta un 30% y un 10% aproximadamente para lluvias intensas. Debido a que estos suelos poseen una porosidad y permeabilidad alta los niveles freáticos son muy bajos. De esta forma, la quebrada Angulito posee características de un cuerpo de agua intermitente, donde el nivel freático se mantiene por debajo del nivel del suelo durante las épocas secas, que abarcan la mayoría del año.

La formación Órganos es el miembro predominante en el área de estudio, presentándose en el 90% de los deslizamientos ocurridos en la cuenca de la quebrada Angulito, por lo cual se establece como la formación más importante por identificar y caracterizar dentro de la investigación. Dicho miembro se subdivide en dos niveles, superior e inferior, aclarando que la cuenca, prácticamente en su totalidad, pertenece al nivel superior.

- Nivel inferior de la formación Órganos: el nivel Inferior está constituido por niveles arcillosos, arcillo arenosos y limo arcillosos de color amarillento y verdoso, compactos, de

consistencia firme, con algunas interposiciones de lentes conglomeráticos; estos niveles afloran principalmente en la margen izquierda del Río de Oro y se presentan en la parte baja de la cuenca de la quebrada Angulito.

A continuación se mencionan algunas de las características más importantes de este miembro:

- Litología y granulometría: arcillas y limos arcillosos. Se clasifican como CL, ML, SC y SM.
 - Permeabilidad y/o conductividad: son poco permeables a impermeables.
 - Estabilidad a flujos y deslizamientos: son generalmente muy estables debido a que poseen cohesiones altas. Se forman taludes semiverticales de gran altura.
 - Erosionabilidad: son poco erosionables en general, sin embargo, ocasionalmente aparecen capas de arena erosionable.
- Nivel superior de la formación Órganos: está constituido principalmente por niveles conglomeráticos de areniscas y lodolitas en matriz arcillo – limosa con interposiciones de lentes arcillosos, rojizos y anaranjados, siendo la litología típica del miembro Órganos, la cual se reconoce principalmente en el sector de la escarpa occidental de Bucaramanga, en afloramientos aislados en la margen izquierda del Río de Oro y en prácticamente la totalidad del área que cubre la cuenca de la quebrada Angulito.

La cuenca de la quebrada Angulito está constituido por cantos y guijos principalmente de areniscas, neis, cuarcitas, granitos y algunas lodolitas violetas en matriz limo arcillosa y limo arenosa amarillenta a gris; en este sector el miembro Órganos se presenta poco consolidado, con bajo desarrollo de estratificación, suelto, muy erodable y susceptible a deslizamientos por saturación, estos factores parecen indicar que en este sector el miembro Órganos presenta retrabajamiento.

Estudios realizados en este miembro (nivel superior) determinan las siguientes características:

- Litología y granulometría: suelos granulares, especialmente gravas y arenas con bajo contenido de finos. Se clasifican como GM, SM y con doble símbolo GW-GM y SW-SM.
- Permeabilidad y/o conductividad: suelos muy porosos subsuperficialmente pero poco permeables. En los grandes eventos lluviosos se acumula agua en las capas más

subsuperficiales. Sin embargo en pocas horas la saturación disminuye. En las lluvias de poca intensidad acumulan muy poca agua.

- Estabilidad a flujos y deslizamientos: son muy inestables al saturarse debido a su poco contenido de finos. Se pueden producir flujos de detritos.
- Erosionabilidad: son suelos muy erosionables. Se forman gran cantidad de surcos y de cárcavas en V. Su geomorfología corresponde generalmente a la de “**bad-lands**”.

Además de las anteriores características geotécnicas de la formación Órganos nivel superior del abanico aluvial de Bucaramanga, este se caracteriza por la aparición de “**bad-lands**”; que corresponden a zonas con muy poca cobertura vegetal y alta pendiente que sufren procesos de erosión intensa (véase figura 35).

Figura 35. Zonas de bad-lands en la formación Órganos nivel superior.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

En las zonas de **bad-lands** el perfil de suelo está compuesto por capas alternadas de suelos de menor y mayor erosionabilidad. En la formación Órganos habitualmente las capas superiores son menos erosionables que los inferiores y eso facilita la formación de laderas con pendiente cóncava. Los suelos más erosionables se deslizan fácilmente y los menos erosionables (en los mantos superiores) se tratan de mantener, formándose al final taludes semiverticales. Es común encontrar estoraques que simplemente son columnas verticales con una cabeza muy resistente a la erosión.

Como se mencionó anteriormente, en el miembro Órganos se forma este tipo de zonas (**bad-lands**), ya que por sus características geológicas, geotécnicas y climáticas se facilitan estos procesos, los cuales están relacionados con la alta dispersividad de la matriz, baja cohesión,

poca cobertura vegetal de especies de raíz profunda y una pluviosidad promedio baja con eventos de gran intensidad de precipitación, que causan procesos de erosión en V y deslizamientos subsuperficiales por saturación. Por esta razón es que la cuenca de la quebrada Angulito se ha visto sometida a procesos de erosión, deslizamientos y flujos subsuperficiales en los eventos lluviosos de las últimas décadas.

3.1.2 Geomorfología.

La cuenca de la quebrada Angulito presenta varias geoformas principales: las colinas y laderas denudacionales corresponden a la mayoría del área de la cuenca y se caracterizan por presentar elevaciones absolutas inferiores a 100 metros, con crestas y filos puntiagudos, fuertemente disectadas con sectores afectados por **bad-lands** y erosión en cárcavas; se reconoce una segunda geoforma asociada a fenómenos de remoción en masa que se caracteriza por presentar laderas con pendientes moderadas limitadas en la parte superior por escarpes o zonas de pendiente muy alta.

La zona central de pendiente baja corresponde a la zona de cauce aluvial, litológicamente presenta depósitos recientes aluviales con aporte de las corrientes principales así como de los drenajes estacionarios que a ellos confluyen; algunos sectores que presentan terrazas a media ladera y zonas explanadas corresponden a geoformas de origen antrópico (desarrolladas por el hombre).

En la parte superior de la cuenca se identifica una zona alta con topografía suave, generada por la resistencia a la erosión de los materiales geológicos allí presentes (Miembro Finos).

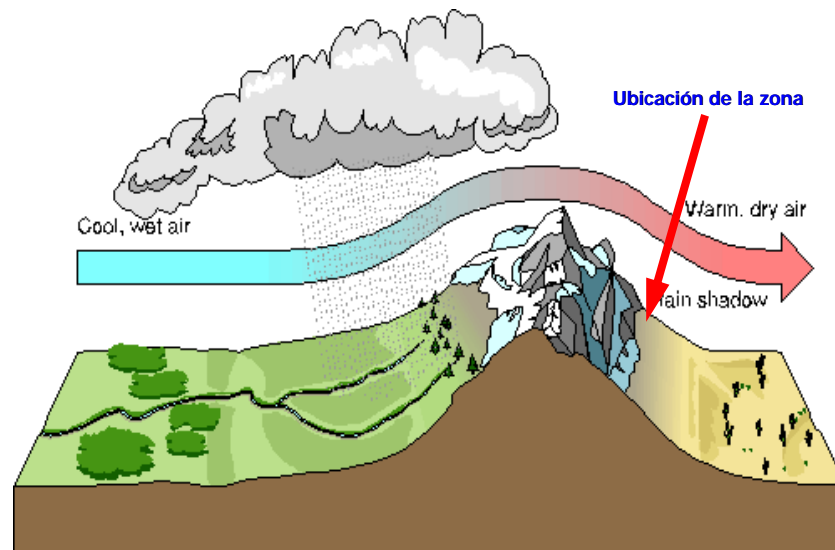
3.1.3 Clima.

El clima en la zona de estudio se encuentra influenciado por una serie de factores que determinan notablemente su comportamiento y su respuesta, ya que se ha observado que son algunos fenómenos locales los que perturban definitivamente la dinámica de los fenómenos globales. Estos factores se encuentran enmarcados dentro de las características orográficas, ubicación de la zona y circulación de frentes climáticos.

3.1.3.1 Orografía. La ubicación de la meseta de Bucaramanga y su morfología propician un ambiente característico en la formación de efectos locales. Tales efectos están relacionados con elementos pertenecientes a las cordilleras oriental y central; su influencia se explica a continuación.

- Cordillera Oriental y Sierra nevada del Cocuy: la meseta de Bucaramanga se encuentra localizada en el piedemonte de la cordillera Oriental, la cual tiene grandes altitudes en los páramos cercanos y en la Sierra Nevada del Cocuy. La presencia de estos elementos da como resultado una cortina o impedimento topográfico para los vientos y frentes nubosos de la Zona de Convergencia Intertropical provenientes del Brasil y para los frentes ciclónicos y frentes fríos provenientes del oeste y del noroeste (véase figura 36). Estos vientos son obstruidos durante algún tiempo por el sistema montañoso, para que luego asciendan hasta sobrepasar la cordillera y así empiecen a intervenir en el clima de la zona. Entre los efectos de la barrera topográfica se encuentran los siguientes.

Figura 36. Efecto orográfico de la cordillera Oriental y la sierra nevada del Cocuy.



Fuente: Geotecnología Ltda.

- Levantamiento orográfico de la ZCI: los clusters nubosos de la zona de convergencia intertropical provenientes del sureste, al chocar contra la cordillera oriental en el piedemonte

llanero, son obligados a ascender, produciendo precipitaciones importantes al lado oriental de la cordillera y bajas precipitaciones sobre el costado occidental.

- Calentamiento de las nubes por el calor irradiado por la superficie de las montañas: el calentamiento de la superficie de las montañas hace que este luego se irradie hacia el aire, provocando movimientos ascendentes de los vientos y precipitaciones convectivas en la zona.

- Modificación de la circulación de los frentes fríos y ciclónicos: la acumulación de clusters nubosos en las laderas del macizo de Santander y la dirección de los vientos producen fluctuaciones en el clima, las cuales pueden provocar precipitaciones intensas y por ende inestabilidad de laderas, inundaciones y avalanchas⁴¹.

- Enfriamiento nocturno de las nubes acumuladas junto a la cordillera: en la noche, las nubes acumuladas en el piedemonte se enfrían, con lo cual aumenta su densidad y, a causa de efectos gravitacionales, se acelera su descenso hacia la superficie de la tierra, provocando que el aire caliente sobre la superficie ascienda y de esta manera se generen precipitaciones intensas. En general, en el área metropolitana de Bucaramanga, los eventos lluviosos de gran intensidad se presentan en horas de la madrugada cuando las nubes aumentan su densidad debido al enfriamiento y se precipitan.

- La altitud del área de Bucaramanga: la altitud de Bucaramanga es de aproximadamente 1000 m.s.n.m. con elevaciones cercanas a los 1200 metros en las mesetas de Lebrija y Ruitoque. La relación de esta altitud con la de los frentes nubosos puede tener gran influencia sobre las precipitaciones.

3.1.3.2 Régimen de lluvias en la zona de Bucaramanga. Según Andressen y Pulwarty⁴², el régimen de lluvias en el nororiente de Colombia y occidente de Venezuela se encuentra

⁴¹ CONSORCIO RÍO DE ORO. Estudio de Estado de Riesgo de los Ssentamientos Humanos en la Ribera del Cauce del Río de Oro en el Sector Compreendido Entre Bahondo y el Café Madrid. Bucaramanga, citado por GEOTECNOLOGÍA. Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen II: Meteorología e Información Hidrológica. Bucaramanga: CDMB, 2005. p. 4.

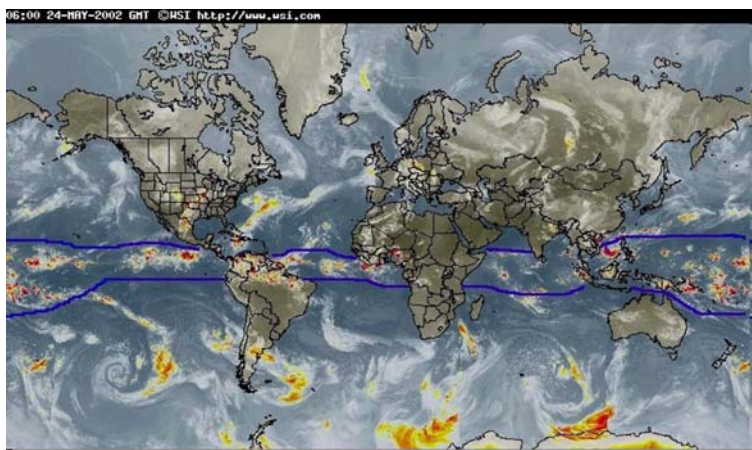
⁴² ANDRESSEN, R. and PULWARTY, R. Analysis of the Exceptional Rains Causing the Vargas Disaster in Venezuela December, 1999. USA: Office Globals programs, 2000, p. 4-25.

controlado por la circulación atmosférica de elementos controladores del clima global, los cuales se mencionan a continuación.

- Zona de Convergencia Intertropical (ZCI): la ZCI ó ITCZ (**Inter Tropical Convergence Zone**) es una franja de bajas presiones ubicada en la zona ecuatorial donde confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste. Debido a las altas temperaturas las masas de aire son forzadas a ascender originando abundante nubosidad y fuertes precipitaciones, algunas acompañadas de descargas eléctricas. La ZCI no es uniforme ni continua, se puede interrumpir, su grosor variar de un sitio a otro y su comportamiento cambiar en zonas marítimas y continentales.

La zona de convergencia intertropical (ZCI) es uno de los sistemas meteorológicos más importantes que actúan en los trópicos. Debido a su estructura física, la ZCI se ha mostrado decisiva en la caracterización de las diferentes condiciones de tiempo y de clima en diversas áreas de la Región Tropical. La ZCI está insertada en una región donde ocurre la interacción de características marcantes atmosféricas y oceánicas: zona de confluencia de los Alisios (ZCA); zona de la depresión ecuatorial; zona de máxima temperatura de la superficie del mar; zona de máxima convergencia de masa; y zona de banda de máxima cobertura de nubes convectivas, todas interactuando próximas a la franja ecuatorial (véase figura 37).

Figura 37. Ubicación de la ZCI.



Fuente: Fundación Cearecense de Meteorología y Recursos Naturales, Brasil.

A pesar de esa interacción, las características no se presentan necesariamente al mismo tiempo sobre la misma latitud. Durante los meses de verano en el Hemisferio Norte, la zona de confluencia de los alisios aparece sobre la depresión ecuatorial y las regiones de máxima cobertura de nubes, precipitaciones y convergencia de masa son casi coincidentes, localizándose aproximadamente a tres grados al sur de la ZCA. En los meses de Diciembre, Enero y Febrero, la zona de máxima cobertura de nubes, precipitaciones y convergencia de masa se localiza al norte de la ZCA⁴³.

- Sistemas de alta presión: fundamentalmente consiste en la divergencia de los vientos desde un centro de presión alta hacia sus bordes exteriores, se mueve en sentido de las agujas del reloj. Es característico encontrar en estos sistemas grandes áreas sin nubosidad, dadas por un flujo en subsidencia desde los niveles altos de la atmósfera hacia la superficie, el cual se opone a que el aire ascienda, impidiendo así que se formen nubes. Además, la presión atmosférica es mayor en su centro y menor en sus bordes, dado por el efecto de convergencia en la parte superior, lo que produce ausencia de nubes y buen tiempo.

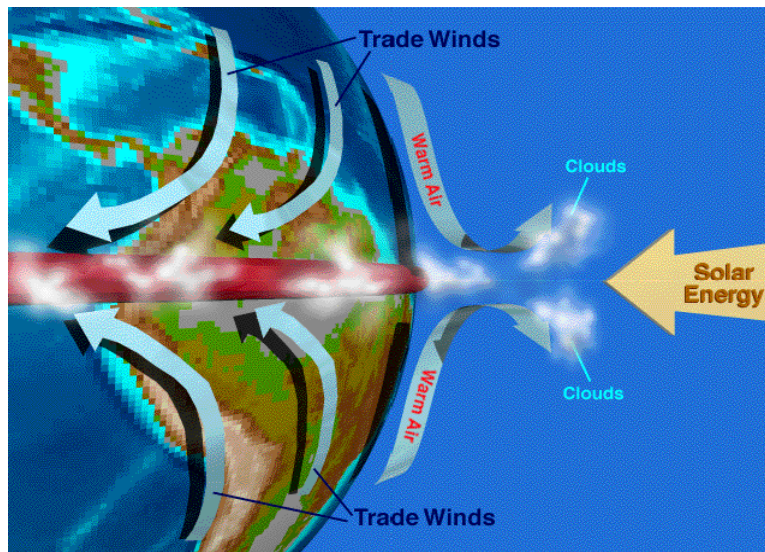
- Sistemas de baja presión (Ciclones y huracanes): a diferencia de los sistemas de alta presión, el sistema de baja presión está relacionado con mal tiempo, ya que estos, al interactuar con la ZCI, forman áreas de alta nubosidad, precipitaciones por flujo de aire ascendente e inestabilidad en la atmósfera. Consiste en un área de circulación de vientos girando en sentido contrario a las agujas del reloj, convergiendo hacia un centro de baja presiones. Usualmente se les conoce como ciclones y pueden provocar condiciones atmosféricas externas.

Los huracanes son fenómenos o ciclones de gran magnitud con un efecto mundial sobre las corrientes de vientos y frentes nubosos. Estos se mueven en dirección este-oeste y sus colas con frecuencia cubren zonas en Colombia, generando precipitaciones de gran magnitud en la zona del magdalena y el piedemonte de la cordillera oriental.

⁴³ SILVEIRA, N. Zona de Convergencia Intertropical [en línea]. [Brasil]: Fundación Cearense de Meteorología y Recursos Hídricos (FUNCEME), 2000. Disponible en Internet: <http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/caracna2.htm>. p. 1.

3.1.3.3 Clima en la zona de Bucaramanga de Abril a Noviembre. El clima en Colombia está controlado básicamente por el desplazamiento gradual del sistema de altas presiones hacia el Atlántico norte y la influencia directa en el control del clima por la ZCI. A causa de esto, se genera entonces una franja de alta actividad convectiva con formación de clusters nubosos, lo que determina la temporada lluviosa (véase figura 38).

Figura 38. Interacción de la ZCI con elementos controladores del clima en Colombia.



Fuente: Fundación Cearecense de Meteorología y Recursos Naturales, Brasil.

- Desplazamiento de la ZCI: la ZCI tiene la particularidad de desplazarse detrás del ecuador real, es decir, sigue la zona donde los rayos solares caen perpendicularmente, lo que indica que se mueve hacia el hemisferio de verano. La ZCI es muy importante sobre el país ya que marca el periodo lluvioso sobre todo el territorio. A mediados de Mayo, el desplazamiento al norte del anticiclón del Atlántico permite el avance de la ZCI, estableciéndose sobre todo el territorio colombiano y venezolano⁴⁴.

El periodo lluvioso en Colombia finaliza en Noviembre con el retiro progresivo de la ZCI al sur, fuera del territorio Colombiano y el aumento de la influencia del anticiclón del Atlántico

⁴⁴ LAROCCA, S. Zona de Convergencia Intertropical [en línea]. [Venezuela]: Instituto Meteorológico de Venezuela, 2000. Disponible en Internet: <<http://www.immeteoven.org/index.html>>. p. 1.

sobre el país, lo que origina el inicio del periodo seco, el cual se extiende hasta el mes de Abril.

La ZCI alcanza su posición más al norte (8° N) durante el mes de Octubre, y su posición más al sur (1° N) durante el mes de Abril. Además de esa oscilación anual, la ZCI presenta oscilaciones con mayores frecuencias, pudiendo variar estos períodos en semanas o días⁴⁵.

En ocasiones las vaguadas, frentes fríos y el paso de perturbaciones tropicales (ondas, depresiones, tormentas ó huracanes) sobre el caribe pueden reforzar la ZCI, produciendo precipitaciones extraordinarias por el fenómeno de convergencia en el área de Bucaramanga.

- Clusters de nubes en la Zona de Convergencia Intertropical: según Smith, las precipitaciones en las zonas tropicales son el efecto del paso de clusters o grupos de nubes asociados a la ZCI. El paso principal de estos clusters se encuentra sobre las áreas centrales de Colombia y Brasil⁴⁶. El comportamiento de las precipitaciones en la zona de Bucaramanga se relaciona con el paso de estos clusters de nubes tropicales de la ZCI, presentándose lluvias importantes en los meses de Abril a Junio y de Septiembre a Noviembre. Durante los meses de Diciembre a Febrero es muy limitada la presencia de clusters tropicales.

- Régimen bi-modal: el régimen de lluvias depende de la dinámica que presenta la ZCI a lo largo del año, por lo que varía en las latitudes que comprenden al país. En el sur del país la ZCI permanece casi todo el año, pero el centro y norte de Colombia tiene un régimen bimodal con dos máximos de precipitación, uno de Abril a Mayo y otro de Octubre a Noviembre, siendo mayor el segundo.

Además del movimiento de la ZCI, el clima en Colombia está afectado por el océano Atlántico tropical y el Pacífico oriental. La diferencia en las temperaturas entre los océanos

⁴⁵ GEOTECNOLOGÍA, Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen II: Meteorología e Información Hidrológica, Op. cit., p. 8.

⁴⁶ SMITH, J. Precipitation Handbook of Hydrology, cited by, Ibid., p. 8.

provoca una tendencia a que ocurran excesos de lluvia sobre una gran parte de Centroamérica y el Caribe. Su explicación radica en que las temperaturas desiguales de los dos océanos hacen que el periodo lluvioso en Centroamérica y el Caribe finalicen más tarde (alrededor de Diciembre).

3.1.3.4 Clima en la zona de Bucaramanga de Diciembre a Marzo. Colombia se encuentra influenciada por la hondonada intertropical de bajas presiones ecuatoriales, donde convergen los vientos alisios del noreste y del sureste. Desde Diciembre hasta Marzo, el flujo de aire superficial está constituido por el alisio del NE del hemisferio norte, el cual extiende su influencia desde los 30°N (centro de la alta presión subtropical) hasta los 2°N de latitud. En esta zona converge la corriente de aire del hemisferio sur (Alisio del SE), dando lugar a la Zona de la Convergencia Intertropical (ZCI). Como resultado de esto, en la temporada de Diciembre hasta Marzo, el norte de Colombia y el Occidente de Venezuela están afectados principalmente por la zona del alisio del noreste, donde se produce el descenso de las masas de aire que origina fuertes inversiones de temperatura a alturas de 1500 a 2000 m.s.n.m. (inversiones del alisio). Por encima de esa altura el aire carece por completo de humedad, por lo que el proceso convectivo de formación de nubes se ve muy limitado, produciendo así la temporada seca en Colombia durante los tres meses del año. Este efecto es mucho más fuerte en el costado Este de la cordillera Oriental de Colombia (Piedemonte Llanero) que en el costado Oeste (montañas de Santander y Norte de Santander).

Estudios realizados por Gómez y Vélez (1990)⁴⁷ confirman que para el periodo Junio a Agosto y de Diciembre a Febrero, existe una relación directa entre precipitaciones y deslizamientos en la terraza de Bucaramanga, ya que al correlacionar lluvias, deslizamientos y niveles piezométricos, encontraron que la mayor parte de los eventos de remoción en masa históricamente registrados ocurren con los periodos secos en la zona, tal como ocurrió en el evento de Febrero de 2005.

⁴⁷ GÓMEZ, I. y VÉLEZ, O. Predicción de las Fluctuaciones de los Niveles Freáticos a Partir de Precipitaciones y su Influencia en la Estabilidad de los Taludes en la Meseta de Bucaramanga. Medellín: Sociedad Colombiana de Geología, 1990. p. 20.

- Frentes fríos del nor-oeste: el clima en estos tres meses es normalmente seco, pero la región andina de Colombia se ve afectada con frecuencia por perturbaciones extraordinarias tropicales, en especial los efectos causados por los movimientos de los frentes fríos, los cuales provocan precipitaciones en este periodo. Estas precipitaciones de carácter excepcional tienen relación con fenómenos meteorológicos originados en las zonas templadas, perturbaciones atmosféricas que influyen en su travesía desde el norte, en la zona del mar Caribe y, finalmente, en Colombia y Venezuela.

Habitualmente son masas de aire frío provenientes del norte, las cuales cubren en el invierno parte de Norteamérica. Los frentes fríos generalmente se originan en el polo norte y se mueven en dirección Nor-oeste a Sur-este. Son zonas de discontinuidad que separan dos masas de aire con características físicas distintas, una masa fría desplaza a otra caliente, generando una franja de nubosidad y mal tiempo. Normalmente ocurren en los meses de Diciembre a Febrero. Estas masas frías forman ondulaciones barométricas con las masas tropicales del mar Caribe, transformándose en depresiones atmosféricas (zonas de baja presión y mal tiempo) bien desarrolladas que se mueven hacia el Atlántico y el Caribe. Estos frentes fríos generan una serie de fenómenos, explicados a continuación, que tienen relación directa con los eventos ocurridos en Febrero de 2005.

- Intercepción de los frentes fríos por la cordillera oriental: los frentes fríos generalmente son de poca altitud, debido a esto, al chocar contra la cordillera oriental estos son interceptados por el piedemonte y se estacionan en el sector durante varios días. Al encontrarse estos con clusters de nubes provenientes de la zona de convergencia intertropical, se da origen a nubes convectivas con precipitaciones en forma de aguaceros. El aire frío es más denso que el aire caliente, por lo que al llegar el frente frío el aire caliente es forzado a levantarse. En este proceso de movimiento se producen cantidades importantes de lluvia concentrada dependiente de los volúmenes de nubosidad presentes tanto en el frente frío como en el cálido.

La intensidad del fenómeno depende de la intensidad del frente frío y de la presencia o no de clusters de nubes de la ZCI. Cuando la intensidad del frente frío es muy fuerte y coincidentalmente se presenta el paso de volúmenes grandes de clusters de nubes tropicales, si se presenta una colisión o convergencia de los dos fenómenos, se puede

formar una vaguada estacionaria. Esta coincidencia fue la que marcó el evento de Febrero de 2005 debido a la potencia del frente frío que provenía del norte, que fue uno de los más lluviosos y fuertes de la historia tanto en Texas como en California⁴⁸.

- Formación de vaguadas: las vaguadas son ondulaciones en el flujo de aire frío, las cuales generan gran nubosidad y precipitaciones por el desplazamiento de ida y vuelta y circulación en los trópicos. Se presenta como una zona de depresión barométrica que penetra entre dos zonas de alta presión. Generando alteraciones en el clima y precipitaciones muy intensas.

En las vaguadas que se presentan a la llegada de frentes fríos en el nor-este de Colombia, los vientos giran en dirección contraria a las manecillas del reloj y, al recostarse contra la cordillera, se presentan precipitaciones de mediana intensidad pero de larga duración.

Información satelital confirma que las vaguadas son fenómeno regionales que se ubican sobre zonas de media altitud (hasta 1000 m.s.n.m.), cercanas al piedemonte, en el sector nor-occidental de la cordillera oriental de Colombia, y la cadena montañosa de los andes venezolanos.

3.2 ANTECEDENTES

El área del municipio de Girón ha sido históricamente afectada por fenómenos lluviosos extremos e intensos, generando inundaciones, flujos de lodo, flujos de detritos y avalanchas. Según las fuentes consultadas, estos eventos se han presentado en la mayoría de los casos en periodos esperados de lluvia, al contrario de lo ocurrido en Febrero de 2005. Este evento está relacionado con la formación de las vaguadas y la coincidencia de la presencia de clusters nubosos, no característicos en esta temporada, y vientos provenientes del nor-este y sur-este, junto con los aspectos influyentes en la formación del clima regional. A continuación se explican los mayores eventos lluviosos registrados.

⁴⁸ GEOTECNOLOGÍA, Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen II: Meteorología e Información Hidrológica, Op. cit., p. 20.

3.2.1 Evento 19 de Octubre de 1931.

Los registros para este evento no son muy técnicos, solamente se muestran escritos de un historiador que narra, a manera de crónica, lo sucedido aquel día de Octubre. Cabe resaltar que la causa de inundación fueron unos aguaceros torrenciales y la posterior respuesta del río de Oro, río Frío y quebrada de las Nieves.

3.2.2 Evento 14 de Octubre de 1973.

El 14 de Octubre de 1973 ocurrió en la cuenca del río de Oro uno de los eventos más grandes de lluvias de la historia de Girón. Según los documentos consultados, se registran características similares a las de Febrero de 2005. Los aspectos más importantes fueron: la cota de inundación frente al Malecón actual fue muy similar a la de 2005, no se reportó una creciente grande en el río Frío ni en la quebrada Las Nieves, el agua chocó en el momento del pico máximo contra la estructura del puente El Palenque. El evento máximo ocurrió entre las 5 y 8 de la mañana con intensidad de precipitación máxima de 27.3 mm/h. Posteriormente al evento se realizaron obras de dragado, rectificación y desvío del río Frío frente al barrio El Poblado. No se tienen datos que registren niveles en la quebrada Angulito.

3.2.3 Evento 28 de Enero de 1998.

El 28 de Enero de 1998 ocurrió un evento lluvioso extraordinario con especial intensidad en el área de Bucaramanga. Las cotas de inundación fueron menores que las registradas en Febrero de 2005, pero la inundación produjo más de 3000 damnificados. La medición del IDEAM en Piedecuesta alcanzó 133.5 milímetros en 24 horas, superando la registrada en Abril de 1886 que llegó a 113 milímetros. Las aguas del río de Oro sobrepasaron las estructuras del puente Lenguerke y la inundación cobijó igualmente al malecón turístico de Girón. No se tiene información alguna sobre la quebrada Angulito.

3.3 EVENTO DEL 7 AL 12 DE FEBRERO DE 2005

En el periodo comprendido por estos días tuvieron lugar las precipitaciones intensas que desataron una catástrofe en el municipio de Girón y el área metropolitana de Bucaramanga, a

causa del desbordamiento de Río de Oro y los flujos de lodos y detritos generados provenientes principalmente de la quebrada Angulito y Valdivieso.

Este fenómeno climático es atribuido a los frentes fríos que llegaron hasta Colombia cargados de gran nubosidad y que coincidieron con el paso de clusters nubosos de la ZCI, los cuales son muy escasos en los meses secos de Diciembre a Febrero. Es común encontrar que los eventos catastróficos que se presentan en el trópico están relacionados con el paso de los clusters de nubes de la ZCI y su interacción con otros fenómenos meteorológicos.

Es importante resaltar que los flujos de lodos y detritos fueron desatados debido a que las lluvias del 8 y 9 de Febrero saturaron los perfiles subsuperficiales de suelo, para que luego las lluvias de los días 11 y 12 terminaran por generar la inestabilidad de las laderas del sector oeste de la margen del Río de Oro (véase figura 39).

Figura 39. Deslizamientos presentados en la Cuenca de la quebrada Angulito que generaron los flujos. Vista aérea y vista desde la parte alta de la cuenca.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

De acuerdo a la información recopilada y presentada por el IDEAM, la descripción del evento es la siguiente:

3.3.1 7 de Febrero 2005.

El frente frío llegó a la cordillera Oriental de Colombia y los Andes Venezolanos temprano el día 7 de Febrero. Se presentaron precipitaciones considerables de carácter aislado en Santander y el Norte de Santander, las cuales no se visualizaban en las imágenes de satélite.

El centro de baja presión se localizaba hacia el norte de la isla de Puerto Rico en el océano Atlántico. Las precipitaciones más importantes ocurrían en Norte de Santander y en Venezuela. Las precipitaciones medidas el 7 de Febrero de 2005 se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos precipitación registrados por el IDEAM 7-02-2005.

Estación	Precipitación el 7/02/2005 (mm)
Bucaramanga	45.0
Palogordo (Girón)	80.0
Llanogrande (Girón)	51.0

Fuente: IDEAM.

3.3.2 8 de Febrero 2005.

El frente frío se mantuvo estacionario y al mismo tiempo aparecían grupos de clusters tropicales de la ZCI, los cuales, al encontrarse con el frente frío que se localizaba paralelo a la cordillera, se integraban formando una vaguada a lo largo de la cordillera. El centro de baja presión se movió ligeramente hacia el sureste.

La formación de la vaguada a lo largo del Piedemonte occidental de la cordillera Oriental de Colombia y de los Andes Venezolanos generó lluvias muy importantes, especialmente en el sector de Bucaramanga y de Cúcuta. Las precipitaciones medidas el 8 de Febrero fueron las siguientes (véase tabla 4).

Tabla 4. Datos precipitación registrados por el IDEAM 8-02-2005.

Estación	Precipitación el 8/02/2005 (mm)
Bucaramanga	40.1
Palogordo (Girón)	150.0
Llanogrande (Girón)	182.0

Fuente: IDEAM.

3.3.3 9 de Febrero 2005.

El frente frío y la vaguada se movieron hacia el Este en el sector de Venezuela y el centro de baja presión se situó más al norte. Sin embargo, en el sector de Colombia se mantuvo la vaguada en el costado Oeste de la cordillera Oriental sobre el sector de Bucaramanga. En las imágenes de satélite se pueden observar las lluvias en este sector. Llovió el día 9 toda la mañana con baja intensidad sobre la zona, cesando en las horas de la tarde. Los promedios presentados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Datos precipitación registrados por el IDEAM 9-02-2005.

Estación	Precipitación el 9/02/2005 (mm)
Bucaramanga	10.5
Palogordo	15.0

Fuente: IDEAM.

3.3.4 10 de Febrero 2005.

En la mañana del 10 de Febrero aumentó la cantidad de clusters tropicales en la Amazonía y la humedad de la zona de convergencia intertropical se acercó a la cordillera Oriental. El frente frío se había localizado hacia el costado Este de la cordillera y se había acostado hacia el sur de Caracas. En la noche del 10 de Febrero empezaron a producirse lluvias en los límites entre Santander y Boyacá. La vaguada no tenía un eje muy bien definido. En las horas de la noche del 10 de Febrero la vaguada se fue localizando más al oeste. Las precipitaciones medidas el 10 de Febrero están a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Datos precipitación registrados por el IDEAM 10-02-2005.

Estación	Precipitación el 10/02/2005(mm)
Bucaramanga	24.0
Palogordo (Girón)	30.0
Llanogrande (Girón)	12.6

Fuente: IDEAM.

3.3.5 11 y 12 de Febrero 2005.

En Febrero 11 de 2005 las imágenes de satélite muestran una nueva vaguada correspondiente a una segunda ola del frente frío al oeste de la cordillera oriental. La primera vaguada se había disipado y aparecía una segunda muy clara desde Ecuador hasta el lago de Maracaibo. En la mañana del 11 de Febrero llovió especialmente en Santander. A las 4 p.m. del 11 de Febrero la nueva vaguada se había formado y estaba siendo alimentada por una gran cantidad de clusters tropicales provenientes de la zona de convergencia intertropical (ZCI). Al mismo tiempo llegaba una tercera ola del frente frío. La imagen de satélite de las 4:45 p.m. del 11 de Febrero mostraba un cuadro bastante crítico para lo que iba a acontecer esa noche. A las 9:45 p.m. el cuadro era aún peor debido a que el aporte de la zona de convergencia intertropical era muy grande. La vaguada relacionada con la tercera ola del frente frío y los aportes cuantiosos de humedad de la zona de convergencia intertropical actuaron en la madrugada del 12 de Febrero en forma muy intensa sobre la zona de Bucaramanga y sobre el oeste de Venezuela (véase figura 40).

Figura 40. Imagen satelital de nubosidad 12 de Febrero 2005, 4:20am.



Fuente: The Weather Channel.

La vaguada aparentemente tenía dos ejes, uno alineado Bucaramanga – Cúcuta (tercera ola) y otro sobre los Llanos Orientales al oriente de Villavicencio (segunda ola), las intensidades de las lluvias fueron cuantiosas. El evento activó deslizamientos en la cuenca de la quebrada Angulito que, en conjunto con el agua de escorrentía, generó flujos de detritos de gran caudal. Los mayores valores se presentaron, según testigos, en las horas de la madrugada del día 12 de Febrero. Las precipitaciones medidas el 11 de Febrero fueron las siguientes (véase tabla 7).

Tabla 7. Datos precipitación registrados por el IDEAM 11-02-2005.

Estación	Precipitación el 11/02/2005(mm)
Bucaramanga (IDEAM)	93.3
Llanogrande (Girón)	170.0
Palogordo (Girón)	125.0

Fuente: IDEAM.

3.3.6 12 y 13 de Febrero 2005.

El 12 de Febrero llovió en las horas de la mañana y finalmente retornaron las condiciones normales de clima en las horas de la tarde. La imagen de satélite del día 13 de Febrero muestra la desaparición de la vaguada. El frente comenzó a alejarse definitivamente hacia el

extremo oriental de Venezuela y las Antillas Menores pero con muy poca nubosidad. Las precipitaciones medidas el 12 de Febrero fueron las siguientes (véase tabla 8).

Tabla 8 Datos precipitación registrados por el IDEAM 12-02-2005.

Estación	Precipitación el 12/02/2005(mm)
Bucaramanga	19.9
Llanogrande (Girón)	0.0
Palogordo (Girón)	5.0

Fuente: IDEAM.

3.3.7 Relación entre la precipitación y los deslizamientos en la cuenca.

Los deslizamientos ocurridos en la cuenca de la quebrada Angulito afectaron principalmente la capa superficial de los taludes que, como se ha dicho anteriormente, está desarrollada en el miembro Órganos nivel superior, con poca vegetación de raíz profunda. Al inicio del evento de lluvia del 8 de Febrero, la alta permeabilidad permitió la rápida infiltración y la circulación del agua hasta una interfase entre 0.5m y 1m de profundidad, en donde se estableció un flujo subsuperficial en el sentido de la pendiente que fue saturando la capa superior del suelo. Producto de esta saturación comenzó a presentarse el fenómeno de la dispersión entre partículas. La escorrentía superficial formada por el agua que se precipita localmente y el flujo subsuperficial que retorna a la superficie arrastraron el material disgregado por el efecto de la dispersión. El agua acumulada en la parte superior del terreno y la que forma el flujo subsuperficial, generaron presiones neutras y disminuyeron la resistencia al corte del suelo en ese nivel. Con la duración de la lluvia, el nivel del agua de escorrentía subsuperficial aumentó y la zona donde la capa está totalmente saturada perdió completamente la cohesión (arrastre de partículas finas del material a causa de la dispersión) desestabilizando así grandes áreas pertenecientes no solo a la cuenca de la quebrada Angulito sino a cuencas vecinas.

3.4 ESTUDIOS DE FENÓMENOS SIMILARES

El evento ocurrido en Febrero de 2005 puede relacionarse con otros eventos de similar magnitud debido a la forma inesperada en que se presentaron, a las condiciones meteorológicas, a los sucesos desatados por las precipitaciones y las pérdidas cuantiosas que han dejado.

3.4.1 Estado de Vargas, Venezuela, Diciembre de 1999.

En Diciembre de 1999, se produjeron lluvias torrenciales en el estado Vargas, Venezuela. Estas generaron una catástrofe con unos 15000 desaparecidos, unos 3500 millones de dólares de pérdidas, así como la destrucción de más de 15000 viviendas y unos 75000 damnificados.

La región está caracterizada por presentar un clima de tipo semiárido, con una precipitación media anual entre 500 y 600mm, altas temperaturas (temperatura media anual de 26.2°C), baja nubosidad, alta insolación y vientos dominantes del este con velocidades bajas entre 1.6 y 2.8m/s. El período húmedo (meses con más de 50mm) comprende los meses de Junio a Diciembre. El resto del año son meses más secos.

Las características geológicas, la estratigrafía y litología del área han jugado un papel muy importante en los procesos de meteorización. Estos procesos han venido desmejorando el sustrato rocoso, causando por lo tanto mayor potencial de desprendimiento de volúmenes extraordinarios de materiales. La petrografía está constituida por rocas ígneas ácidas intrusitas, rocas ígneas básicas metamorfozadas y rocas ultrabásicas metamorfozadas.

Un informe del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela señala que tres factores meteorológicos jugaron un papel importante en el evento ocurrido en Vargas: el desplazamiento de una línea nubosa producto de un sistema frontal sobre el área norte costera del país, una difluencia en la altura producto de una dorsal anticiclónica que ayudó al ascenso del aire, y el relieve (la sierra del Litoral de la cordillera de la Costa), que obligó al aire húmedo a ascender.

Las precipitaciones registradas en la zona presentan un promedio anual de 510 milímetros durante los últimos cuarenta años. En el año 1999 se multiplicaron de manera significativa alcanzando 1910mm. En los meses de Noviembre y Diciembre se produjeron altas precipitaciones con 15 días de lluvias torrenciales continuas desde finales de Noviembre, hasta alcanzar 911mm en 3 días. Durante un periodo muy corto se tuvieron lluvias de gran magnitud y en particular, el día 15 de Diciembre en la noche se acumularon más de 72mm.

En la noche del 15 al 16 de Diciembre de 1999 la acción de las lluvias transformó pequeños riachuelos en ríos de gran caudal. Las elevadas pendientes (mayores a 30°), en conjunto con la saturación del suelo producto de las lluvias, desestabilizaron los suelos y generaron numerosos movimientos en masa que a su vez causaron el desprendimiento de la capa vegetal, el arrastre de sedimentos y la formación de flujos de lodos, materiales vegetales y troncos en un flujo que fue aumentando en densidad hasta ser capaz de transportar rocas de gran magnitud (véase figura 41). Los flujos presentados fueron desde flujos de agua hasta flujos hiperconcentrados y de detritos.

Figura 41. Rocas arrastradas por los flujos, Vargas, Venezuela.



Fuente: U.S. Geological Survey

El evento destruyó edificaciones y todo tipo de infraestructura, produjo pérdida de la capa vegetal en zonas montañosas, cambió la geografía, desapareció playas y modificó el frente costero y produjo severos daños en asentamientos urbanos⁴⁹.

El evento fue de carácter extraordinario y único a escala mundial, en lo que se refiere a erosión, transporte y deposición de materiales por procesos fluviales. Los aludes torrenciales modificaron significativamente la línea de costa del litoral central en una franja de 50km aproximadamente, depositando un estimado de 20 millones de metros cúbicos en los conos de deyección de las quebradas. Una estimación del período de retorno para

⁴⁹ GENTIAOS, C y LAFUENTE, M. Lluvias Torrenciales en Vargas Venezuela en Diciembre de 1999. Protección Ambiental y Recuperación Urbana. Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2000. p. 3-4.

las lluvias máximas de 24 horas lo ubica en el orden de 500 años. Esto demuestra el enorme potencial de daño del evento ocurrido y evidencia el significativo daño generado.

El evento ocurrido en Diciembre de 2005 en el estado de Vargas, Venezuela, presentó características muy similares a aquellas del evento de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, municipio de Girón, Colombia. Aunque ambos eventos fueron activados por lluvias torrenciales muy por encima de las medias normalmente encontradas, es notable que la catástrofe de Vargas fue de una mayor magnitud. Sin embargo, es posible aseverar que la principal causa de las catástrofes es la misma tanto en Colombia como en Venezuela: la imprudencia del hombre ante los fenómenos naturales. Tanto en el estado de Vargas como en el municipio de Girón se permitió la instalación y construcción de asentamientos humanos en conos de deyección donde existe inminente peligro de formación de flujos de lodos y detritos a causa del transporte de sedimentos de la parte alta de la montaña. Esto que terminó por ocasionar la destrucción total o parcial de las viviendas allí localizadas y causar la muerte a varias personas.

3.4.2 Eventos en Colombia.

En la mayoría de los casos la relación entre precipitación y deslizamientos es directa y casi inmediata. En Septiembre de 1990, en San Carlos, Antioquia, una precipitación excepcionalmente intensa de 232mm en 3 horas, de los cuales 200mm cayeron en las primeras 2 horas, desencadenó más de 100 deslizamientos en un área de menos de 1Km². Un fenómeno similar se presentó en la serranía Motilón – Bari, Norte de Santander, en Agosto de 1991, cuando una precipitación de la misma naturaleza generó 500 deslizamientos aproximadamente en un área de 20Km². Este mismo tipo de evento se ha presentado en Envigado (Antioquia) y Marsella (Risaralda).

Como se observa, el panorama en nuestro país ha estado enmarcado en procesos de catástrofes debido a la inclemencia del clima, casi siempre por la influencia de lluvias intensas extraordinarias y eventos no característicos para la temporada en que se presentan. Por eso es importante tener en cuenta estas experiencias para realizar estudios de vulnerabilidad de laderas ante la presencia de cualquiera de las formas en las que se puede desatar un movimiento en masa.

4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Antes de desarrollar cualquier tipo de análisis es necesario entrar a estudiar las características del material presente en el sector, así como del fenómeno ocurrido. Se debe desarrollar una caracterización topográfica, geotécnica e hidrológica que lleve al entendimiento del desarrollo del evento y de los diferentes factores que tuvieron influencia en él.

Con este fin son necesarios tanto la recopilación de información existente como el desarrollo de diversos ensayos en laboratorio y en campo. Una vez obtenidos y analizados los resultados será posible llegar a comprender las causas que dieron origen a los flujos de lodo y detritos presentados en el municipio de Girón, departamento de Santander.

4.1 TOPOGRAFÍA

La topografía del sector entra a jugar un rol importante en el desarrollo del evento. El tipo de fenómeno presentado en la cuenca de la quebrada Angulito se ve fuertemente influenciado por la caracterización topográfica de la cuenca.

Es importante encontrar alguna manera de analizar la forma en que este fenómeno se ve influenciado por la caracterización topográfica de la zona, para lo que se optó por el desarrollo de un modelo digital de elevación (MDE) en formato raster.

En primera instancia se deben obtener los datos topográficos de la zona, para lo que se acudió al Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se procedió a digitalizar planos topográficos a escala 1:2000 con curvas de nivel cada 2 metros.

Tanto la pendiente del terreno como la forma y geometría dada por la topografía al cauce de la quebrada pueden alterar en gran medida el comportamiento de los flujos de lodo y detritos. Igualmente, uno de los factores que aumentó la susceptibilidad a deslizamientos

en la cuenca de la quebrada Angulito fue, entre otros, la elevada pendiente presentada en los taludes de la zona que fallaron al saturarse.

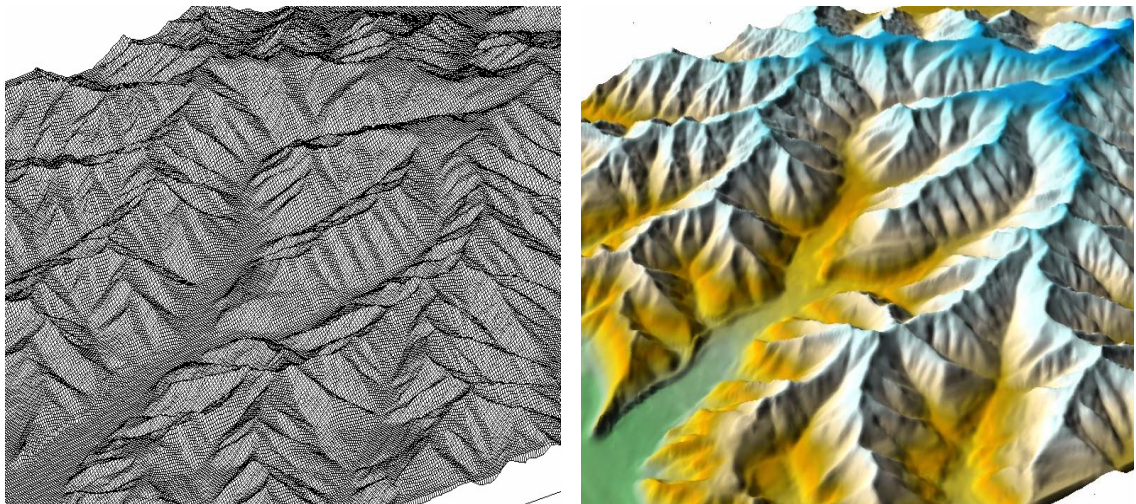
Una vez digitalizada la información topográfica del terreno se procedió al desarrollo del modelo digital de elevación en base a un sistema raster utilizando el programa Surfer V.8 (Golden Software).

4.1.1 Desarrollo del modelo digital de elevación.

Un modelo digital de elevación hace relación a una manera de representar el terreno de manera numérica mediante una serie de puntos con una elevación correspondiente. Puede entenderse igualmente como una simplificación de la geometría del terreno que facilita las simulaciones y el trabajo general con éste.

Un modelo digital de elevación se encuentra generalmente formado por una serie de puntos georeferenciados mediante coordenadas "X" y "Y", a los cuales se les asigna un valor adicional de elevación conocido como "Z". La implementación de estos modelos hace más factible el uso de herramientas computacionales que facilitan una representación del terreno más agradable para el usuario, tal como es el caso de representaciones en 3D del terreno mediante mallas o superficies (véase figura 42).

Figura 42. Representación del modelo digital de elevación del terreno mediante malla (izquierda) y superficie (derecha).



Fuente: Archivo digital investigación.

Con el fin de facilitar el desarrollo de los modelos que serán realizados con posterioridad, el modelo digital de elevación del terreno en la cuenca de la quebrada Angulito se desarrolla como un modelo raster.

Un modelo raster es un método para el almacenamiento, visualización y procesamiento de datos geográficos, entre otros. En este caso el terreno se divide en filas y columnas formando un arreglo a manera de matriz de forma regular. Cada una de las celdas de esta rejilla guarda su localización en el arreglo al igual que un valor adjunto, que en este caso hace referencia a su elevación. La locación de las celdas en un sistema raster se encuentra de manera implícita, dependiendo directamente del orden que ocupen en la rejilla.

Uno de los factores de mayor importancia en un modelo de este tipo es la selección del tamaño de las celdas. Este debe encontrarse de acuerdo a la información que se encuentra disponible. En este caso se seleccionó un tamaño de celda de 5x5 metros debido a que se posee suficiente información topográfica y se requiere de una densidad de información suficiente en el modelo raster para permitir el desarrollo de los demás modelos planteados.

Se debe entender que el valor adjunto a cada celda no está necesariamente relacionado a su altura, sino que puede referenciar diversas características, tales como permeabilidad, resistencia, saturación, entre muchas otras. Es así que un sistema raster puede ser utilizado con muchos objetivos no relacionados a las representaciones de terrenos, por lo que se muestra muy útil para la implementación en diversos campos.

Un arreglo raster trabaja de manera similar a una matriz, con filas y columnas y un valor adjunto a cada celda. De esta manera el espacio en el cual se trabajan deja de representarse como continuo y entra a ser modelado mediante un sistema discreto. Esto brinda una mayor facilidad para la realización de cálculos sobre los planos o incluso la superposición u operaciones entre los mismos.

Para obtener un sistema raster a partir de planos digitalizados del terreno se hace necesaria la implementación de alguna metodología para encontrar el valor de cada una de las celdas que compone el arreglo. De esta forma, a partir de los datos dados por las curvas de nivel, se debe encontrar el valor correspondiente de cada celda de la matriz.

Los planos digitalizados del terreno consisten generalmente de una serie de curvas de nivel representadas mediante segmentos de líneas, donde el final de cada uno corresponde al inicio del siguiente. Así, cada curva de nivel se encontrará compuesta de la unión mediante segmentos de recta de una serie de puntos con coordenadas “X” y “Y” y con un mismo valor de elevación “Z”. Las coordenadas de dichos puntos, al igual que su elevación, pueden ser extraídos del plano digital, lo que brinda la información necesaria para la generación del modelo raster.

En el caso del plano digital en formato AutoCad 2000 desarrollado del sector de la cuenca de la quebrada Angulito con curvas de nivel cada dos metros, se extrajeron un total de aproximadamente 700000 puntos con coordenadas este, norte y elevación. Estos valores fueron extraídos del plano digital mediante la utilización del programa SPELL-Map V.1.0.0.31 B, software desarrollado por el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) de la Universidad Industrial de Santander.

A partir de dicha información es posible interpolar los valores de elevación de las celdas que componen la grilla del sistema raster. Existen diversos métodos que cumplen con este mismo objetivo, pero no todos lo hacen brindando el mismo grado de similitud a los datos originales debido a que cada uno realiza una interpretación diferente de los datos fuente. Es importante seleccionar el método que permita obtener resultados más acordes con la realidad encontrada, por lo que se hace necesario establecer un sistema de selección tanto del método a utilizar como de los parámetros implicados con éste.

4.1.2 Selección del método y las variables para la generación de la grilla.

El software implementado para la generación del sistema raster fue Surfer V.8. Dicho programa posee diversas metodologías para la generación de grillas a partir de datos de localización y elevación. Dentro de los más frecuentemente utilizados se encuentran el método Kriging y el método **Radial Basis Function**. Ambos métodos son flexibles y

brindan resultados muy similares, bastante acordes con los datos de entrada; sin embargo estos pueden tornarse un poco lentos cuando la cantidad de datos es elevada.

Con el fin de seleccionar el tipo de método a utilizar para generar la grilla, se debe determinar una metodología que indique la medida en que cada uno de estos brinde resultados más o menos acordes a los datos de entrada. La validación cruzada es una metodología bastante objetiva que puede dar parámetros de comparación entre diferentes métodos de generación de grillas.

La validación cruzada trabaja de la siguiente manera: dados los datos de origen con coordinas espaciales “X” y “Y” y un valor adjunto “Z” (relacionado en este caso a la elevación), la validación cruzada selecciona una cantidad “n” de estos datos. El método de validación cruzada estima la calidad de la grilla calculando el error generado por el algoritmo elegido. De los “n” datos seleccionados (cantidad escogida por el usuario) el método toma un primer punto, lo extrae del sistema y calcula “Z” en su ubicación teniendo en cuenta los demás datos de origen pero sin considerar el punto eliminado. De esta manera el error para ese punto sería igual a:

$$\text{error} = \text{valor estimado} - \text{valor de origen} \quad (8)$$

El proceso continúa para un segundo punto de manera idéntica. El primer punto es nuevamente insertado y el segundo es retirado. Con los demás datos de origen (todos a excepción del segundo) se calcula un valor “Z” localizado en la ubicación del punto dos y el error para el segundo punto es hallado. El mismo proceso es seguido para el tercer, cuarto, quinto, etc., hasta llegar al n-ésimo valor.

Es posible determinar diversos estadísticos que sirvan para establecer un valor representativo del total de errores calculados (“n”) mediante este proceso. Para este caso se utilizará el parámetro conocido como el valor cuadrático medio o **root mean square** (RMS). Dicho valor, en términos matemáticos, es una medida estadística de la magnitud de un valor variable. Este parámetro es frecuentemente utilizado en sistemas de información geográfica o MDT para establecer la fidelidad de los resultados con los valores observados en terreno y de esta manera apreciar la calidad del modelo.

El RMS no es más que la raíz de la media de los cuadrados de los valores, en este caso, de los errores hallados mediante la validación cruzada. De esta forma se tiene que:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (9)$$

En primera instancia se debe seleccionar el algoritmo o método a utilizar para generar la grilla del modelo raster en base a los valores obtenidos de RMS para cada uno de estos. El valor de RMS dependerá de igual manera del número de valores que se tomen en la validación cruzada; a medida que se tome un valor mayor se obtendrán valores un poco más precisos, pero se requerirá de un mayor poder de computo para su procesamiento e igualmente de un aumento considerable en el tiempo necesario para los cálculos. Para este caso se toman 10000 puntos, lo que es suficiente para brindar resultados estadísticos estables con un tiempo de cálculo no demasiado prolongado.

Los resultados de RMS producto de la validación cruzada con 10000 valores de los datos obtenidos de la cuenca de la quebrada Angulito para diferentes metodologías de generación de grillas se muestran a continuación (tabla 9):

Tabla 9. Valores de RMS para diferentes métodos de generación de grillas.

Método	RMS (10000 puntos)
Kriging	0.13279
RBF Multicuadratic	0.10358
RBF Thin Plate Spline	0.09113
RBF Natural Cubic Spline	0.08825
RBF Inverse Multicuadratic	0.28237
RBF Multilog	0.14780

Fuente: Archivo digital investigación.

El programa Surfer V.8. en su manual recomienda los métodos Kriging y **radial basis function** (RBF) como aquellos que brindan generalmente las mejores representaciones, aunque suelen ser un poco lentos cuando se trabaja con un elevado número de datos. En

la tabla 9 se observa que, en términos generales, el método RBF brinda valores de RMS menores a aquellos obtenidos mediante Kriging. Aunque el método RBF en base **natural cubic spline** y **thin plate spline** muestran valores de RMS menores a aquellos obtenidos mediante RBF en base **multiquadratic**, se selecciona este último debido a que, según el manual del software, “es considerado por muchos como el mejor” para la generación de superficies suaves y las diferencias entre los métodos no son considerables.

El RBF con base al método multicuadrático utiliza la siguiente ecuación de Kernel para dar peso a los datos localizados en los alrededores del punto a encontrar y de esta manera estimar el valor del mismo:

$$B(\mathbf{h}) = \sqrt{\mathbf{h}^2 + R^2} \quad (10)$$

Donde h^2 representa la distancia anisotrópicamente reescalada entre los puntos y R^2 un factor suavizante dado por el usuario o hallado por defecto por el programa.

La anisotropía se utiliza para determinar el peso que se les dará a los valores que rodean un punto cuyo valor se desea hallar de acuerdo a la orientación que ellos tengan en relación a este último. En algunas oportunidades los puntos se encuentran más relacionados o muestran una mayor similitud a sus vecinos localizados en determinada dirección. De acuerdo a esto, en estas oportunidades sería lógico brindarles un mayor peso a los valores que se encontrasen en la dirección con la cual se tiene una mayor relación.

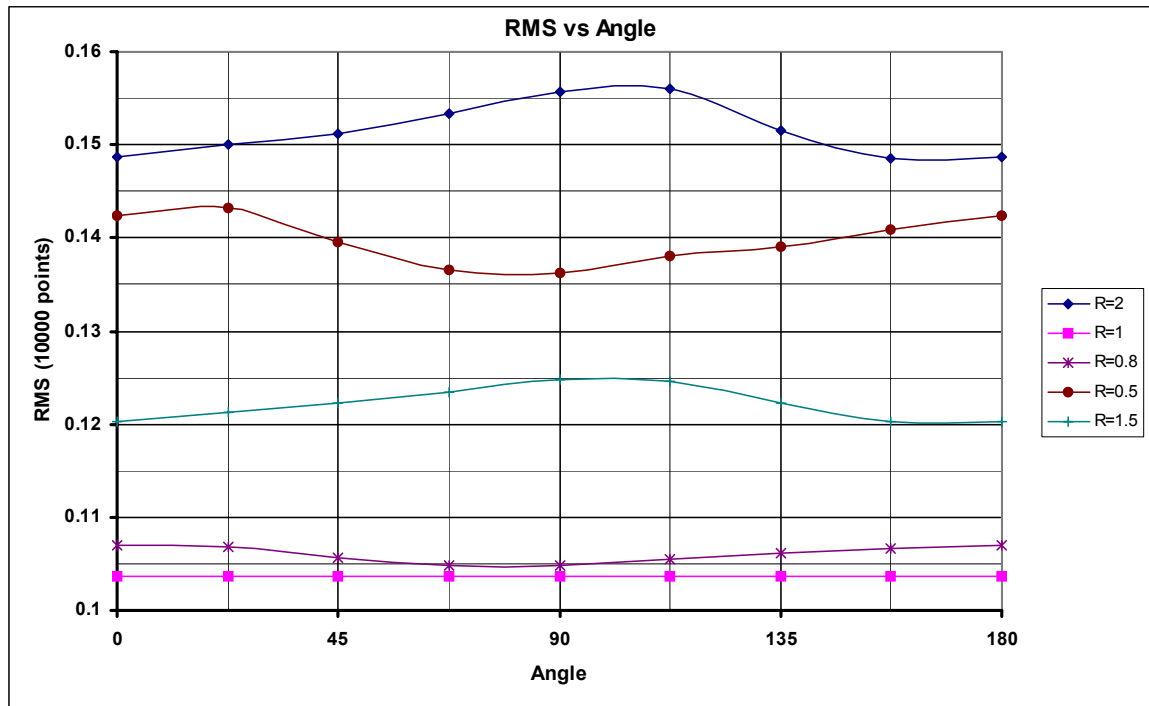
Lo anterior se realiza mediante los parámetros de anisotropía. Los valores de anisotropía se reflejan en dos parámetros principales: R (**ratio** o cociente) que refleja la relación entre el rango mayor y menor, y el ángulo, que brinda una inclinación. Los valores anteriores y el efecto de la anisotropía se pueden visualizar mediante una elipse, donde la relación entre el radio mayor sobre el menor es igual a R y el ángulo de inclinación en sentido contrario a las manecillas del reloj es el ángulo de anisotropía.

Dichos parámetros se deben determinar de tal manera que, en conjunto, brinden los menores valores de RMS para el método seleccionado (RBF en base multicuadrática).

Con este fin se procedió a encontrar la relación que estos poseen con los valores de error medio cuadrático mediante la realización de una serie de gráficas de relación que se muestran a continuación.

Un primer paso consistió en observar el cambio presentado de RMS en relación al ángulo, con ciertos valores de R y manteniendo R^2 como constante. Lo anterior, siendo aplicado a los datos obtenidos de los planos topográficos digitales de la cuenca de la quebrada Angulito con validaciones cruzadas de 10000 puntos, brinda como resultado la siguiente gráfica (véase figura 43):

Figura 43. Relación entre el ángulo de inclinación y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) de acuerdo a diferentes valores de R.



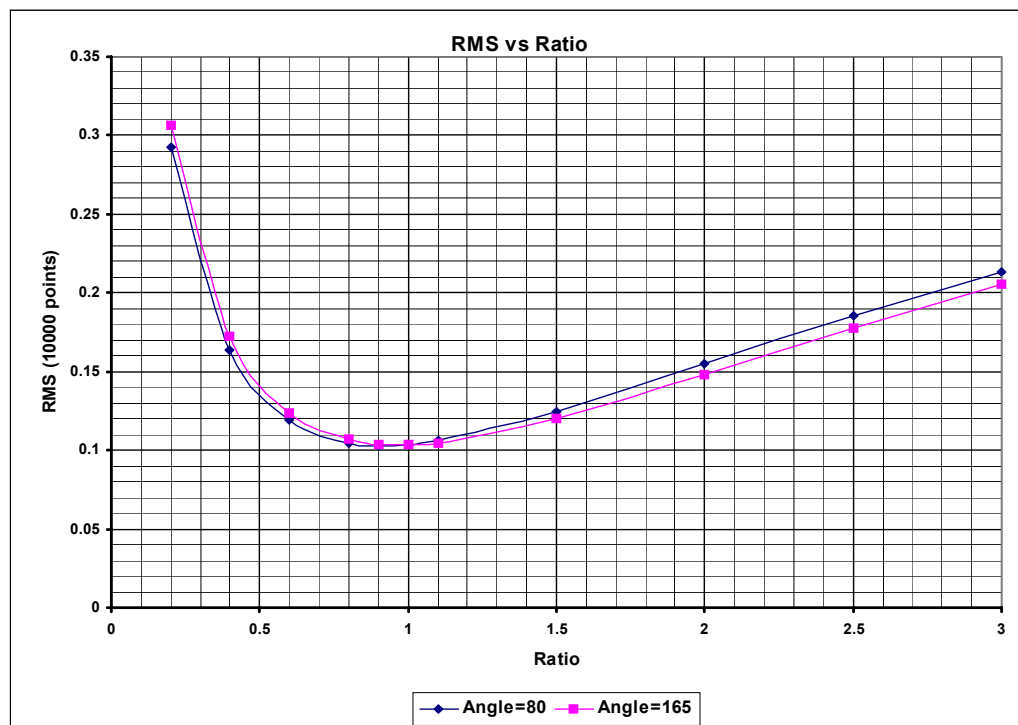
Fuente: Archivo digital investigación.

Se observa que para $R > 1$ el ángulo que menores valores de RMS brinda es 165° y para valores de $R < 1$ el ángulo que menores valores de RMS brinda es 80° . En el caso que $R = 1$ el valor del ángulo será irrelevante y no afectará el resultado. De esta manera se concluye

que de acuerdo al valor de R que se vaya a utilizar se tiene un valor de ángulo en relación a si este es mayor o menor de uno.

Una vez obtenidos los posibles valores de ángulo de inclinación, se precede a determinar el valor de R que brinde los menores valores de RMS. Lo anterior se realiza mediante el ensayo de diferentes valores de R, con ángulos de 80° y 165°, y manteniendo R² como constante. El proceso se ejecuta nuevamente mediante validación cruzada con 10000 puntos. Los valores encontrados se muestran a manera de gráfica en la figura 44.

Figura 44. Relación entre R y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) para ángulos de 80° y 165°.

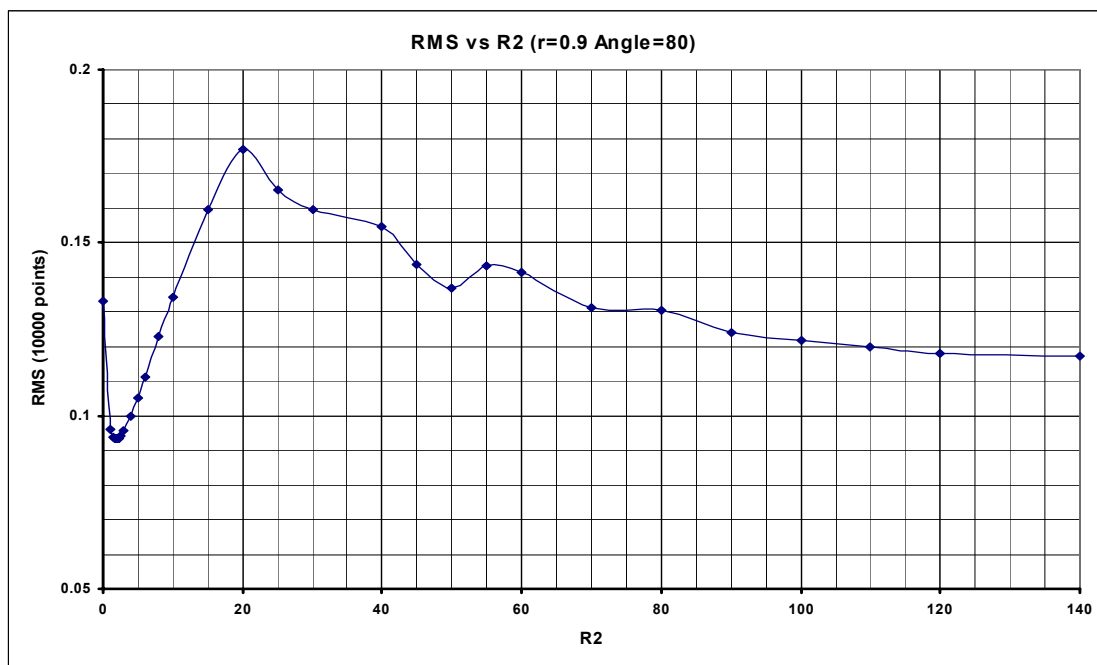


Fuente: Archivo digital investigación.

Se observa un descenso marcado de los valores de RMS cuando el valor de R es cercano a 1. Con mayor exactitud, se tiene que el mínimo valor de RMS se obtiene con un R igual a 0.9 y un ángulo de inclinación igual a 80°. Valores de R inferiores a 2 representan una anisotropía suave.

Una vez obtenidos los valores de anisotropía, solo falta determinar el valor de R^2 . Esto se realiza encontrando la relación entre el RMS y R^2 para los datos del sector de la cuenca de la quebrada Angulito mediante una validación cruzada nuevamente con 10000 puntos con R igual a 0.9 y el ángulo igual a 80° . Lo anterior se muestra en la figura 45 con valores de R^2 entre 0 y 140 y con una mayor exactitud en la figura 46, con valores de R^2 entre 0 y 10.

Figura 45. Relación entre R^2 y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) con $R=0.9$ y ángulo= 80° , rango de 0 a 140.



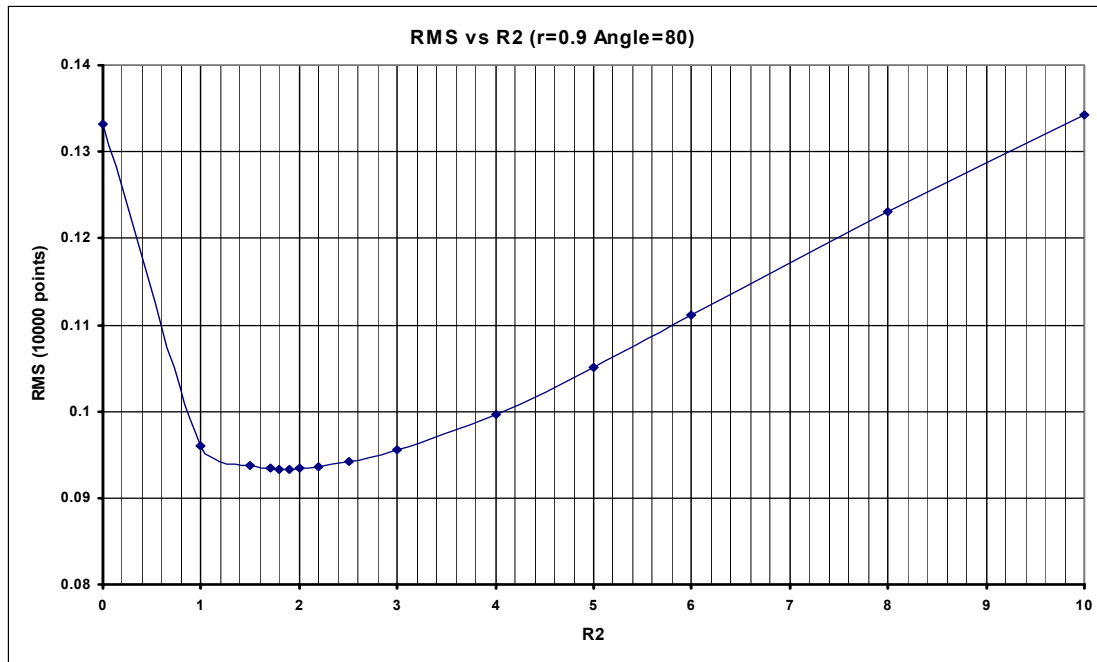
Fuente: Archivo digital investigación.

En la figura 45 se observa una reducción drástica en los valores de RMS para valores de R^2 entre 0 y 10 con un posterior incremento y una caída con asíntota cercana a $RMS=0.12$. Por lo anterior se realizó un acercamiento (véase figura 46) para observar con mayor detenimiento el comportamiento de R^2 y el RMS cuando R^2 posee valores entre 0 y 10. Se obtiene un mínimo valor de RMS cuando $R^2=1.9$.

El valor de RMS obtenido al final del proceso con $R=0.9$, ángulo= 80° y $R^2=1.9$ es 0.093. Este valor es bastante bajo, lo cual indica un modelo de terreno generado tipo raster que

asemeja en gran medida la información de entrada de topografía digital y por ende el terreno original.

Figura 46. Relación entre R^2 y el RMS (validación cruzada con 10000 puntos) con $R=0.9$ y ángulo= 80° , rango de 0 a 10.



Fuente: Archivo digital investigación.

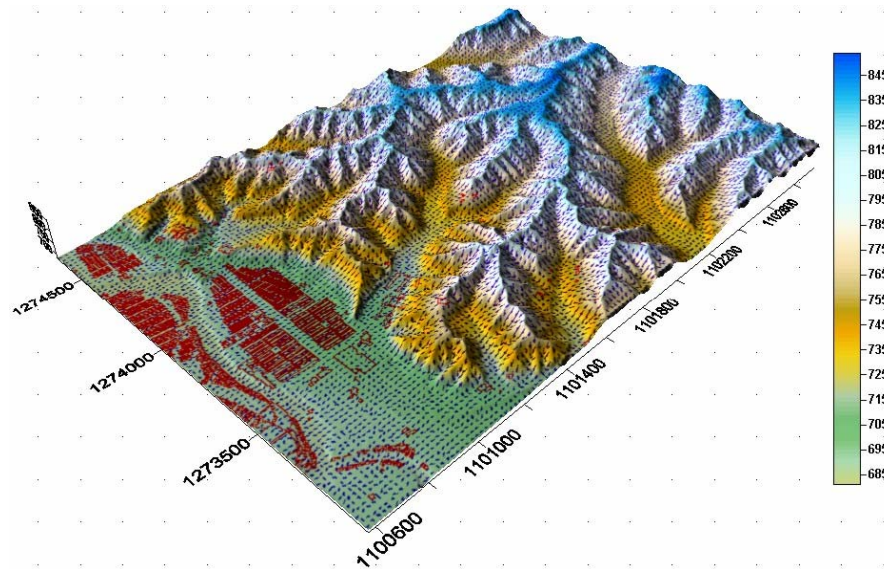
En la figura 47 se muestra el modelo digital de elevación obtenido mediante una vista 3D que incluye las direcciones de flujo (representadas mediante flechas y halladas en Surfer V.8.) y la localización de las viviendas de la zona. En esta vista no se muestran las viviendas de la parte alta de la cuenca, que componen el mayor porcentaje de asentamientos humanos en el sector.

4.1.3 Manejo y conversión del modelo digital de elevación a otros formatos.

La grilla generada mediante el proceso anteriormente descrito es del tipo Surfer ASCII con extensión *.grd. El formato de este tipo de grillas es el trabajado mediante el programa Surfer V.8. Sin embargo, para el desarrollo de diversos procesos necesarios para la construcción de los modelos de deslizamientos y flujos, es necesario trabajar el modelo

digital de elevación en el formato Arcview ASCII (*.asc), utilizado por el software Arcview, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, Tardem, entre otros.

Figura 47. Vista en 3D de superficie generada del MDE obtenido del sector de la cuenca de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo digital investigación.

Con este fin se implementa una herramienta de software desarrollada por Johannes Weigel. Dicho software, **Surfer Extension 2.8**, no es más que una extensión que se puede añadir en el programa ArcView versión 3.2 o superior. Dicha extensión, una vez activada, permite la fácil conversión entre formatos de grillas Surfer a ArcView y viceversa, facilitando de esta manera el desarrollo de los diversos modelos trabajados en este estudio.

4.2 PRECIPITACIÓN

Para el desarrollo de los modelos hidrológicos, de deslizamientos y flujos se hace necesario conocer la precipitación presentada en la cuenca de la quebrada Angulito. Debido a que no existen datos precisos de precipitación localizada en el la cuenca, es necesario obtener dicha información a partir del procesamiento de datos de precipitación en sectores aledaños.

La información de precipitación recolectada que cubre el evento ocurrido entre el 7 y el 12 de Febrero de 2005 es obtenida de estaciones pertenecientes a tres diferentes entidades: el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM), la Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB) y la constructora Urbanas S.A. Dentro de las estaciones de medición de precipitación de estas tres entidades fueron seleccionadas cuatro en total de acuerdo principalmente a su cercanía con el sector del evento. Los nombres de dichas estaciones, al igual que su localización y características se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Estaciones escogidas para obtención de precipitación en la cuenca de la quebrada Angulito.

Nombre	Tipo	Entidad	Municipio	Coordenadas		Elevación m.s.n.m.
				Norte	Este	
Club Campestre	PG	CDMB	Floridablanca	1,273,301	1,106,377	2250
Llano Grande	CO	IDEAM	Girón	1,270,896	1,099,264	777
Ruitoque	PG	URBANAS	Piedecuesta	1,268,702	1,110,038	1370
Chimitá	AUT	CDMB	Girón	1,276,796	1,100,618	685.84

Fuente: IDEAM, CDMB, URBANAS.

4.2.1 Delimitación de la cuenca.

Con base en el modelo digital de elevación se deben ahora establecer los límites que definan la cuenca de la quebrada Angulito, la cual será analizada. La delimitación se hace relativamente sencilla mediante la utilización de herramientas computacionales.

El software SPELL-Map versión 1.0.0.31 B, desarrollado por el grupo de predicción y modelamiento hidroclimático de la Universidad Industrial de Santander, fue implementado con este propósito. Dicho software contiene una herramienta que permite seleccionar, de un modelo raster de elevación, aquellas celdas de la grilla que drenan por un punto determinado. Una vez elegido el punto de salida de la cuenca y mediante el uso de la herramienta antes descrita, se pueden seleccionar todas aquellas celdas que drenan por este punto y que componen la cuenca, estableciendo de esta manera sus límites.

4.2.2 Proceso de espacialización de la precipitación.

A partir de datos de precipitación horarios de las cuatro estaciones seleccionadas, se procedió a realizar un proceso de espacialización de la precipitación con el objetivo de obtener datos representativos de la cuenca de la quebrada Angulito.

El proceso de espacialización de la precipitación se realizó de manera similar a la generación del modelo digital de elevación. Igual que con este último, la espacialización de la precipitación se generó mediante la implementación del software Surfer V.8. La metodología utilizada se basa en el método Kriging, un método geoestadístico para la generación de grillas.

Para facilitar el proceso se utilizó el método Kriging basado en sus valores por defecto. Lo anterior debido a la elevada cantidad de grillas a generar (una cada hora). Este proceso podría de cierta manera ser mejorado mediante el ajuste de los parámetros del método Kriging, sin embargo se consideró que, debido a que las grillas serán sólo utilizadas para obtener un promedio horario de precipitación para toda la cuenca, no es necesaria demasiada precisión.

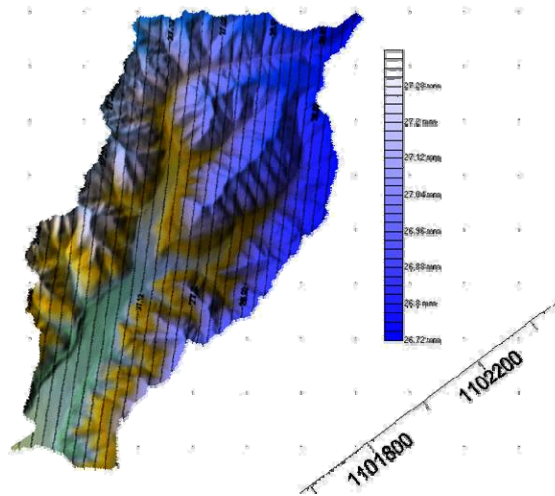
De esta manera se procedió a generar el sistema de grillas horarias de precipitación de acuerdo a los datos obtenidos de las estaciones (véase figura 48). Con estas grillas y conociendo los límites de la cuenca, es posible determinar los promedios de precipitación horaria para la cuenca de la quebrada Angulito. Dichos valores de precipitación se muestran en la figura 49.

Según se puede observar en los datos de precipitación sobre la cuenca de la quebrada Angulito, durante el fenómeno ocurrido entre el 7 y el 12 de Febrero de 2005, se presentaron cuatro eventos de precipitación por separado. Los eventos muestran elevadas intensidades, llegando a valores de 27.1 mm/h, y son de poca duración (véase figura 49).

Se espera que los primeros tres eventos de precipitación (entre las 0:00 horas del 8 de Febrero y las 12:00 horas del 11 de Febrero) hayan provocado una saturación de los

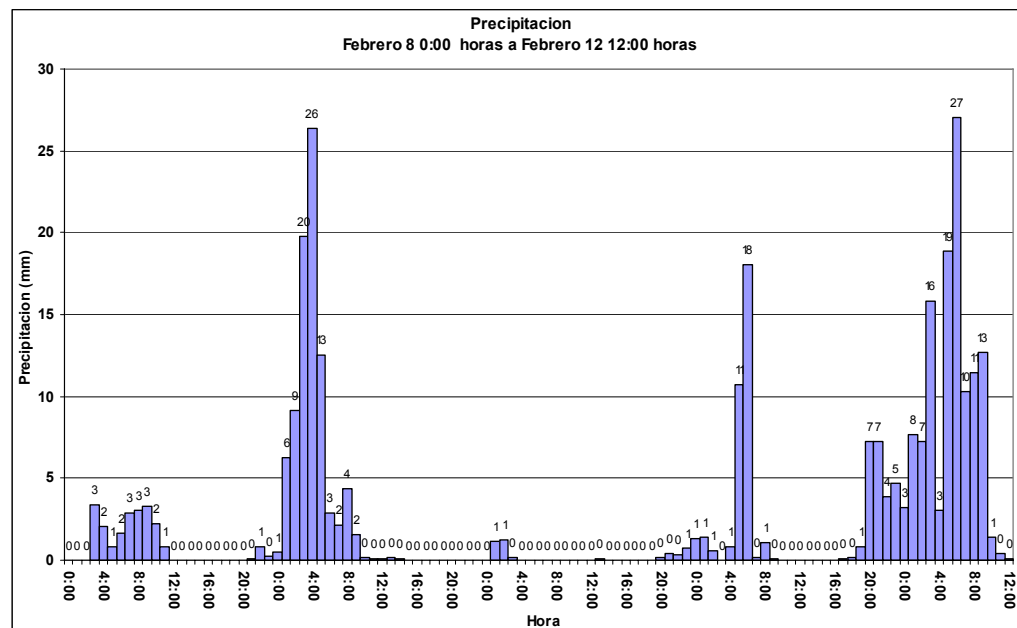
niveles superiores del suelo. El último evento, al encontrar un suelo suelto y saturado, puede ser considerado como el principal activador de los deslizamientos.

Figura 48. Isoyetas generadas mediante precipitación espacializada sobre la cuenca de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 49. Precipitación horaria promedio en la cuenca de la quebrada Angulito. 0:00 horas del 8 de Febrero a las 12:00 horas del 12 de Febrero.



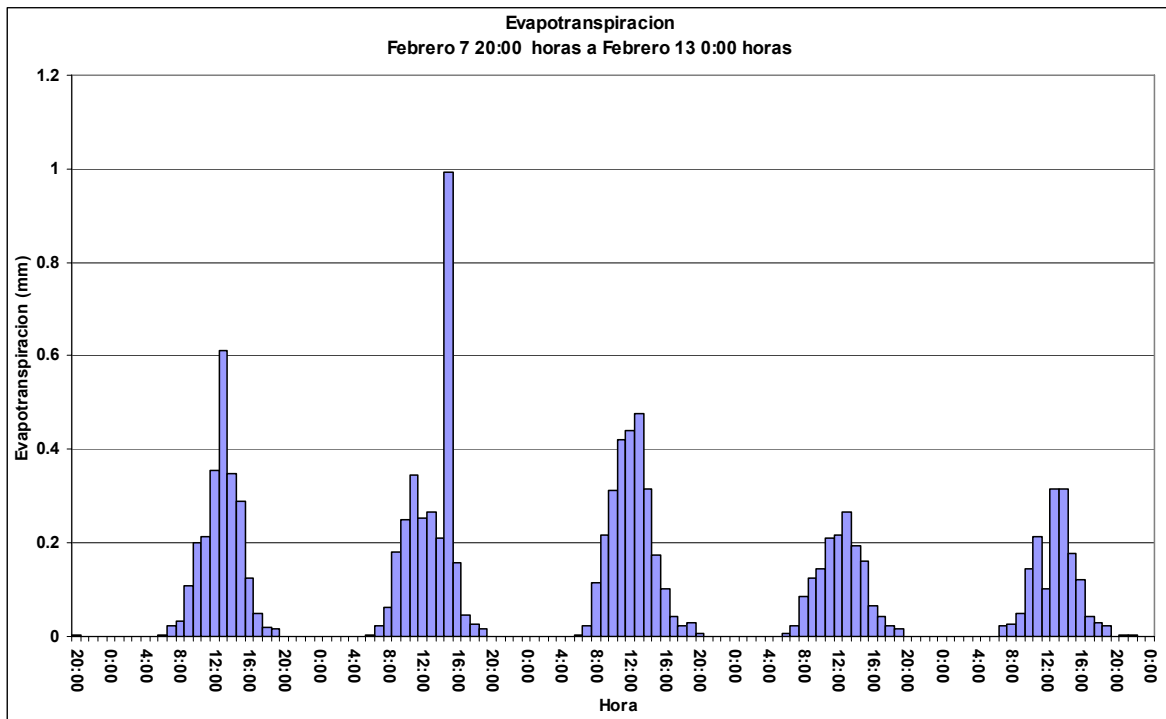
Fuente: Archivo digital investigación.

4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los datos de evapotranspiración se muestran mucho más escasos que aquellos obtenidos de precipitación. Lo anterior dificulta el desarrollo de métodos de espacialización de este tipo de información.

Debido principalmente a la lejanía presentada por muchas de las estaciones de medición de evapotranspiración en relación a la cuenca de la quebrada Angulito, se optó por seleccionar tan solo una de estas como representativa de la evapotranspiración en la cuenca. La estación escogida es PTAR que, con coordenadas este 1'103,075 y norte 1'272.841, muestra la mayor cercanía con la cuenca analizada. De esta manera, interpretando los datos de evapotranspiración de esta estación como aquellos de la cuenca de la quebrada Angulito, se obtienen los resultados mostrados en la figura 50.

Figura 50. Evapotranspiración horaria en la cuenca de la quebrada Angulito. 20:00 horas del 7 de Febrero a las 0:00 horas del 13 de Febrero.



Fuente: Archivo digital investigación.

4.4 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Uno de los principales factores a analizar son las propiedades de los suelos de la zona. Hallando e interpretando las características geotécnicas de un suelo es posible llegar a comprender su comportamiento. Una vez logrado este objetivo se debe, luego de una serie de análisis, determinar si el suelo presenta algún tipo de característica que lo haga propenso a presentar problemas de estabilidad.

Las características geológicas y morfológicas de la cuenca de la quebrada Angulito hacen que se requiera hacer exploración del suelo en diferentes puntos, ya que se detectaron visualmente algunas variaciones en cuanto a composición y distribución de granos en la formación Órganos nivel superior. Se realizaron dos etapas de muestreo, las cuales para la presentación de los resultados tendrán como convención: primera extracción 1, 2, 3, 4, 5 (haciendo referencia a 5 estratos diferentes de suelo) y segunda extracción 2A, 2B, 2C, 2D, 2E y 2F (todas sobre el estrato número 2). Aclarando aquí que se hizo especial análisis en el estrato dos (2), ya que en éste se presentaron la mayoría de los deslizamientos ocurridos durante el periodo de precipitación intensa entre el 7 y el 12 de Febrero de 2005 en el municipio de Girón, Santander.

Para lograr lo anterior se propone la realización de los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico del suelo por tamizado.
- Determinación de Límites de Atterberg de los suelos.
- Análisis granulométrico de material fino por hidrómetro.
- Peso unitario del suelo en terreno mediante método del cono de arena.
- Ensayos de corte directo drenado.
- Ensayo visual de dispersión del Departamento de Agricultura de Australia Occidental (DAWA).
- Ensayo de dispersión por doble hidrómetro.
- Ensayo de dispersibilidad por tubificación (**pinhole**).
- Ensayo de coeficiente de permeabilidad por el método de la cabeza variables.
- Ensayo de percolación en el terreno.
- Peso específico del suelo y del llenante mineral.

- Determinación del pH de los suelos.
- Contenido de cationes intercambiables y materia orgánica.
- Otros ensayos químicos del suelo.

4.4.1 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

4.4.1.1 Objetivo. Determinar la granulometría del suelo y su composición en porcentajes de gravas, arenas y finos.

4.4.1.2 Normatividad. Este análisis de granulometría sigue las normas INV-E 123, ASTM D422-63, AASHTO T88 y NLT 104.

4.4.1.3 Metodología. Consiste principalmente en pasar el material por una serie de tamices que muestran una disminución en su abertura. La selección de la serie de tamices se hace de acuerdo a una inspección visual de las partículas; si es el caso de una arena se recomienda usar la siguiente serie: No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100, No. 140, No. 200, y el fondo; y si es un material gravoso la recomendación de serie es: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", y No. 4. En la mayoría de los casos se utiliza una combinación de estas series debido a la amplia gama de suelos que se presentan en Colombia.

Luego de la selección de tamices estos se ponen en orden progresivo y se coloca la muestra en el primer tamiz, se cierra y se agita ya sea en agitador mecánico o a mano por 15 minutos. El material retenido en cada tamiz es entonces pesado y el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices es calculado.

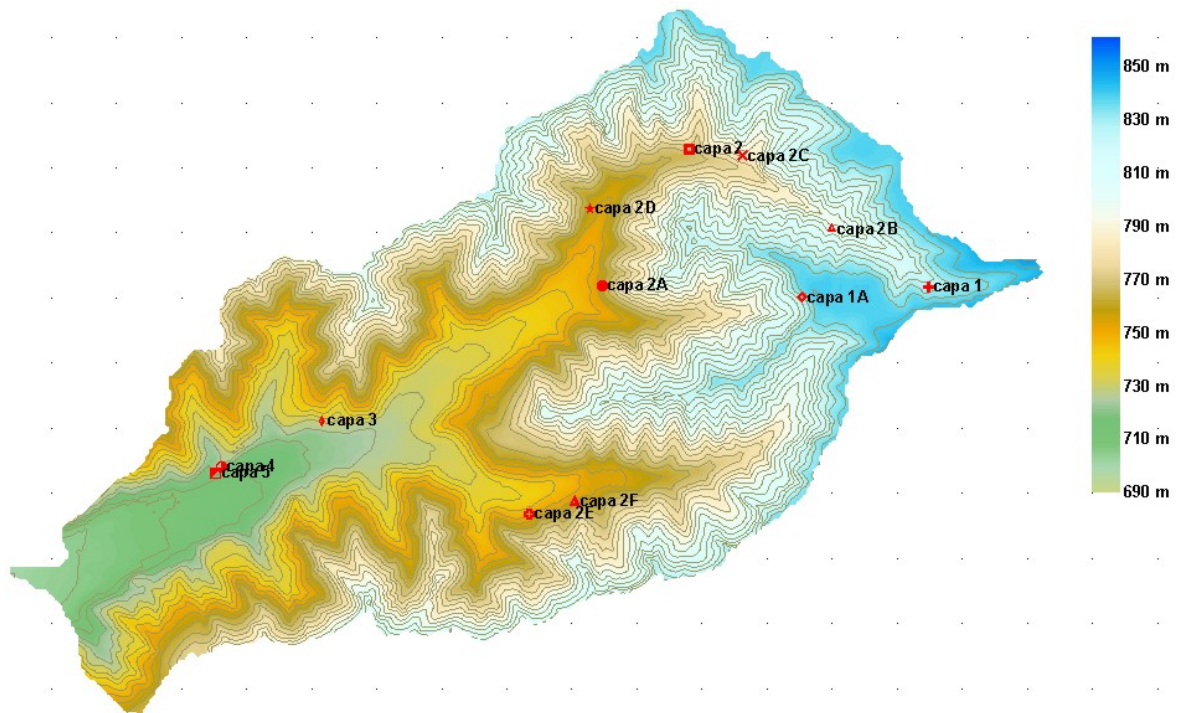
4.4.1.4 Resultados. A continuación se muestra la tabla 11 con el resumen de los resultados obtenidos del ensayo. Se aclara que las muestras marcadas con denominación 2 pertenecen al mismo manto con diferente lugar de extracción. La localización de las muestras puede verse en la figura 51. Información más completa de los resultados del ensayo puede encontrarse en el Anexo A.

Tabla 11. Resultados análisis granulométricos.

	Muestra	Grava %	Arena %	Finos %
Primer muestreo	1	22,38	50,4	27,23
	1A	1,71	32,48	65,81
	2	75,56	20,41	4,02
	2A	55,89	32,58	11,52
	3	0	29,52	70,48
	4	62,68	29,44	7,88
Segundo muestreo	5	5,07	26,67	68,26
	2B	40,7	39,81	12,5
	2C	49,89	28,43	21,69
	2D	41,99	48,08	9,93
	2E	33,6	43,52	22,87
	2F	60,55	32,69	6,77

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

Figura 51. Localización de muestras para ensayos de laboratorio.



Fuente: Archivo digital investigación.

4.4.1.5 Conclusiones. Los resultados confirman la presencia de 5 capas o mantos bien definidos en la cuenca, que varían significativamente en cuanto a composición.

Se ratifica que un porcentaje alto de la cuenca pertenece a materiales granulares de la formación Órganos nivel superior (manto 2) con clasificación entre GP y GM-GC. Existen afloramientos de mantos finos de arenas arcillosas y arcillas de baja plasticidad en la parte alta de la cuenca, pertenecientes al miembro Finos de la formación Bucaramanga.

En la parte baja de la cuenca se observa alternancia de estratos de limos de baja plasticidad de coloración rojiza y capas de gravas mal gradadas en matriz arcillosa de menos de 1m de espesor. Estos estratos pertenecen al nivel inferior del miembro Órganos de la formación Bucaramanga.

Los porcentajes de partículas finas (menores al tamiz No. 200) son bastante bajos en el estrato perteneciente al del miembro Órganos nivel superior, con valores de entre el 4% y el 22%.

4.4.2 Límites de Atterberg de los suelos.

4.4.2.1 Objetivo. Este ensayo se realiza con el objetivo de determinar el comportamiento del limo o arcilla según el contenido de agua, que puede ser: líquido, plástico o sólido. Estos límites se denominan límites de consistencia (grado de resistencia de un terreno de grano fino a fluir o deformarse).

4.4.2.2 Normatividad. El procedimiento del ensayo sigue las normas INV-E 125-126, AASHTO T89-790 y NLT 105-106.

4.4.2.3 Metodología. Según Atterberg, si un suelo está en estado líquido, al ir perdiendo humedad gradualmente, éste pasa por una serie de estados: entre el estado líquido y el plástico está el límite líquido, entre el estado plástico y semi-sólido está el límite plástico y entre el semi-sólido y el sólido está el límite de retracción o recogimiento. Estas observaciones dieron lugar a postular una metodología para determinar estas constantes, que consisten básicamente en lo siguiente:

- Límite líquido: se toman aproximadamente 200g de material previamente humedecido que pasa el tamiz No. 40, luego se amasa hasta que presente una consistencia de una masa espesa y suave. Se coloca el material en el aparato de Casagrande llenándolo hasta un tercio aproximadamente y se enrasa hasta obtener una superficie lisa. Usando la herramienta ranuradora se divide el suelo con un trazo firme a lo largo del eje de simetría y se da inicio al ensayo, girando la manivela para que el aparato golpee con su base. Se cuenta el número de golpes hasta que la ranura se cierre 12mm aproximadamente y luego se toma la humedad a la que se ensayó el material. El límite líquido se calcula usando la ecuación (11), en donde w es la humedad y β es la pendiente de la recta característica en el gráfico semilogarítmico.

$$LL = W * \left(\frac{N.golpes}{25} \right) * Tan\beta \quad (11)$$

- Límite plástico: se toma muestra con una humedad hasta que el material no se adhiera a las manos y se deje trabajar. La muestra se hace rodar con la palma de la mano sobre cualquier superficie lisa, hasta formar pequeños cilindros de 3mm de diámetro aproximadamente. Si al llegar a éste diámetro el cilindro se agrieta se le determina la humedad y esta corresponde al límite plástico, si no se ha agrietado se amasa y se hace rodar. El ensayo se realiza varias veces con el objeto de que exista algún modo de comprobación y se pueda obtener un promedio.

4.4.2.4 Resultados. A diferencia del análisis granulométrico por tamizado, este ensayo se realizó solo a muestras de la primera extracción (véase tabla 12).

Tabla 12. Límites de Atterberg y clasificación.

	Muestra	LL	LP	IP	Clasificación
Primer muestreo	1	38,51	21,32	17,19	SC
	1A	40,11	21,29	18,82	CL
	2	NP	NP	NP	GP
	2A	22,23	15,45	6,78	GM-GC
	3	25,17	23,15	2,02	ML
	4	31,93	22,82	9,11	GP-GC
	5	23,38	15,45	7,93	ML-CL

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.2.5 Conclusiones. Como muestran los resultados, se presentan en la cuenca de la quebrada Angulito desde materiales de poca plasticidad (manto 2) hasta arcillas meteorizadas (manto 1). La baja plasticidad del material fino del estrato 2 (nivel superior miembro Órganos) es común, según Mitchell⁵⁰, en suelos de tipo dispersivo, lo que lo haría propenso a la aparición de deslizamientos (véase figura 52).

Figura 52. a) Arcilla meteorizada mimbros finos formación Bucaramanga, presente en la parte alta de la cuenca. b) Materiales granulares de la cuenca, susceptibles a la humedad.



(a)



(b)

Fuente: Archivo fotográfico investigación

4.4.3 Análisis granulométrico de material fino por hidrómetro.

4.4.3.1 Objetivo. Determinar el porcentaje de material limoso y arcilloso presente en una muestra.

4.4.3.2 Normatividad. Se sigue el procedimiento recomendado por la norma ASSHTO T88, INV-E 124 y ASTM D422.

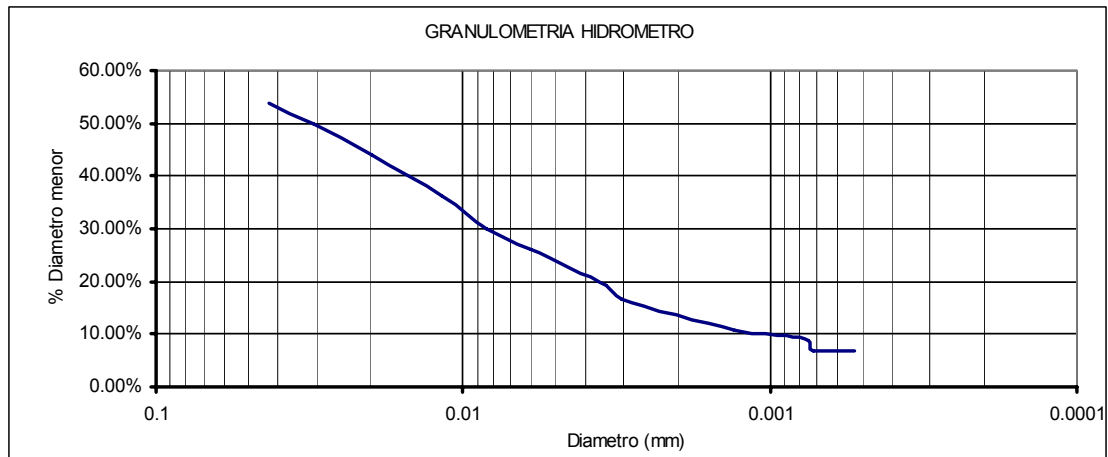
4.4.3.3 Metodología. Se utiliza como principal elemento el hidrómetro (tipo 152H), que tiene por función la determinación del porcentaje de partículas dispersadas de suelo que permanecen en suspensión por un determinado tiempo. Para la realización de este

⁵⁰ MITCHELL, Op. cit., p. 218.

ensayo se utilizó una muestra pasante del tamiz No. 200 del manto 2, que se agregó a una solución de hexametáfosfato de sodio con concentración de 40gr/l.

4.4.3.4 Resultados. La curva granulométrica del material fino de la muestra 2 se observa en la figura 53.

Figura 53. Curva granulométrica por hidrómetro del material del manto 2.



Fuente: Archivo laboratorio investigación.

Al interpolar se encuentra que el contenido de arcilla (partículas de diámetro menor a 5μ) en la muestra es del 23.4%, que corresponde al 2.81% en el material del manto 2 (determinado a partir del 12% de finos según granulometría por tamices). Con esto, el porcentaje de limos en la muestra ensayada es del 76.6% (diámetros entre 50μ y 5μ), correspondiente al 9.19% en el material.

4.4.3.5 Conclusiones. El porcentaje encontrado para las arcillas es relativamente bajo, sin embargo, este valor brinda al material una cohesión considerable, aumentando su resistencia en estado seco.

4.4.4 Peso específico del suelo y del llenante mineral.

4.4.4.1 Objetivo. Determinar el peso específico del material y del llenante mineral por medio de un picnómetro.

4.4.4.2 Normatividad. La metodología para este ensayo sigue las normas AASHTO T84, ASTM C128 e INV- E 128.

4.4.4.3 Metodología. El procedimiento para determinar el peso específico de los suelos a su humedad natural consiste básicamente en:

- Calibración del picnómetro a diferentes temperaturas.
- Humedecimiento de la muestra a utilizar e introducción en el picnómetro.
- Remoción del aire atrapado en el picnómetro mediante el procedimiento de vacío (véase figura 54).
- Llenado del picnómetro hasta la marca de calibración utilizando agua destilada.
- Pesada del picnómetro y su contenido.
- Toma de lectura de temperatura después que ha sido agitado el picnómetro.
- Secado del contenido del picnómetro en una cápsula de evaporación.
- Peso del suelo seco.

Figura 54. Remoción de aire atrapado en el picnómetro.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

El peso específico de los sólidos se calcula con la siguiente ecuación:

$$G_{total} = \frac{W_o K}{W_o + W_2 - W_1} \quad (12)$$

En donde K es el factor de corrección basado en el peso específico del agua a 20 °C, W_2 es el peso del picnómetro más agua a la temperatura del ensayo obtenido de la curva de calibración del picnómetro, W_0 es el peso seco y W_1 es el peso del picnómetro más agua más suelo.

El peso específico total se calcula a partir del peso específico de los sólidos G_s (pasante tamiz No. 4) y el peso específico aparente G_a (retenido tamiz No. 4) según la norma INVE 223, utilizando la expresión:

$$G_{total} = \frac{100}{\frac{\%pasa.No4}{G_s} + \frac{\%retenido.No4}{G_a}} \quad (13)$$

4.4.4.4 Resultados. El peso específico del pasante del tamiz No. 4 es 2.662gr/cm³ y el peso específico aparente del material retenido por el tamiz No. 4 es 2.584gr/cm³. De esta forma, calculando mediante la ecuación (13) el peso específico total la muestra del manto 2, este es de 2.617gr/cm³.

Se realizó un ensayo a la fracción del material que pasa el tamiz No. 200 siguiendo la metodología del picnómetro para ser utilizado en los cálculos de la granulometría por hidrómetro. Su resultado fue de 2.725gr/cm³.

4.4.5 Peso unitario del suelo en terreno mediante método del cono de arena.

4.4.5.1 Objetivo. Determinar el peso unitario o densidad de los suelos en el terreno y su porosidad efectiva.

4.4.5.2 Normatividad. El ensayo corresponde a las normas ASSHTO T191-61 y ASTM D1556-64.

4.4.5.3 Metodología. Se utiliza un contenedor, un cono (por donde se pasa la arena al orificio previamente excavado) y arena de densidad conocida, en este caso arena de Ottawa (véase figura 55). Se realiza un orificio en el suelo y se determina el peso seco del

material removido. El volumen del orificio se halla vaciando sobre este la arena mediante el contenedor y el cono. La diferencia de peso del contenedor antes y después de vaciada la arena permite estimar el volumen total de la arena utilizada, de donde, al substrair el volumen conocido del cono, es posible obtener el volumen del orificio. El cociente del peso seco del material y el volumen del orificio es la densidad seca del suelo en el terreno.

Figura 55. Cono de arena.



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

Además del cálculo de la densidad seca del material se puede determinar, mediante relaciones con el peso específico real seco del suelo calculado anteriormente, la porosidad en el campo. La relación para determinar la porosidad corresponde a la ecuación (14).

$$Porosidad = 1 - \frac{Densidad\ seca\ en\ terreno}{Peso\ específico\ real\ sec\ \rho} \quad (14)$$

4.4.5.4 Resultados. Se realizaron dos ensayos, uno en la ladera del este de la cuenca y otro en el sector oeste. Aplicando la metodología y las ecuaciones (13) y (14), los resultado del ensayo son (véase tabla 13):

Tabla 13. Densidad seca y porosidad del suelo en campo.

UBICACIÓN	Densidad Seca gr/cm3	Porosidad
Sector Subcuenca Oeste	1,77	0,34
Sector Subcuenca Este	1,60	0,40

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.6 Corte directo drenado.

4.4.6.1 Objetivo. Determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada junto con los parámetros de cohesión y ángulo de fricción del suelo.

4.4.6.2 Normatividad. Los ensayos realizados a los suelos de la quebrada Angulito corresponden según normas INV-E 154, ASTM D3080, AASHTO T236. Fueron realizadas en un equipo WYKEHAM FARRANCE Modelo No. 25401 Serie No. 105705-0.

4.4.6.3 Metodología. Éste ensayo fue producto de las investigaciones hechas por el físico ingeniero Coulomb, que comprobó la relación de fricción entre las partículas de suelo con la resistencia al corte de los mismos, para lo cual consideró los siguientes postulados:

- Los suelos fallan por el esfuerzo cortante a lo largo de planos de deslizamiento.
- El mecanismo de fricción es proporcional al coeficiente de fricción y es el que rige la resistencia al esfuerzo de corte en ciertos tipos de suelos.

Hechas estas consideraciones se plantea una ley de resistencia, en la cual la falla se produce cuando el esfuerzo cortante ζ alcanza un valor según la ecuación (15).

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (15)$$

En donde sustenta que los suelos presentar al mismo tiempo cohesión y fricción interna, que dependen de su naturaleza.

El procedimiento en el laboratorio se puede resumir en los siguientes puntos:

- Preparación de las muestras para incorporarlas al dispositivo encargado de transmitir la fuerza de corte en la máquina.
- Se planteó realizar dos tipos de ensayos: uno con baja humedad para simular el comportamiento en estado seco del suelo, y otro con material saturado, que simula sus condiciones críticas.
- Previamente al ensayo se permite un periodo de saturación y consolidación de uno a tres días para las muestras correspondientes al ensayo con material saturado. Las muestras de baja humedad se fallan inmediatamente.
- Cuando se completó la consolidación primaria se dio inicio a cada ensayo.
- Se fallaron siete muestras del mismo suelo a diferentes condiciones de esfuerzo normal para el ensayo saturado y cuatro muestras para la condición no saturada.
- Cada muestra de suelo se sometió a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta producir la falla (véase figura 56).
- Se obtuvieron los datos de deformaciones horizontales y verticales y esfuerzos para cada punto.
- Finalmente se elaboró una grafica con los valores de esfuerzo normal y cortante a la falla y se obtuvieron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.

Figura 56. a) Equipo de corte directo. b) Muestra después del ensayo.



a)

b)

Fuente: Archivo fotográfico investigación.

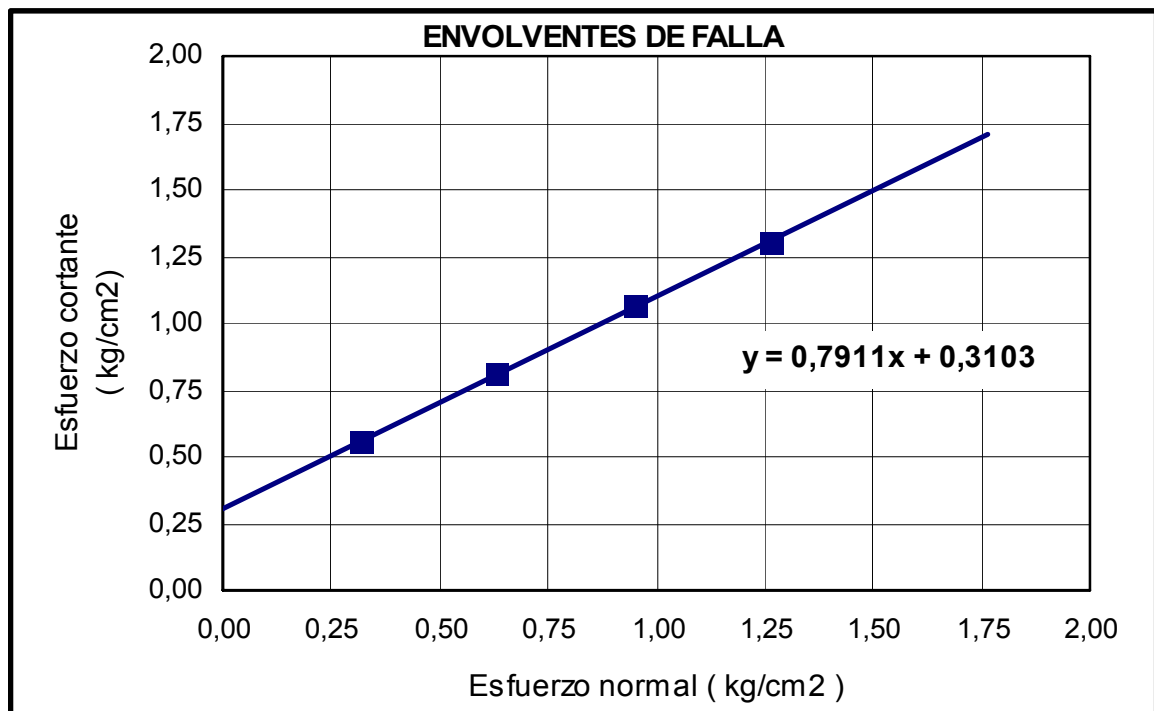
4.4.6.4 Resultados. Como resultados finales se obtuvieron las gráficas de envolvente de falla para condiciones saturada y seca (véase figuras 57 y 58). Los valores de cohesión y ángulo de fricción se muestran en la tabla 14. Es importante anotar que el ángulo de fricción tomado para el suelo saturado corresponde a aquel mostrado bajo un esfuerzo normal de 0.17Kg/cm² o 1m de suelo (profundidad promedio de los deslizamientos).

Tabla 14. Resumen resultados ensayo de corte directo.

	Angulo de fricción interna	Cohesión Saturada kg/cm ²
Muestra saturada	44.5	0
Muestra no saturada	38.3	0.18

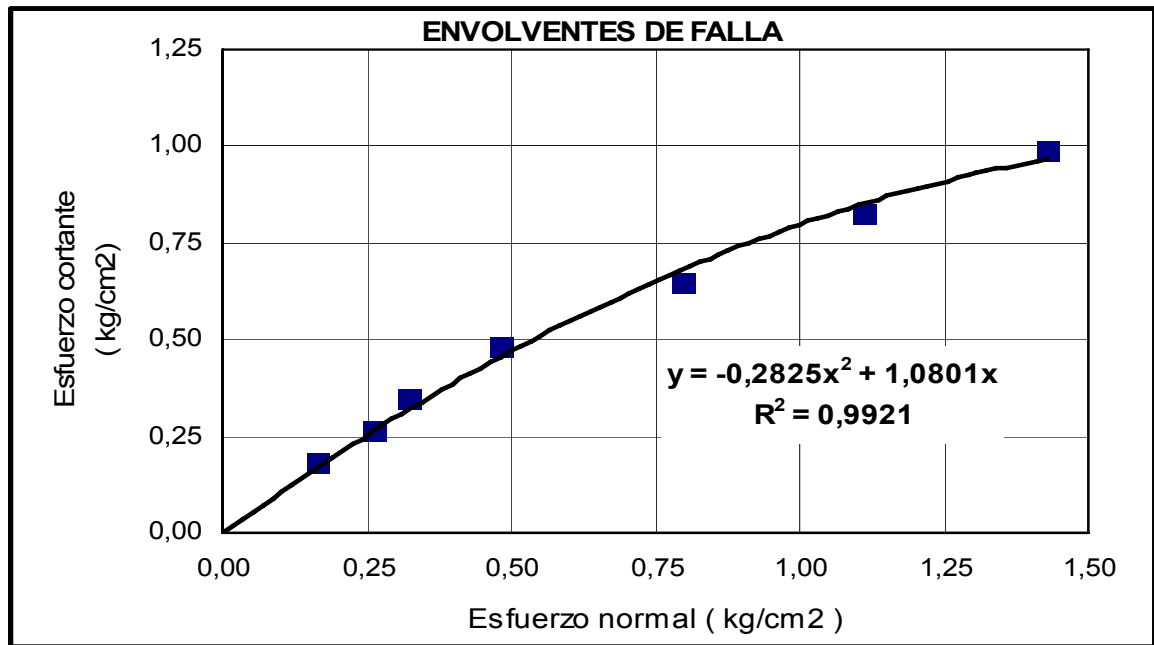
Fuente: Archivo laboratorio investigación.

Figura 57. Envolvente de falla para muestras no saturadas.



Fuente: Archivo laboratorio investigación.

Figura 58. Envolvente de falla para muestras saturadas.



Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.6.5 Conclusiones. Se ensayaron las muestras pertenecientes al manto dos en condición saturada y no saturada. La diferencia en el ángulo de fricción para estas condiciones ocurre debido a los valores de esfuerzo normal a las que fueron ensayadas las muestras. Como se observa en las gráficas de las envolventes, mientras que para la condición saturada se analizaron valores de bajo esfuerzo normal, para el suelo de baja humedad estas condiciones no fueron tenidas en cuenta. Considerando que ante esfuerzos normales bajos puede existir un ángulo de fricción mayor, se explica el motivo por el cual se obtuvo un de ángulo de fricción más elevado para el estado saturado del suelo que para el estado seco. De esta forma, para el desarrollo del estudio, se tomará un ángulo de fricción para ambas condiciones igual a 44.5°.

Debido a los resultados obtenidos se planteó un análisis más profundo de la fracción fina del material, ya que se observa una pérdida total y rápida de la cohesión en el suelo en estado saturado, condición característica de los suelos dispersivos.

4.4.7 Ensayo visual de dispersión del DAWA.

4.4.7.1 Objetivo. La finalidad del ensayo propuesto por el Departamento de Agricultura de Australia Occidental (DAWA) es determinar visualmente el porcentaje de dispersión de un suelo y su posible respuesta ante la aplicación de yeso.

4.4.7.2 Normatividad. El ensayo sigue recomendaciones y parámetros dictados por el DAWA.

4.4.7.3 Metodología. El procedimiento consiste en observar la nube de dispersión que muestra un grumo de suelo de aproximadamente 1cm de diámetro al ser sumergido en agua destilada. El tamaño de la nube es comparado con estándares dados por el DAWA que determinan el grado de dispersión del suelo y su posible respuesta a la adición de yeso (véase figura 59 y tabla 15).

Tabla 15. Ranking de dispersión y respuesta al yeso a diferentes niveles de dispersión de la arcilla.

Ranking	Dispersión (%)	Estabilidad	Respuesta al yeso
0	0	Muy alta	Nula
1	20	Alta	Muy baja
2	40	Moderada	Baja
3	60	Baja	Moderada
4	80	Muy baja	Alta
5	100	Nula	Muy alta

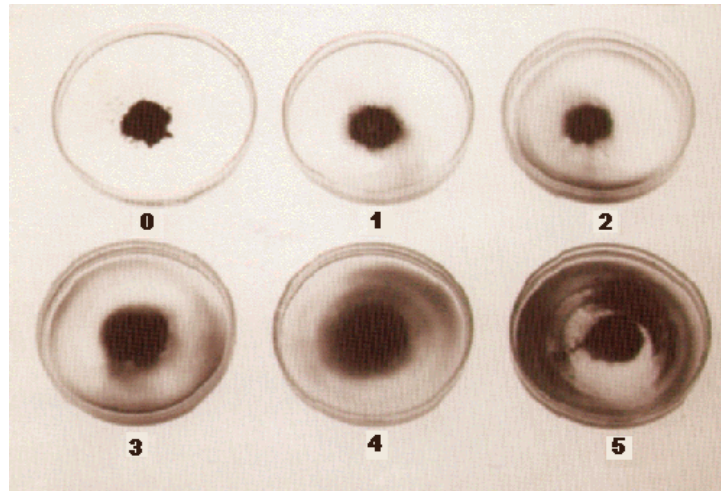
Fuente: DAWA.

4.4.7.4 Resultados. Los resultados obtenidos son meramente cualitativos y se muestran en la figura 60. Al comparar la nube de dispersión formada con los estándares dados por el DAWA se tiene un estimado de entre el 60% y el 80% de dispersión, con una estabilidad de material entre baja y muy baja, según lo cual se esperaría una respuesta a enmiendas de yeso entre moderada y alta.

4.4.7.5 Conclusiones. En el ensayo se muestra el desarrollo de la nube de dispersión en un lapso aproximadamente de 15 minutos. Este tiempo, aunque es inferior al recomendado por el DAWA, permite observar la rápida formación de la nube y la pérdida

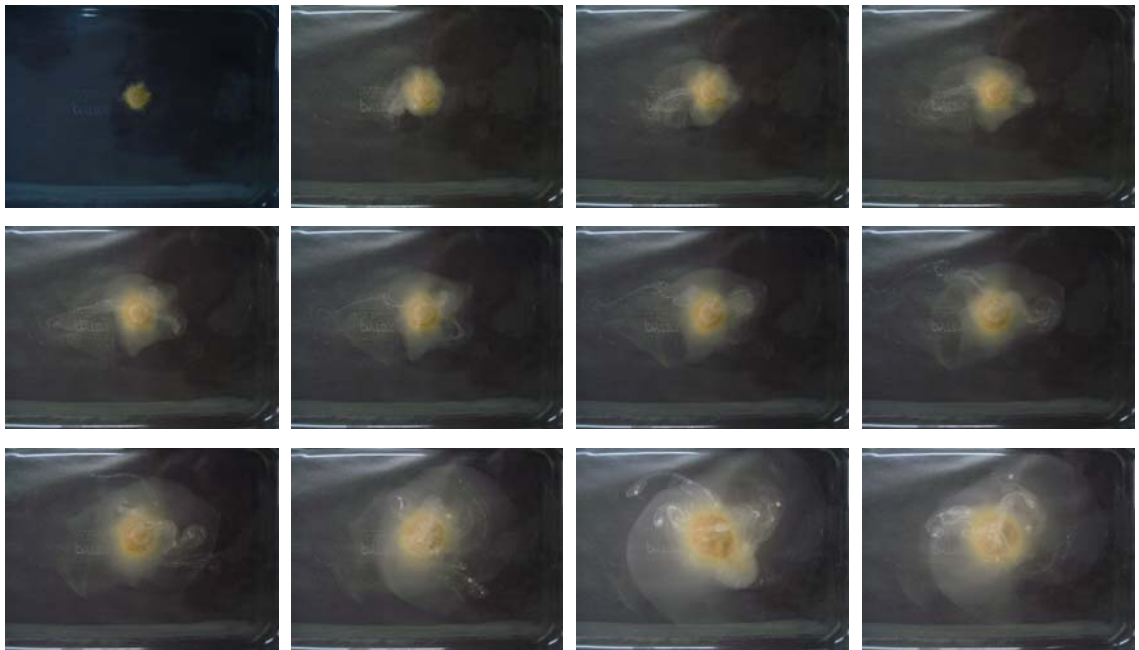
momentánea de resistencia de la partícula al entrar en estado saturado. Lo anterior brinda evidencia del comportamiento dispersivo del suelo encontrado en la cuenca de la quebrada Angulito.

Figura 59. Grado de dispersión en la escala de 0 a 5.



Fuente: DAWA.

Figura 60. Ensayo visual de dispersión del DAWA.



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

Según estos resultados se plantea un posible tratamiento para mejorar la resistencia del suelo mediante la adición de enmiendas de yeso agrícola. Con el fin de corroborar los resultados obtenidos en esta prueba se procedió a realizar ensayos de doble hidrómetro y **pinhole**.

4.4.8 Dispersión por doble hidrómetro.

4.4.8.1 Objetivo. Indicar el potencial de dispersión y susceptibilidad de una muestra de suelo.

4.4.8.2 Normatividad. Corresponde a la norma ASTM D4221-99 (2005) y la metodología propuesta por el **Department of Sustainable Resources** (DSR) de Nueva Gales del Sur (Australia) para pruebas de Porcentaje de Dispersión.

4.4.8.3 Metodología. El procedimiento para realizar la prueba se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se prepara un litro de solución al 25% de hexametáfosfato de sodio.
- En un vaso de precipitado se adicionan 200ml de agua desmineralizada, 20ml de la solución anteriormente preparada y 50gr de suelo pasante tamiz No. 200, y se agita a 15rpm por 16 horas.
- En otro vaso de precipitado se mezclan 50gr de suelo pasante tamiz No. 200 con 200ml de agua desmineralizada, se agita la solución a 15rpm por 10 minutos.
- Se transfiere cada uno de los vasos de precipitado a un cilindro de 1L, adicionando agua desmineralizada hasta completar el volumen. Se agita cada una de las soluciones por 30 segundos para poner el material en suspensión. Luego de esto se toman lecturas del hidrómetro a los 93 minutos de empezada la sedimentación.
- Al mismo tiempo se llenan dos cilindros de 1L, uno con agua desmineralizada y otro con 20ml de la solución de hexametáfosfato y agua destilada. Se toman lecturas del hidrómetro a los 93 minutos (véase figura 61).

El porcentaje de dispersión se determina mediante la ecuación (16):

$$\text{Porcentaje.de.Dispersión} = 100 * \frac{RL - RW}{RP - RD} \quad (16)$$

Donde RL es la lectura del hidrómetro del suelo en suspensión sin dispersante, RP es la lectura del hidrómetro del suelo en suspensión con dispersante, RW es la lectura del hidrómetro en agua desmineralizada y RD es la lectura del hidrómetro del dispersante en solución de agua desmineralizada.

Figura 61. Ensayo de doble hidrómetro.



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

4.4.8.4 Resultados. Véase tabla 16.

Tabla 16. Resultados ensayo de doble hidrómetro.

Cilindros Vol. 1L	Lecturas Hidrómetro (gr/L)	
	1	2
RL	8	6
RP	15	12,5
RW	-1.5	-0,08
RD	5	3
%Dispersión	95%	64%

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.8.5 Conclusiones. Al realizarse el ensayo de doble hidrómetro se comprueban las propiedades dispersivas del suelo de la cuenca de la quebrada Angulito. Según este ensayo dicho suelo presenta una dispersión de entre el 64% y 95%, lo cual lo clasifica como muy dispersivo.

De esta forma, analizando los resultados se concluye que el material es tan dispersivo que no necesita un agente dispersante para que sus partículas se disgreguen, perdiendo estructura al encontrarse en estado saturado.

4.4.9 Percolación en el terreno.

4.4.9.1 Objetivo. Determinar el coeficiente de permeabilidad en campo.

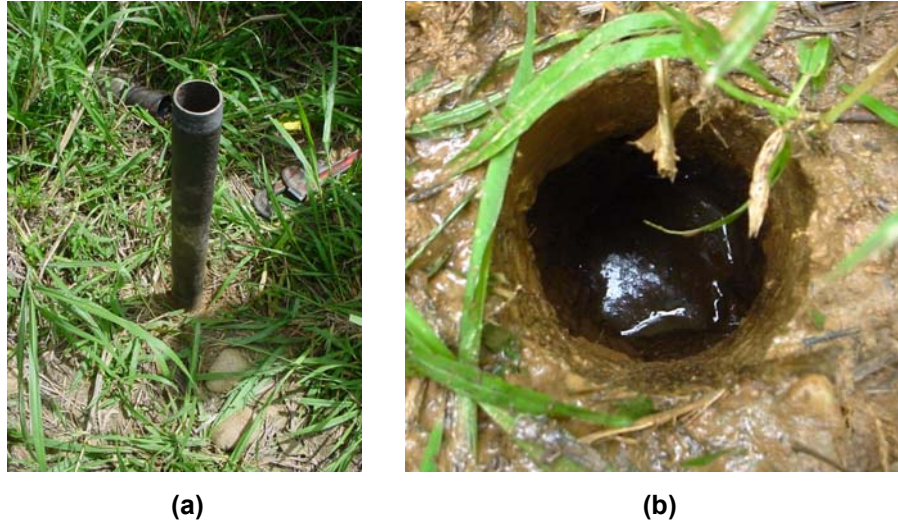
4.4.9.2 Normatividad. Corresponde al ensayo tipo **U.S. Bureau of Reclamations E-18** con cabeza constante.

4.4.9.3 Metodología. Este ensayo consiste en determinar el tiempo de infiltración de un volumen de agua en el suelo. Los pasos a seguir para la prueba se pueden resumir así:

- Mediante un equipo de perforación por percusión, perforar el suelo hasta la profundidad donde se desea realizar el ensayo.
- Instalar un tubo en la perforación, dejando que el borde inferior del mismo quede aproximadamente 10cm por encima del fondo de la perforación (véase figura 62).
- Fijar y medir la cabeza de agua en el tubo.
- Llenar de agua el tubo hasta lograr la cabeza de agua deseada, manteniéndola constante mediante la adición de mas agua. Tomar lecturas de tiempo cada vez que se adicione un volumen de agua conocido.
- Dar por finalizado el ensayo en el momento en que baje considerablemente la tasa de infiltración.
- Con los datos obtenidos en campo, utilizar la expresión (17) para calcular el coeficiente de permeabilidad, en donde R es el radio de la perforación y H es la cabeza de aguautilizada en el ensayo.

$$k = \frac{Q}{5.5 * R * H} (17)$$

Figura 62. Ensayo de percolación: (a) Tubo de perforación fijado para dar inicio al ensayo, (b) Perforación punto 3 después del ensayo.



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

4.4.9.4 Resultados. Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se realizaron pruebas en cuatro puntos diferentes de la cuenca. En dos de dichos lugares se tomó la permeabilidad a nivel superficial y profundo (1m), con el fin de observar posibles variaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados ensayo de percolación.

Permeabilidades de acuerdo a la Localización (cm/s)					
1	2	3		4	
		Profundo	Superficial	Profundo	Superficial
8.9454E-02	3.7530E-03	9.3163E-04	7.2633E-03	1.7092E-02	5.6971E-02

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.9.5 Conclusiones. Al observar los resultados y teniendo en cuenta que todas las perforaciones se realizaron sobre el mismo manto, las variaciones en el coeficiente de permeabilidad son significativas de un lugar a otro, principalmente para las perforaciones 1 y 4 en relación de 2 y 3. Lo anterior puede explicarse considerando que las perforaciones 1 y 4 fueron tomadas sobre suelos muy arenosos no afectados por

deslizamientos, que pueden no ser representativos del sector. De esta forma, como permeabilidad general de la cuenca se tomará el promedio de los valores encontrados en las perforaciones 2, 3-superficial y 3-profunda, lo que brinda como resultado una permeabilidad de $3.92E-3\text{cm/s}$.

Las permeabilidades encontradas son bastante altas, lo que facilita la rápida acción del agua sobre el suelo. Es de igual forma importante observar el grado de disminución en la permeabilidad encontrado a medida que se profundiza en el perfil, donde a profundidades de 1m se muestran disminuciones de entre un 70% y 90%. Debido a esto, durante un evento de precipitación el agua puede penetrar en el suelo más rápido de lo que este la puede desalojar, causando la saturación de los perfiles superiores del suelo y generando un flujo subsuperficial paralelo a la superficie. De esta forma se considera que la permeabilidad encontrada es un factor importante que aumenta enormemente la susceptibilidad de los taludes de la cuenca de la quebrada Angulito a presentar deslizamientos.

4.4.10 Coeficiente de permeabilidad por el método de cabeza variable.

4.4.10.1 Objetivo. Determinar el coeficiente de permeabilidad mediante la metodología de cabeza variable.

4.4.10.2 Normatividad. Este ensayo corresponde con las normas AASHTO T125, INV-E 130 y ASTM D2434.

4.4.10.3 Metodología. La propiedad fundamental del suelo con respecto al flujo de agua es el coeficiente de permeabilidad, k . Este coeficiente es una constante de proporcionalidad que relaciona la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Se fundamenta en la ley de Darcy ($v = k i$), donde k es el coeficiente de permeabilidad e i el gradiente hidráulico.

Luego de relaciones matemáticas es posible llegar a la expresión (18), utilizada para determinar el coeficiente de permeabilidad en el ensayo de carga variable:

$$k = \frac{L \cdot a}{A(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (18)$$

Donde k es el coeficiente de permeabilidad, L la longitud de la muestra, h_1 la altura de carga inicial, h_2 la altura de carga final, t_1 el tiempo en el cual se mide la altura de carga h_1 , t_2 el tiempo en el cual se mide la altura de carga h_2 , A el área de la sección transversal de la masa de suelos y a el área de la sección transversal de la bureta.

Los pasos para llevar a cabo el ensayo de permeabilidad con cabeza variable se resumen así:

- Escoger por cuarteo una muestra representativa de suelo granular seco que contenga menos del 10% de suelo que pase el tamiz No. 200 y en cantidad suficiente para llenar dos veces la cámara del permeámetro.
- Efectuar las medidas del diámetro interior del permeámetro, longitud de la muestra a través de la cual se mide la altura de carga h_1 , área transversal de la bureta y área de la sección transversal de la masa de suelo.
- Colocar en la base del permeámetro una piedra porosa previamente saturada.
- Colocar el suelo en capas de 1.5cm aproximadamente compactándolas con una masa adecuada, teniendo en cuenta escarificar entre capa y capa dejando un borde en la cámara inferior de aproximadamente 2cm.
- Colocar la bureta encima de la muestra ajustándola a un soporte.
- Sellar el conjunto de cámara más bureta, para evitar que el agua se salga en el contacto entre estas dos (véase figura 63).
- Colocar una columna de agua de altura conocida, se abre la válvula de la bureta y se anota el tiempo inicial.
- Se determina la pérdida de cabeza para varias lecturas y se anota el tiempo final.

4.4.10.4 Resultados. Siguiendo las pautas del ensayo se determinó que el coeficiente de permeabilidad para dos muestras pertenecientes al manto 2 fueron 1.956E-6cm/s y 1.895E-6cm/s, lo que corresponde a un valor muy bajo que no coincide con lo observado del ensayo de percolación en campo.

Figura 63. Ensayo de permeabilidad, método de cabeza variable.



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

4.4.10.5 Conclusiones. Se concluye, luego de comparar las permeabilidades encontradas en campo y laboratorio, que esta depende notoriamente de la estructura del suelo, la cual se pierde al ser removido y recompactado dando lugar a valores menores de permeabilidad.

4.4.11 Ensayo de dispersibilidad por tubificación (**pinhole test**).

4.4.11.1 Objetivo. Determinar una medida directa del grado de dispersión de una muestra de suelo compactada y su susceptibilidad a ser tratada mediante enmiendas químicas.

4.4.11.2 Normatividad. El ensayo sigue la norma NLT-207/91.

4.4.11.3 Metodología. Es un ensayo cualitativo que consiste fundamentalmente en hacer circular agua a través de un pequeño orificio realizado en el eje longitudinal de una

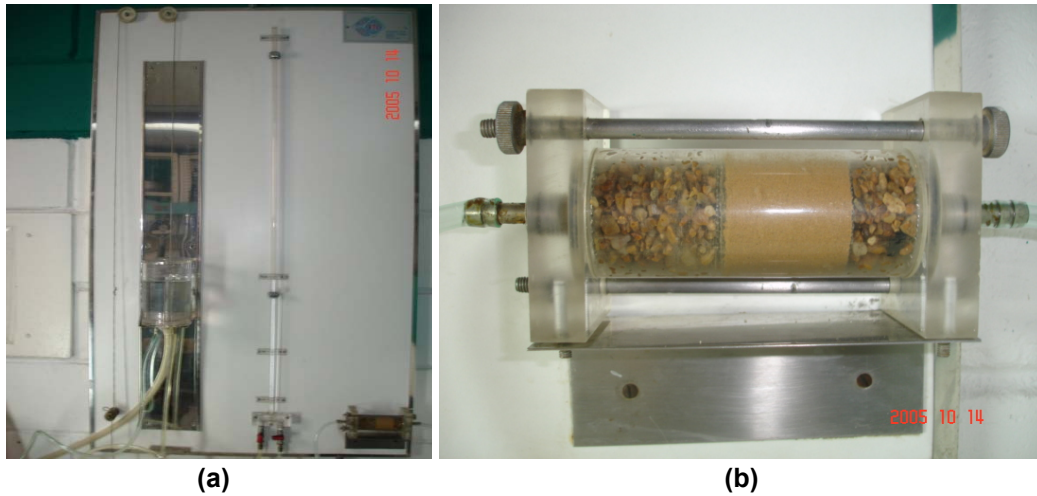
muestra, observando el material coloidal arrastrado y controlando el caudal que circula mediante un sistema de cabeza constante.

El procedimiento del ensayo se puede resumir en los siguientes pasos:

- Tamizar suficiente material por el tamiz No. 40 para elaborar 3 o 4 cápsulas.
- Humedecer el material con el fin de compactarlo.
- Se compacta la muestra en cinco capas dando 12 golpes por capa con una masa tipo **Army**.
- Se perfora la muestra longitudinalmente con la aguja del equipo.
- En los extremos de la muestra se colocan rejillas (dos en cada cara) y se rellena con un material granular hasta los toques de la cápsula de compactación (véase figura 64a).
- Se ensambla la camisa con la muestra compactada en el equipo y se da paso al agua con las válvulas cerradas para fijar una cabeza de agua de 50mm (véase figura 64b).
- Se da paso al agua y se observa su turbidez tomando lecturas de volumen cada dos, cuatro, cinco, seis, ocho y diez minutos.
- Si al cabo de 10 minutos para la cabeza de 50mm el agua se manifiesta turbia, se da por terminado el ensayo y se observa el orificio, que deberá haber aumentado considerablemente su diámetro. Se concluye con este resultado que el material ensayado se comporta como una arcilla dispersiva.
- Si al cabo de 10 minutos para la cabeza de 50mm el agua se manifiesta clara, se aumenta el nivel piezométrico hasta la marca de 180mm y se vuelven a tomar lecturas de tiempo y de volumen. Si lo mismo vuelve a ocurrir se debe aumentar nuevamente el nivel y repetir el ensayo.

En el presente estudio se realiza el ensayo de **pinhole** a muestras tratadas con yeso agrícola con el fin de verificar su efecto en la reducción de las propiedades dispersivas del suelo. En este caso se trata la muestra de suelo con concentraciones en peso del 0.5% y 1% de yeso.

Figura 64. Desarrollo ensayo de pinhole: (a) Equipo del ensayo, (b) Cápsula.























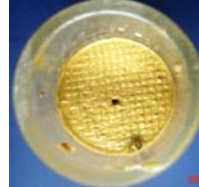
Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

4.4.11.4 Resultados. Los resultados generales y la realización del ensayo se muestran en las figuras 65 y 66.

4.4.11.5 Conclusiones. Siguiendo la metodología de esta prueba se ensayaron muestras con diferentes humedades al igual que muestras tratadas mediante agentes químicos. Tomando como recomendación algunos estudios realizados anteriormente se seleccionó el yeso como el mejorador químico a utilizar para solucionar los problemas de dispersión detectados en las pruebas realizadas anteriormente al suelo. Se aplicaron concentraciones del 0.5% y 1% a muestras de suelo para ser probadas mediante este ensayo.














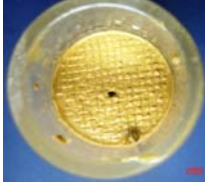
Como se observa en el ensayo, las características dispersivas del suelo de la cuenca de la quebrada Angulito son fuertes. Luego del ensayo de **pinhole** sobre la muestra sin tratar, se observa un aumento en el diámetro del orificio cercano a 4mm y el agua sigue saliendo muy turbia después de 10 minutos bajo una cabeza de agua de tan sólo 50mm.

Figura 65. Ensayo PINHOLE con nivel piezométrico de 50mm.

Tiempo (min)	SUELO SIN TRATAMIENTO	SUELO CON YESO 0,5%	SUELO CON YESO 1,0%
2			
4			
5			
6			
8			
10			
Orificio después del ensayo			

Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

Figura 66. Ensayo de PINHOLE con nivel piezométrico de 380mm.

Tiempo (min)	SUELO CON YESO 0,5%	SUELO CON YESO 1,0%
2		
4		
5		
6		
8		
10		
Orificio después del ensayo		

Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

Una vez tratado el material con yeso agrícola sus propiedades mejoran enormemente. Con una aplicación de 0.5% de yeso el material mantiene el diámetro del orificio prácticamente constante, sobrepasando sin presentar turbidez un nivel piezométrico de 180mm. Una aplicación de 1% de yeso mantiene el agua clara incluso para niveles piezométricos superiores a 380mm.

Se considera que una adición de yeso en un 0.5% resulta beneficiosa hasta cierto punto, ya que al aumentar el nivel piezométrico en el ensayo hasta un valor de 380mm comienza a aparecer de nuevo la turbidez en el agua. Por esta razón se recomienda una adición de enmienda de yeso al 1% en peso para solucionar los problemas dispersivos que presentan los suelos de la cuenca de la quebrada Angulito.

4.4.12 Determinación del pH de los suelos.

4.4.12.1 Objetivo. Determinar el pH de muestras pertenecientes al manto 2 (nivel superior miembro Órganos).

4.4.12.2 Normatividad. Se siguen las recomendaciones del ICA y CENICAFÉ.

4.4.12.3 Metodología. Se prepara una suspensión de suelo 1:1 usando agua destilada y se agita periódicamente durante una hora. Una vez finalizada la agitación se toman lecturas de pH con el potenciómetro de electrodo de vidrio.

4.4.12.4 Resultados. Las muestras analizadas y los resultados obtenidos se muestran en la figura 67 y la tabla 18. La localización de la extracción de dichas muestras se puede observar en la figura 68.

Tabla 18. Valores de pH para las muestras de la figura 67.

4.76	4.88	5.08
5.84	5.85	6.1
6.35	6.73	7.35

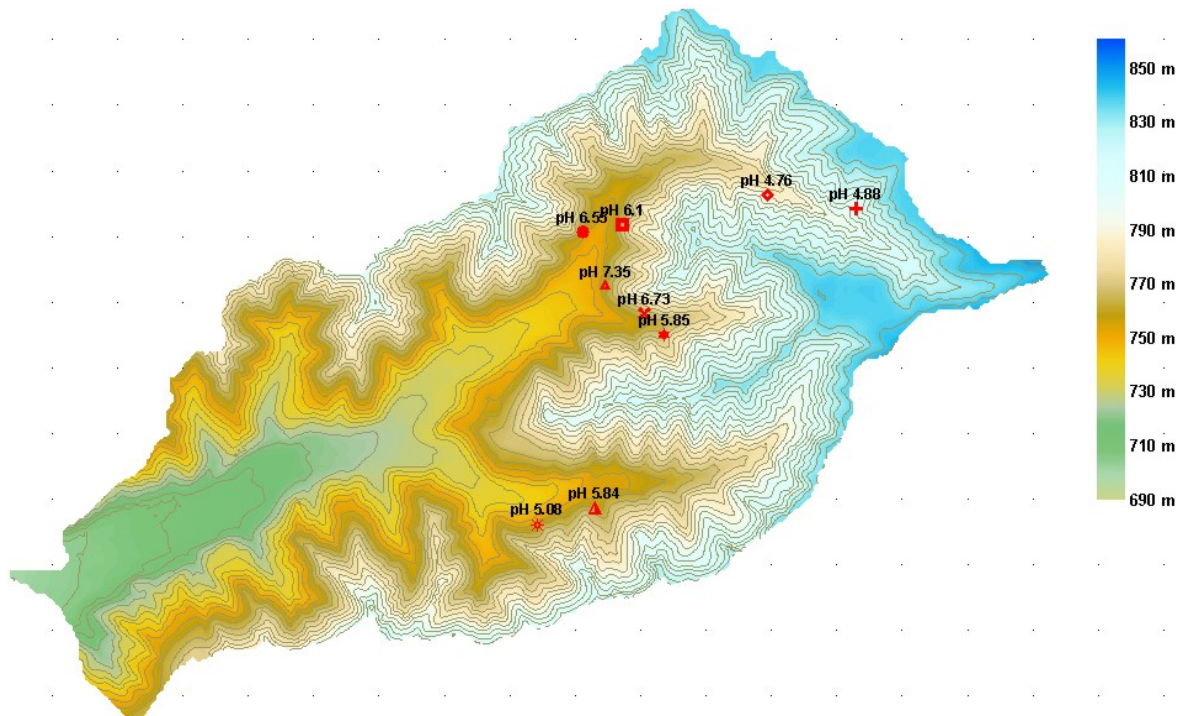
Fuente: Archivo laboratorio investigación.

Figura 67. Soluciones de suelo para determinación de pH.



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

Figura 68. Ubicación de los sitios de muestreo para evaluación de pH.



Fuente: Archivo digital investigación.

4.4.12.5 Conclusiones. Los suelos de la cuenca tienden a mostrar un pH relativamente alto, donde se muestran valores de hasta 7.35. Tal como se ha tratado anteriormente ...véase numeral 2.2.4... la dispersión en el suelo tiende a presentarse cuando este muestra valores altos de pH.

Al relacionar la figura 67 con la tabla 18 es posible apreciar que a medida que aumenta el valor de pH (de izquierda a derecha y de arriba abajo) se presenta una mayor turbidez en la solución, que es un buen indicativo del grado de dispersión.

4.4.13 Contenido de cationes intercambiables.

4.4.13.1 Objetivo. Determinar la concentración de algunos cationes intercambiables en los suelos de la cuenca de la quebrada Angulito.

4.4.13.2 Normatividad. Se siguen recomendaciones del ICA y CENICAFÉ.

4.4.13.3 Metodología. Cuando una muestra de suelo es colocada en la solución de una sal como el acetato de amonio, se produce una adsorción de iones amonio con desplazamiento de una cantidad equivalente de cationes hacia la solución. Esta reacción se llama intercambio de cationes y los cationes desplazados se conocen como cationes intercambiables. La cantidad de cationes intercambiables que un suelo puede retener se denomina capacidad de intercambio catiónico y generalmente se expresa en miliequivalentes por 100 gramos de suelo.

Para la determinación de este parámetro se utilizó la solución normal de acetato de amonio. Su procedimiento se puede resumir en los siguientes pasos:

- Preparar solución de acetato de amonio 1.0 N.
- Preparar solución de etanol al 95%.
- Preparar una solución de acetato de sodio 1.0 N.
- Pesar 4g para suelos de textura media o fina y 6g para suelos de textura gruesa.
- Colocar la muestra en un tubo de centrifuga y agregar 33ml de la solución de acetato de sodio, agitando por 5 minutos.

- Centrifugar por 5 minutos a 1000 r.p.m. para que el líquido quede claro, se decanta y se desecha.
- Agregar 33ml de solución de etanol al tubo, tapar y agitar por 5 minutos, luego destapar y centrifugar hasta que el líquido quede claro.
- Lavar la muestra tres veces con 33ml de solución de etanol.
- Determinar la concentración de cationes intercambiables de los extractos.

Culminado el procedimiento descrito anteriormente, el cálculo de la capacidad intercambio catiónico (CIC) se realiza con la ecuación (19).

$$\text{CIC m.e./100gr} = \frac{\text{concentración de cationes en el extracto en m.e./lt}}{\text{peso de la muestra en gr}} \quad (19)$$

Para la determinación del porcentaje de sodio intercambiable (ESP) se utilizó el contenido de sodio que se encontró en cada muestra (valor suministrado por las pruebas químicas de suelo realizadas en el Laboratorio Químico de Suelos de la gobernación de Santander), dividido por la CIC, como se expresa en la ecuación (20).

$$\text{ESP}(\%) = \frac{\text{concentración sodio m.e./100g suelo}}{\text{CIC m.e./100g suelo}} \quad (20)$$

4.4.13.4 Resultados. En la determinación de este parámetro se utilizaron 6 muestras de suelo pertenecientes al manto 2 (nivel superior miembro Órganos) de la quebrada Angulito. Los resultados arrojados se muestran en la tabla 19.

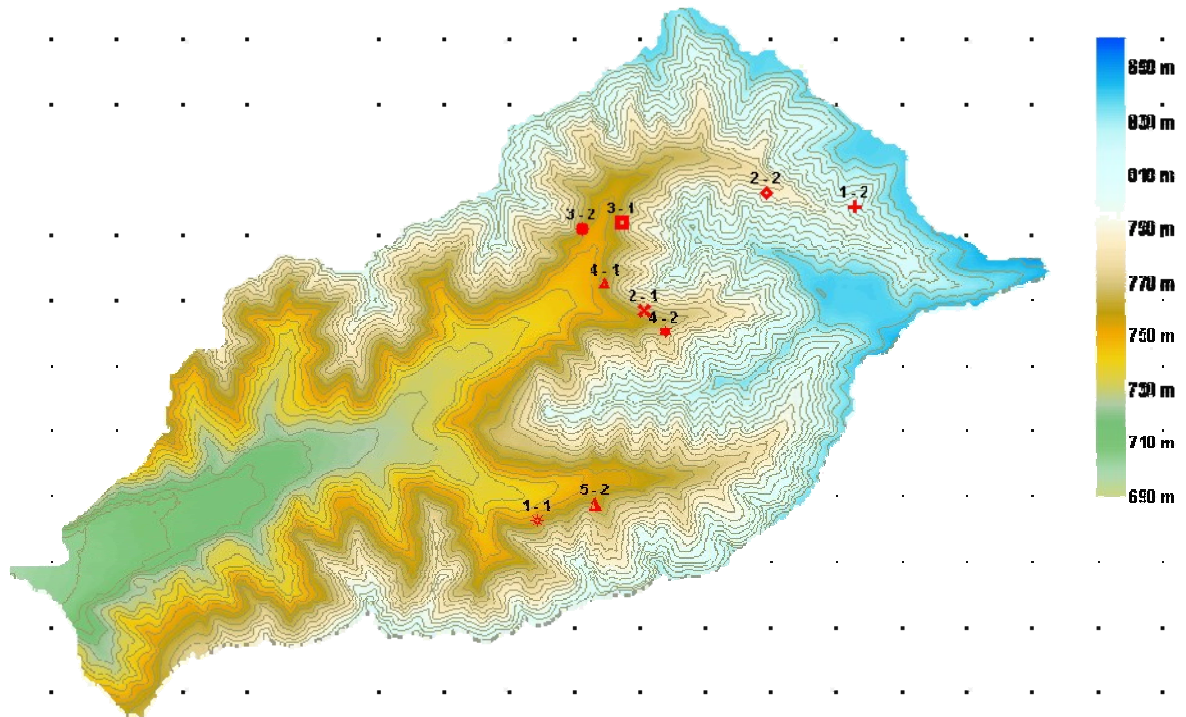
Tabla 19. Resumen caracterización química de muestras del manto 2.

	Muestra	pH	CIC m.e./100g	[Ca] m.e/100g	[Na] m.e/100g	ESP (%)
Primera Extracción	1	5	8	1.45	0.15	1.88%
	2	6.7	10	9.56	0.55	5.50%
	3	6.1	7	3.29	0.6	8.57%
	4	7.2	7	4.77	1.11	15.86%
Segunda Extracción	1	4.88	NP	NP	NP	NP
	2	4.76	NP	NP	NP	NP
	3	6.2	8	6.73	0.56	7.00%
	4	5.6	7	3.95	0.17	2.43%
	5	5.85	NP	NP	NP	NP

Fuente: Archivo laboratorio investigación.

En la figura 69 se encuentra la ubicación de los sitios de extracción de estas muestras.

Figura 69. Ubicación de los sitios de muestreo para evaluación de ESP (extracción-muestra).



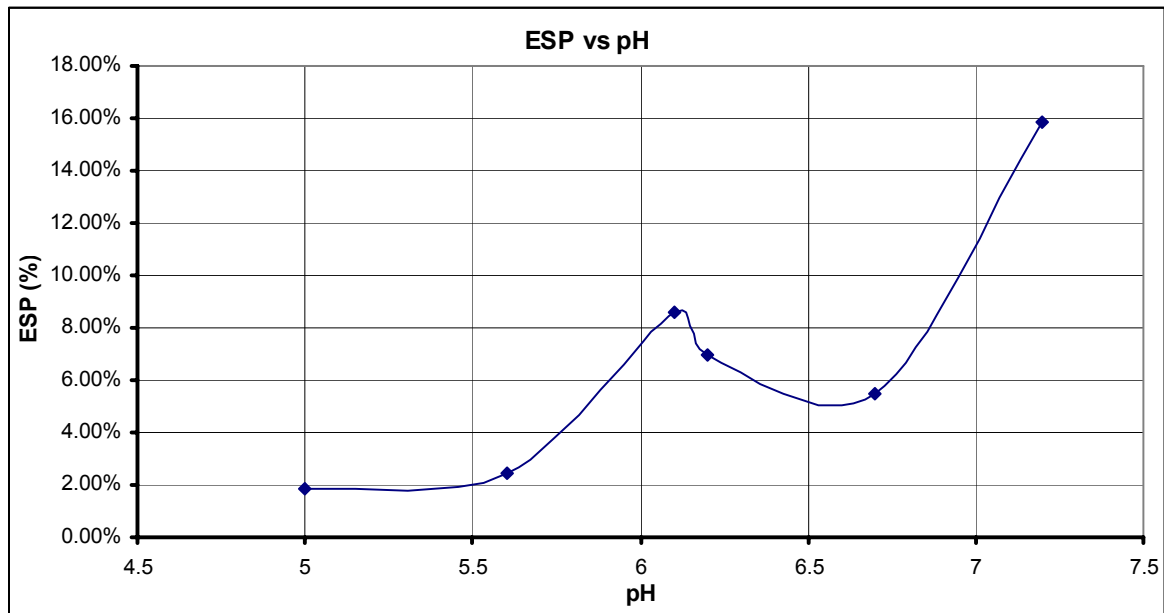
Fuente: Archivo digital investigación.

4.4.13.5 Conclusiones. Los valores de ESP presentados en la cuenca son bastante elevados ...véase numeral 2.2.1..., lo que justificaría la aparición de problemas de dispersión. De esta forma se tiene que el suelo de la cuenca de la quebrada Angulito, además de poseer pequeños porcentajes de smectita, presenta altos contenidos de sodio intercambiable, que en conjunto causarían la rápida pérdida de resistencia presentada al saturarse el suelo y que produjo los deslizamientos que terminaron por generar los flujos de detritos en la cuenca. Se debe mencionar también que los bajos contenidos de calcio facilitan la fijación del sodio intercambiable en las partículas de arcilla.

Al observar la figura 70 se concluye que existe una relación entre el ESP y el pH del suelo, lo que permitiría detectar posibles valores de ESP elevados mediante análisis

económicos de pH. A medida que el pH aumenta se espera igualmente un aumento en el valor de ESP en los suelos de la cuenca y por ende un porcentaje de dispersión mayor.

Figura 70. Relación de ESP y pH en los suelos de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo laboratorio investigación.

4.4.14 Otros ensayos químicos del suelo.

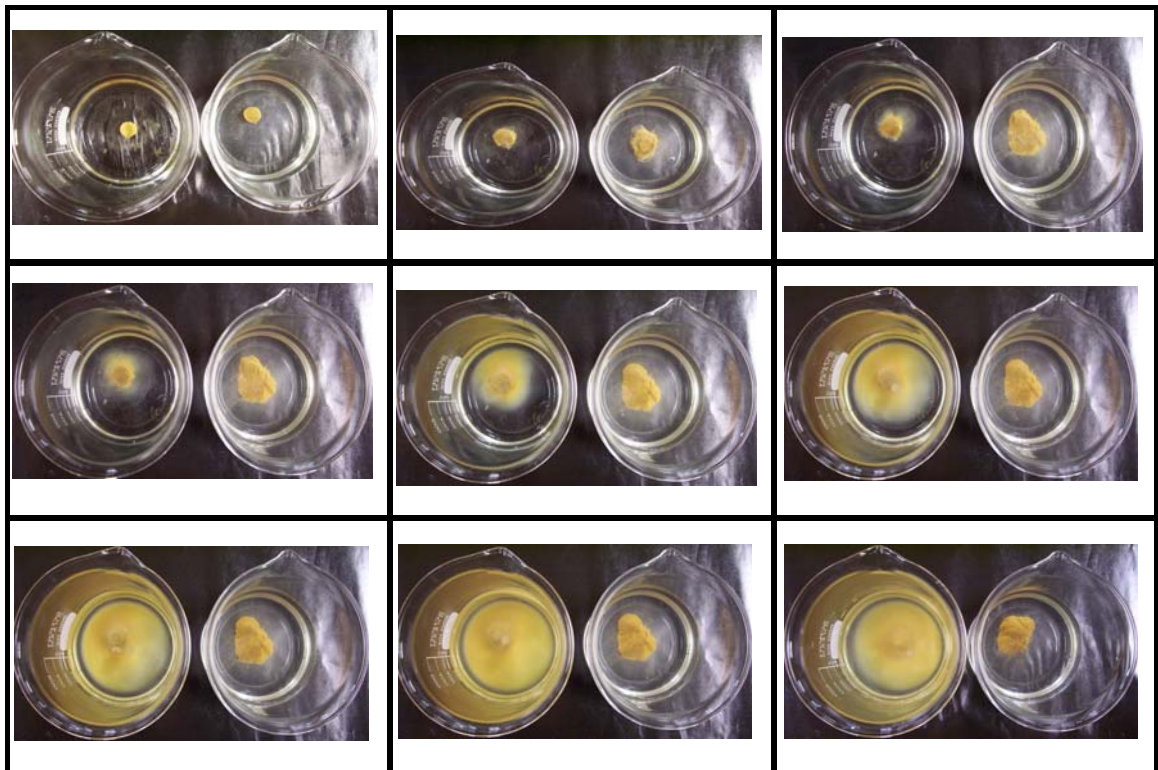
Para complementar el estudio se realizó una prueba propuesta por el DSR de Nueva Gales del Sur conocida como **Emerson Test**. La prueba fue modificada con el fin de corroborar el cambio en el comportamiento de un suelo al encontrarse en una solución con alto contenido de electrolitos.

De esta forma se procedió a introducir dos partículas de suelo en vasos de precipitado. Uno de estos vasos contenía agua destilada mientras que en el otro se encontraba una solución al 1% de agua destilada y cloruro de calcio. Durante el ensayo (véase figura 71) se observó que, tal como afirma la teoría, al encontrarse el suelo de la cuenca de la quebrada Angulito, altamente dispersivo, en una solución cargada de electrolitos, el efecto de la dispersión desaparece y el material permanece floculado. Este comportamiento se demuestra en el ensayo por la desaparición de la nube de dispersión en la solución de cloruro de calcio.

Aunque puede considerarse que el cloruro de calcio actúa de manera eficaz contrarrestando la dispersión en un suelo, su aplicación como enmienda no es económicamente viable.

En el ensayo solo se muestra el efecto inmediato de la aplicación de enmiendas liberadoras de iones calcio, que consiste simplemente en aumentar la concentración de electrolitos en el agua de solución impidiendo que las partículas finas se dispersen. Con el tiempo, la adición de la enmienda permitirá el reemplazo de los iones sodio presentes en la arcilla por iones calcio que, al presentar una mayor valencia, brindarán al suelo una mayor estabilidad.

Figura 71. Prueba de Emerson en agua destilada (izquierda) y solución de cloruro de calcio al 1% (derecha).



Fuente: Archivo fotográfico laboratorio investigación.

4.4.15 Conclusiones principales caracterización geotécnica.

Luego de realizar los ensayos sobre materiales de la zona se encontró que el suelo perteneciente al nivel superior del miembro Órganos posee propiedades que lo hacen altamente susceptible a presentar deslizamientos. Dichas características, que se considera influyeron en gran medida en los deslizamientos ocurridos en Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, y algunas de las conclusiones más importantes de la caracterización geotécnica se explican a continuación:

- El material posee bajos porcentajes de material fino, sin embargo este le aporta gran parte de su resistencia a manera de cohesión.
- El bajo contenido de material fino brinda al suelo una alta permeabilidad. Esta se encuentra en un punto tal que permite que el agua lluvia se infiltre más rápidamente de lo que esta puede ser desalojada, facilitando la saturación del suelo y la aparición de flujos subsuperficiales.
- El material presenta una alta resistencia en estado seco, pero esta se reduce drásticamente al entrar en contacto con agua.
- La pérdida casi instantánea de resistencia del suelo es causa de sus propiedades dispersivas.
- El suelo de la cuenca presenta una alta a muy alta dispersión, con porcentajes que superan en ocasiones el 90%.
- Las propiedades dispersivas del suelo se presentan por las siguientes razones: contenido de smectita, altas concentraciones de sodio intercambiable (llegando a valores de ESP mayores al 15%), bajos niveles de calcio y el bajo contenido de materia orgánica.
- El clima seco de la zona facilita la formación de taludes de alta pendiente que pueden luego fallar durante eventos de precipitación extraordinaria.
- Los problemas de dispersión del suelo pueden ser prácticamente eliminados mediante la adición de enmiendas de yeso agrícola. Se recomienda su aplicación en concentraciones del 1%.

5. ELABORACIÓN DE MODELOS DIGITALES

Buscando una mayor comprensión de los eventos presentados durante Febrero de 2005 en Girón, Santander, se propone la elaboración de algunos modelos digitales que simulen lo allí ocurrido. Una vez elaborados y calibrados dichos modelos será posible llegar a estimar los niveles que pudiese llegar a exhibir un evento de diferente magnitud y condiciones similares, ya sea en el mismo sector o en cuencas aledañas.

En el presente estudio se plantea la realización y calibración de los siguientes modelos:

- Modelo digital de deslizamientos presentados en la cuenca de la quebrada Angulito en Febrero de 2005.
- Modelo hidrológico de la cuenca para la determinación de niveles de escorrentía presentados durante el evento de precipitación.
- Modelo hidráulico del recorrido del flujo en la cuenca.

5.1 MODELO DE DESLIZAMIENTOS

Con el objetivo de profundizar en el análisis realizado al fenómeno de flujos ocurrido durante Febrero de 2005 en el municipio de Girón, departamento de Santander, se plantea la realización de un modelo de deslizamientos que ayude en la delimitación de aquellas partes de la cuenca especialmente susceptibles a desprendimientos de material.

Lo anterior se realiza con tres propósitos fundamentales:

- Estimar de una manera rápida y sencilla la cantidad posible de material que puede llegar a desprenderse debido a una precipitación determinada.
- Establecer y delimitar los sectores de la cuenca que poseen un mayor peligro debido a la presencia de deslizamientos.
- De acuerdo a la cantidad de material desprendido y los niveles de agua de escorrentía, caracterizar los flujos presentados durante el fenómeno.

Con el fin de facilitar la elaboración del modelo se optó por representar la cuenca de la quebrada Angulito mediante un sistema raster. La elaboración y las características del modelo digital de elevación que se utilizará como base para la realización del modelo de deslizamiento ya se ha mostrado anteriormente ...véase numeral 4.1.1... Se debe entender que cada uno de los planos desarrollados de acuerdo a los pasos dados durante la elaboración del modelo de deslizamientos posee el mismo tamaño de celdas que el MDE (5x5m).

5.1.1 Consideraciones teóricas.

En primer lugar es primordial apreciar la importancia que adquiere la topografía tanto en la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de precipitación como en la posible presencia de deslizamientos en la zona. De acuerdo al tipo de topografía que se muestra se puede llegar a estimar el grado de saturación del suelo, al igual que el movimiento del flujo subsuperficial y la aparición de deslizamientos.

Implementando lo anterior se hace importante establecer métodos de estimación del comportamiento hidrológico de la cuenca, haciendo especial énfasis en el flujo subsuperficial y en la estabilidad de los taludes presentes en ella.

5.1.1.1 Agua subterránea. El comportamiento y estabilidad de las laderas al igual que la remoción del material de la cuenca depende en gran medida de la saturación presente en el suelo. Teniendo en cuenta que prácticamente la totalidad de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada Angulito son del tipo traslacional de baja profundidad, el grado de saturación de las capas superficiales (menores o iguales a un metro), se hace aún más importante.

Según Beven⁵¹, considerando un flujo subsuperficial aproximadamente paralelo a la superficie del terreno en un medio saturado, la velocidad de Darcy (velocidad por unidad de área en la dirección al flujo) puede ser simplificada, en relación a descripciones más complejas de este tipo de flujo, y expresada de la siguiente forma:

$$v_x = K_s \sin \theta \quad (21)$$

⁵¹ BEVEN, Keith. Rainfall-Runoff Modeling, The primer. England: John Wiley, June 2003. p. 140.

Donde v_x representa la velocidad de Darcy medida en dirección a la pendiente, K_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo y θ el ángulo de inclinación de este.

De acuerdo a este autor la anterior ecuación, conocida como modelo de onda cinemática, es una aproximación bastante útil para la descripción del comportamiento de un flujo subsuperficial de poca profundidad sobre una capa impermeable para el caso de pendientes elevadas y altas conductividades hidráulicas.

Analizando la anterior afirmación se puede concluir que dicha ecuación puede ser implementada para el caso de la cuenca de la quebrada Angulito. En dicha cuenca se presentan capas superficiales de suelo de alta permeabilidad, llegando incluso a valores de 0.09cm/s en algunos sectores.

Aunque no se presenta ninguna capa impermeable apreciable, de acuerdo a observaciones realizadas sobre el tipo de material (miembro Órganos superior de la formación Bucaramanga) por la empresa Geotecnología Ltda.⁵², éste tipo de suelos suele presentar zonas saturadas superficiales de espesor no mayor a 1.0m. De igual forma, se hace mención del retorno del agua mayoritariamente por medio de evapotranspiración y muy poco por niveles freáticos. En los ensayos realizados en campo ...véase numeral 4.4.9... se aprecia una reducción marcada en la permeabilidad a medida que se profundiza en el perfil, lo que puede explicar hasta cierto punto este comportamiento.

La presencia de zonas saturadas de baja profundidad puede ser igualmente explicada teniendo en cuenta las características dispersivas del material arcilloso presente en la matriz. En suelos dispersivos de este tipo es normal encontrar un aumento drástico en el contenido de arcillas dispersivas a medida que se profundiza en el perfil y se superan las capas más superficiales de suelo.

⁵² GEOTECNOLOGÍA. Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen I: Geología y Geotecnia, Op. cit., p. 43.

Lo anterior ocasiona una disminución drástica de la permeabilidad a medida que la profundidad aumenta, generando un efecto similar a una capa permeable de suelo sobrepuesta a una impermeable de poca profundidad. Según el Departamento de Industrias Primarias de Victoria, Australia⁵³, en suelos dispersivos de elevada pendiente suele ocurrir un movimiento lateral de agua sobre esta última capa, prácticamente impermeable, en conjunto a un reducido movimiento de agua en sentido vertical.

Considerando a h_{wi} como el espesor de la zona saturada, la ecuación (21) puede expresarse como:

$$q_i = K_s h_{wi} \sin \theta \quad (22)$$

Donde q_i representa el flujo en sentido de la pendiente por unidad de ancho en un punto dado i y K_s es la conductividad hidráulica del suelo.

Cuando se presenta un evento de precipitación ocurre en el sistema un flujo lateral de agua. De esta manera el contenido de agua en el suelo aumenta de acuerdo a la recarga en el sentido de la pendiente. Para un punto dado i ubicado en la cuenca, existirá un área de esta, a_i , la cual aportará flujo a dicho punto. Esta área será llamada área de aporte o captación.

Considerando la rata de recarga vertical como R , el flujo subsuperficial por unidad de ancho en un punto i que posee un área de aporte a_i será igual a:

$$q_i = R a_i \quad (23)$$

Según Dietrich⁵⁴, el término R de la ecuación anterior puede ser considerado como la precipitación-evapotranspiración-drenaje profundo. En este análisis R será llamado simplemente precipitación.

⁵³ DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES (DPI). Soil Glossary [online]. [Victoria, Australia]: DPI, 2005. Available from internet: <http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/gloss_DG>

⁵⁴ DIETRICH, W. Erosion Thresholds and Landsurface Morphology, cited by ISTANBULLUOĞLU, Erkan. Evaluation of Precipitation Thresholds for Ground Saturation & Slope Stability [online]. [Utah,

Igualando las ecuaciones (21) y (22) y despejando de estas el espesor de la zona saturada se obtiene:

$$h_{wi} = \frac{Ra_i}{K_s \sin \theta} \quad (24)$$

Considerando a h como el espesor perpendicular a la superficie de la capa permeable de suelo, se puede observar que en cualquier punto i en el cual h_{wi} supere a h_i ocurrirá un flujo por escorrentía Q_i . Esta escorrentía se encuentra dada por:

$$Q_i = Ra_i - K_s h_i \sin \theta \quad (25)$$

Se debe entender que cada punto de la cuenca necesitará de una recarga o precipitación diferente para alcanzar un estado de saturación, debido a las diferencias existentes entre sus áreas de aporte. Para obtener una ecuación que represente la precipitación necesaria para la saturación del suelo se puede igualar el caudal de escorrentía Q_i a 0 en la ecuación (25). De esta manera se obtiene:

$$R = \frac{K_s h_i \sin \theta}{a_i} \quad (26)$$

En dado caso que se llegase a presentar una precipitación mayor a R en la cuenca, se producirá un caudal por escorrentía en el punto analizado.

Se debe considerar igualmente que el área de aporte de un punto dado i , a_i , es sólo cierta si la recarga actúa durante un periodo de tiempo lo suficientemente prolongado como para que el agua infiltrada en el punto más lejano de esta logre drenar por el punto analizado. Cuando esta condición se logra, se obtiene un estado de equilibrio de drenaje subsuperficial. Generalmente la recarga no actúa por un tiempo lo suficientemente largo como llegar a este estado de equilibrio en toda la cuenca. Debido a lo anterior, para la

United States of America]: Utah State University, 2001. Available from internet: <<http://hydrology.neng.usu.edu/giswr/archive99/termperkan/tp.htm>>.

mayoría de los puntos sus áreas de captación no actuarán de manera completa y sólo una porción de estas les aportará flujo subsuperficial.

Con el fin de expresar lo anterior y determinar el tiempo necesario de recarga para alcanzar un estado de equilibrio de drenaje en la cuenca, es posible utilizar la ecuación de velocidad intersticial de flujo subsuperficial v , según lo propuesto por Barling⁵⁵, de acuerdo a lo siguiente:

$$v = \frac{K_s}{\eta} \tan \theta \quad (27)$$

Donde η representa la porosidad efectiva del suelo y $\tan \theta$ puede ser aproximado a $\sin \theta$.

De esta manera y considerando a a_i como el área de captación por unidad de ancho, el tiempo de recarga necesaria para alcanzar un estado de equilibrio de drenaje es igual a:

$$t_i = \frac{a_i}{\frac{K_s}{\eta} \sin \theta} \quad (28)$$

Donde para un tiempo de recarga $t < t_i$ el área de aporte para un punto i es igual a $a < a_i$. En este estudio, dado un tiempo de recarga t , se tomará para aquellos puntos que posean $t_i > t$ un área de aporte máxima a_{\max} dada por la siguiente ecuación:

$$a_{\max} = t \frac{K_s}{\eta} \sin \theta \quad (29)$$

5.1.1.2 Estabilidad de laderas. Según Suárez⁵⁶, para el caso de deslizamientos donde la superficie de falla se muestra paralela a la superficie del terreno a poca profundidad y donde el espesor de la falla es pequeño en relación a su longitud, es posible implementar la ecuación de talud infinito.

⁵⁵ BARLING, R. A Quasi-dynamic Wetness Index for Characterizing the Spatial Distribution of Zones of Surface Saturation and Soil Water Content, cited by ISTANBULLUOGLU, Op. cit.

⁵⁶ SUÁREZ. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Op. cit., p.128.

Considerando que lo anterior describe a la perfección prácticamente la totalidad de los deslizamientos presentados en la cuenca de la quebrada Angulito en Febrero de 2005, es posible concluir que la implementación de tal ecuación (talud infinito) puede ser utilizada de manera precisa aproximada para el caso de este estudio.

De acuerdo a esto, el factor de seguridad para los taludes presentes en la cuenca de la quebrada Angulito puede ser hallado como:

$$FS = \frac{\frac{C}{\gamma_s h} + (1 - wr) \cos \theta \tan \phi}{\sin \theta} \quad (30)$$

Donde FS representa el factor de seguridad, C la cohesión del suelo, w la humedad relativa del suelo, r la relación entre la densidad del agua y del suelo, y ϕ el ángulo de fricción de este último. Estos factores pueden expresarse de la siguiente forma:

$$w = \frac{h_w}{h} = \frac{Ra}{K_s h \sin \theta} \quad (31)$$

$$r = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad (32)$$

γ_w y γ_s representan las densidades del agua y el suelo respectivamente.

Se ha mencionado con anterioridad la alta susceptibilidad de los suelos presentes en la cuenca de la quebrada Angulito ante la acción del agua, debido a la cual pierden rápidamente toda su cohesión ...véase capítulo 2... Debido a lo anterior, el estudio de dicho cambio y su implementación en las diversas ecuaciones de estabilidad adquiere mucha importancia.

Conociendo que la cohesión tiende a mostrar cambios menos significativos a valores bajos de saturación, disminuyendo rápidamente a medida que el grado de saturación aumenta, esta puede ser representada mediante una función con pendiente negativa decreciente. Con el fin de facilitar cálculos y permitir una solución algebraica de las

ecuaciones, la cohesión será representada mediante una función cuadrática de la humedad relativa del suelo.

Se conoce que la cohesión muestra su mayor valor cuando el suelo se encuentra totalmente seco, y cae a 0 en el caso de saturación total y humedad relativa igual a 100%. De esta manera la cohesión puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$C = C_s(1 - w^2) \quad (33)$$

Donde C_s representa la cohesión para suelo seco o cohesión máxima. La anterior ecuación puede ser igualmente ilustrada de manera gráfica (véase figura 72).

Aunque la anterior relación puede ser representada de manera más precisa mediante la implementación de otro tipo de funciones, se considera que su aplicación en las ecuaciones de estabilidad de taludes genera demasiadas dificultades. Esto debido a que se haría necesaria la aplicación de metodologías numéricas del tipo iterativo para la solución de las ecuaciones y, considerando que se espera analizar sistemas raster con más de 150000 celdas, este tipo de metodología requeriría de un espacio de tiempo demasiado prolongado para su ejecución.

De esta forma, reemplazando la ecuación (33) en la ecuación (30) se obtiene lo siguiente:

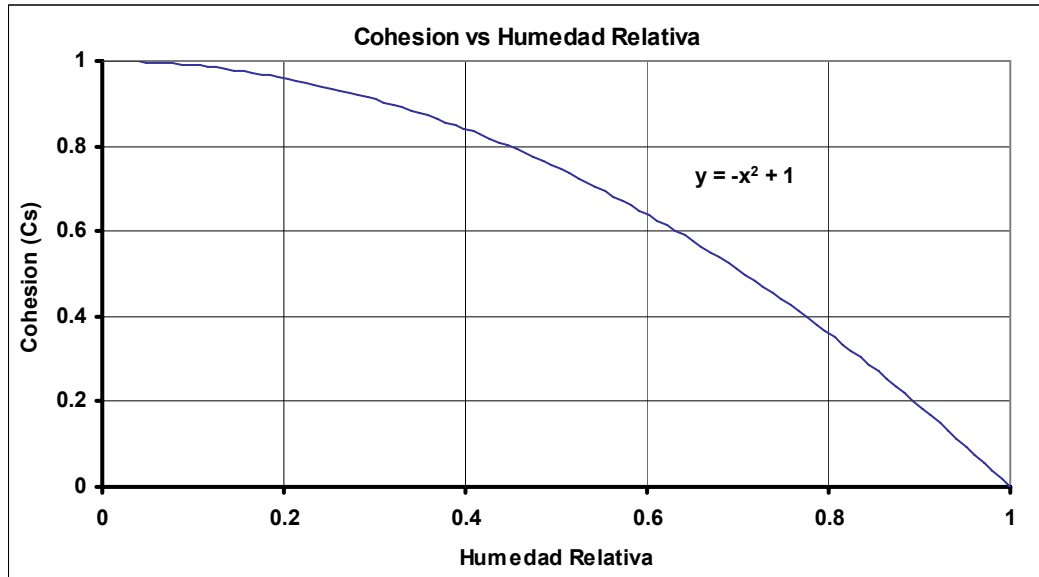
$$FS = \frac{\frac{C_s(1 - w^2)}{\gamma_s h} + (1 - wr) \cos \theta \tan \phi}{\sin \theta} \quad (34)$$

Considerando que un talud con FS menor a 1 es considerado como inestable, al igualar este factor a 1 en la anterior ecuación se puede obtener la humedad relativa necesaria para generar inestabilidad en el suelo. La ecuación cuadrática, al igual que su solución, se muestran a continuación:

$$0 = -\frac{C_s}{\gamma_s h} w^2 - wr \cos \theta \tan \phi + \frac{C_s}{\gamma_s h} + \cos \theta \tan \phi - \sin \theta \quad (35)$$

$$w = \frac{r \cos \theta \tan \phi - \sqrt{(r \cos \theta \tan \phi)^2 + 4 \frac{C_s}{\gamma_s h} \left(\frac{C_s}{\gamma_s h} + \cos \theta \tan \phi - \sin \theta \right)}}{-2 \frac{C_s}{\gamma_s h}} \quad (36)$$

Figura 72. Gráfico de Cohesión vs. Humedad Relativa aplicado en el modelo.



Fuente: Archivo digital investigación.

Una vez obtenida la humedad relativa necesaria para provocar inestabilidad en el suelo, es posible calcular la precipitación requerida para que esta se presente. Lo anterior se realiza despejando R de la ecuación (31), según lo cual se obtiene:

$$R = \frac{wK_s h \sin \theta}{a} \quad (37)$$

El resultado de la relación anterior expresa la precipitación que debe presentarse durante un tiempo t para que se llegue a generar inestabilidad en el suelo. Se entiende que a medida que esta precipitación sea menor, las laderas de la cuenca presentarán mayor factibilidad a deslizamiento y existirá un mayor peligro para los asentamientos humanos localizados cerca de ellas.

5.1.2 Condiciones y parámetros generales de la cuenca.

Tal como se mostrará posteriormente, para el desarrollo del modelo de deslizamientos propuesto se supondrán algunos parámetros como espacialmente distribuidos mientras que otros serán considerados como constantes para toda la cuenca. Dentro de los parámetros especializados se encuentran:

- La elevación del terreno: esta información se encuentra contenida en el MDE de la cuenca con celdas de 5x5m.
- La pendiente del terreno (θ): la pendiente es generada a partir del MDE de la cuenca utilizando el programa Surfer v.8. y almacenada en un sistema raster con celdas de 5x5m.
- Áreas de aporte o captación (a): las áreas de aporte son almacenadas a manera de área de aporte por unidad de longitud (unidad de ancho) en un sistema raster con celdas de 5x5m generado a partir del MDE de la cuenca utilizando el programa TARDEM.

Los parámetros, necesarios para el proceso de generación de los diferentes planos, que se supondrán constantes en toda el área de la cuenca son los siguientes:

- Conductividad hidráulica saturada (K_s): este parámetro será aproximado a la permeabilidad hallada en campo en la cuenca de la quebrada Angulito, siendo igual a 0.14 m/h ...véase numeral 4.4.9...
- Porosidad efectiva (η): calculada mediante ensayos de campo y en laboratorio, siendo igual a 0.37 ...véase numeral 4.4.5...
- Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ): tal como se explicó anteriormente, se tomará un ángulo de fricción para las condiciones seca y saturada del suelo igual a 44.5° ...véase numeral 4.4.6...
- Cohesión máxima o en estado seco (C_s): este valor se tomó igual al obtenido mediante el ensayo de corte directo en material seco, siendo igual a 1800Kg/m² ...véase numeral 4.4.6...
- Densidad del suelo (γ_s): se tomará el valor obtenido mediante el ensayo de cono de arena, que es igual a 1683 kg/m³ ...véase numeral 4.4.5...

- Espesor de la capa permeable o máximo espesor de la zona saturada (h): considerando el espesor promedio de los deslizamientos traslacionales presentados en la cuenca como la profundidad de la zona superficial de suelo permeable que puede llegar a saturarse, se puede concluir que dicha profundidad es aproximadamente igual a 1.0m.

5.1.3 Elaboración del plano de pendientes.

En base al MDE de la cuenca de la quebrada Angulito y mediante la implementación de herramientas incorporadas al programa Surfer v.8, es posible obtener un plano de pendientes de la cuenca analizada.

El programa anteriormente mencionado calcula la pendiente de un punto de la grilla del terreno en base a la dirección del mayor ascenso o descenso que esta presente, es decir, la dirección de la pendiente calculada puede variar dentro del terreno analizado. De esta forma, Surfer v.8 iguala esta pendiente con la magnitud del gradiente en cada uno de los puntos de la grilla del MDE, tal como se muestra a continuación:

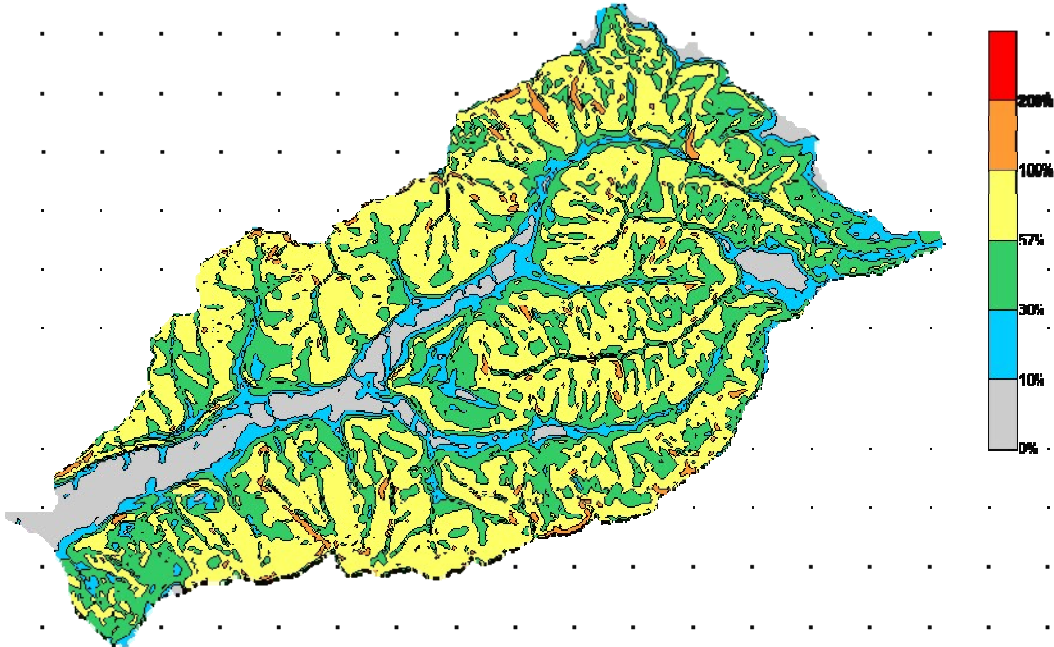
$$S_T = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (38)$$

Donde S_T representa la pendiente del terreno.

Aplicando lo anterior al MDE de la cuenca de la quebrada Angulito se obtiene como resultado un plano raster de pendientes con celdas de igual dimensión al raster inicial. El plano de pendientes con algunas modificaciones (transformado a pendientes en porcentaje) se muestra a continuación (véase figura 73).

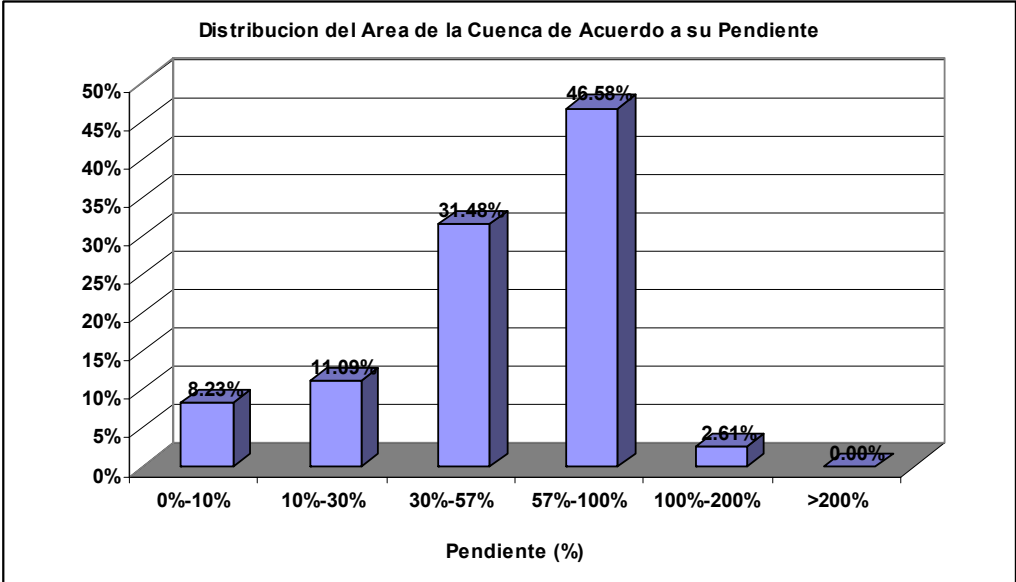
Se observa que en la cuenca predominan de forma marca laderas con pendientes que se encuentran entre 57% y 100%, llegando cubrir un 47% del total de su área (véase figura 74). Este tipo de pendientes es seguido por aquellas que se encuentran en el rango entre 30% y 57%, con un 32% del total. Es posible concluir de esta manera la existencia predominante en la cuenca de laderas de alta pendiente, lo que la hace especialmente propicia a la aparición de deslizamientos.

Figura 73. Plano de pendientes de terreno de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante Surfer v.8.



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 74. Distribución del área de la cuenca de la quebrada Angulito de acuerdo a su pendiente.



Fuente: Archivo digital investigación.

5.1.4 Elaboración del plano de áreas de aporte.

Con el fin de la elaboración del plano de áreas de aporte para la cuenca de la quebrada Angulito, se recurrió a la utilización del software de libre acceso TARDEM, desarrollado por Tarboton⁵⁷.

Para el desarrollo de dicho plano se hace necesaria la aplicación de dos herramientas incorporadas al software. Como un primer paso se crea un plano raster que contiene la dirección del flujo para cada una de las celdas que componen la grilla del MDE, para luego calcular el área que aporta caudal a cada una de estas.

Uno de los métodos más simples para la determinación de direcciones de flujo y áreas de aporte es asignar el flujo de una celda a solo una de sus ocho celdas vecinas, de acuerdo a la dirección a la pendiente más elevada. Lo anterior ocasiona que solo existan 8 posibles direcciones de flujo, siendo estas múltiplos de $\pi/4$. El principal problema encontrado en esta metodología es la discretización en la distribución del flujo de cada celda, ocasionado su distribución total a solo una de sus celdas vecinas.

Con el fin de solucionar el problema anterior se plantea una metodología diferente, basada en una dirección de flujo generada a partir de 8 superficies triangulares creadas en base de la elevación de la celda analizada y sus 8 celdas vecinas (véase figura 75). La dirección del flujo se reporta como un ángulo en radianes a partir del Este, en dirección contraria a las manecillas del reloj.

El área de aporte de una celda es igual a su propia área más el área de las celdas aguas arriba que drenan en su totalidad o en alguna fracción a través de ella. Una celda puede drenar a una o dos celdas. De esta forma su área es distribuida de acuerdo a la cercanía existente entre el ángulo de su dirección de flujo y los ángulos directos existentes a sus celdas vecinas. Observando la figura 75, el área de la celda analizada será distribuida a las celdas 3 y 4 de acuerdo a lo siguiente:

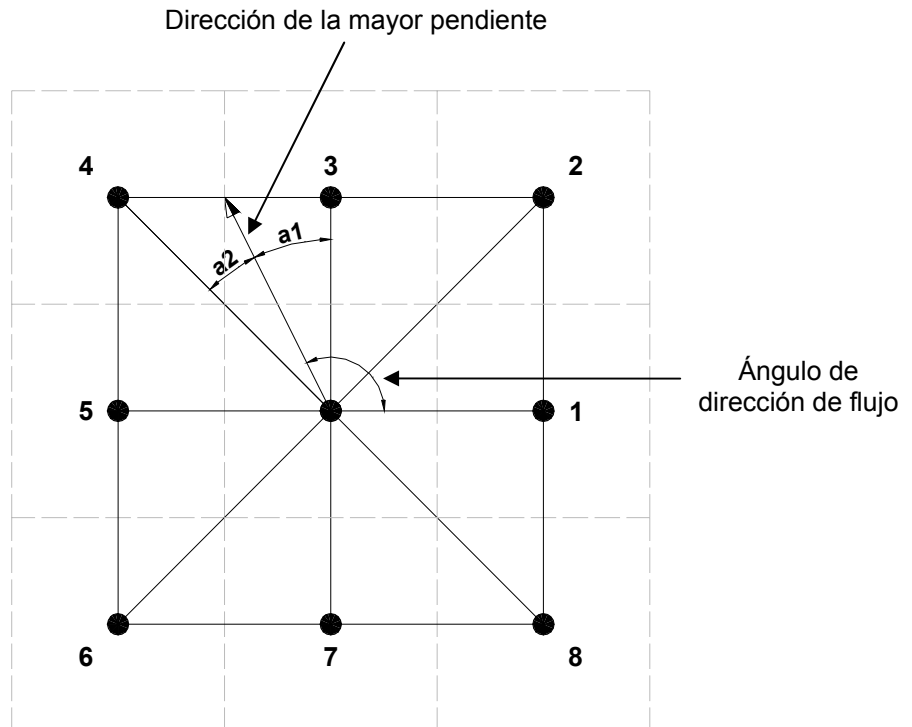
⁵⁷ TARBOTON, David. TARDEM, A Suite of Programs for the Analysis of Digital Elevation Data [online]. [Utah, United States of America]: Utah State University, 2000. Available from internet: <<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/tardem.html>>

$$A_3 = A \left(\frac{a_2}{a_1 + a_2} \right) \quad (39)$$

$$A_4 = A \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2} \right) \quad (40)$$

Donde A es el área de aporte de la celda analizada, y A_3 y A_4 son las fracciones de esta que drenan a las celdas 3 y 4 respectivamente.

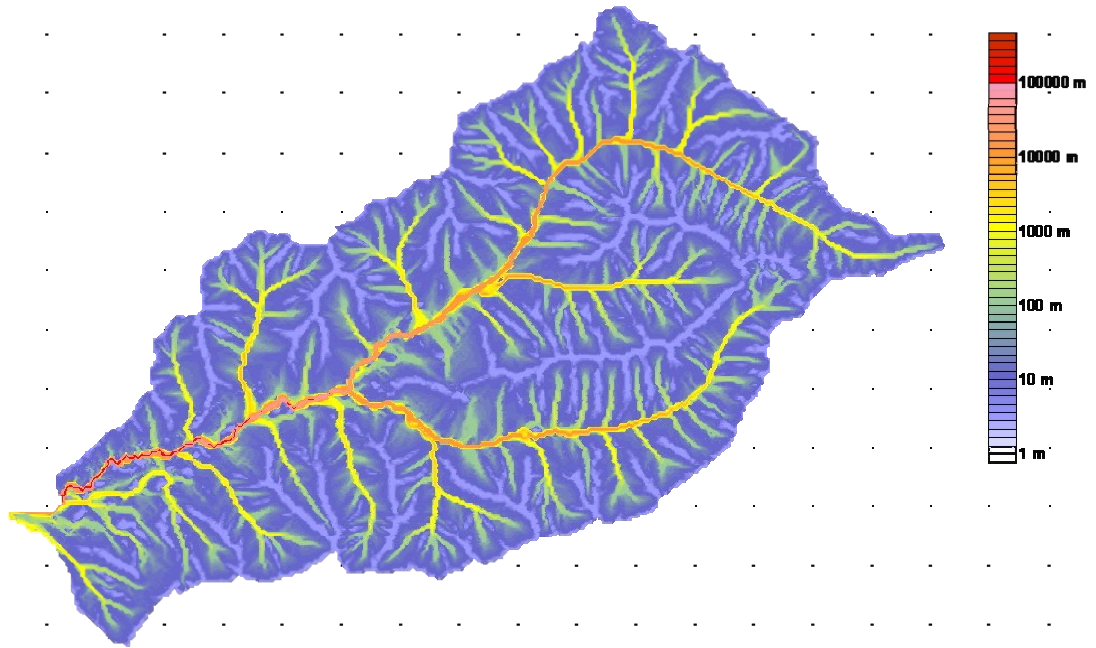
Figura 75. Esquema de la distribución de áreas de aporte y la obtención de las direcciones de flujo.



Fuente: Esquemas investigación.

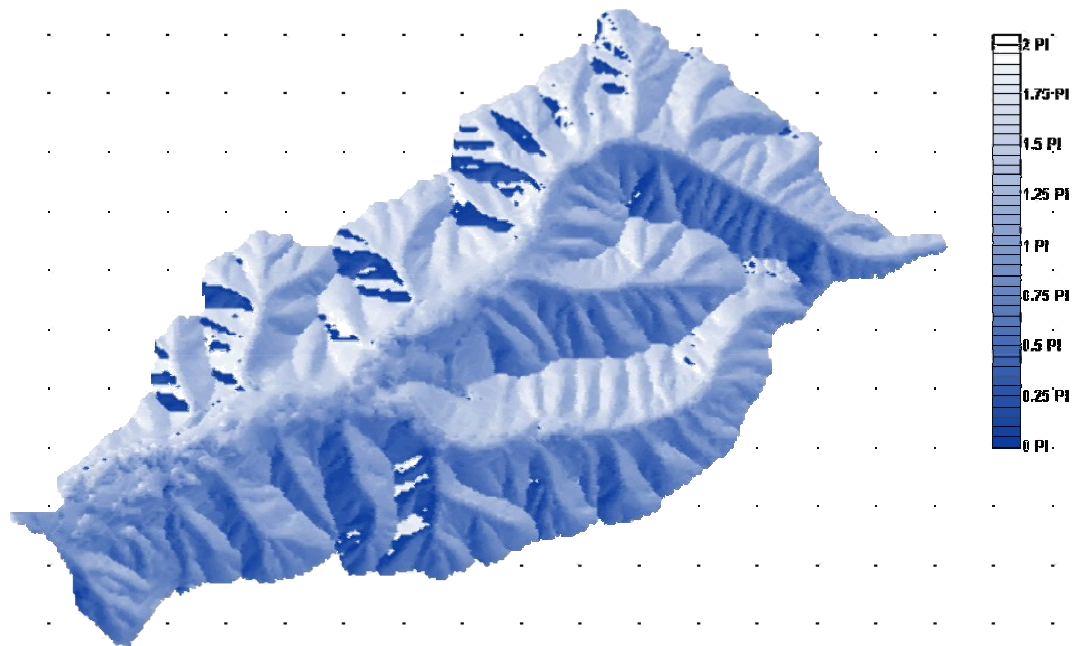
El área de aporte de cada celda es luego transformada a un área de aporte específica o área de aporte por unidad de ancho al dividirla sobre el tamaño de celda del sistema raster (5m para este caso). La implementación del método anterior sobre el MDE de la cuenca de la quebrada Angulito brinda como resultado un plano de direcciones de flujo (antihorario desde el Este y en radianes) y de áreas de aporte para el sector (véase figura 76 y 77).

Figura 76. Plano de áreas de aporte de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante TARDEM.



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 77. Plano de direcciones de flujo de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante TARDEM.

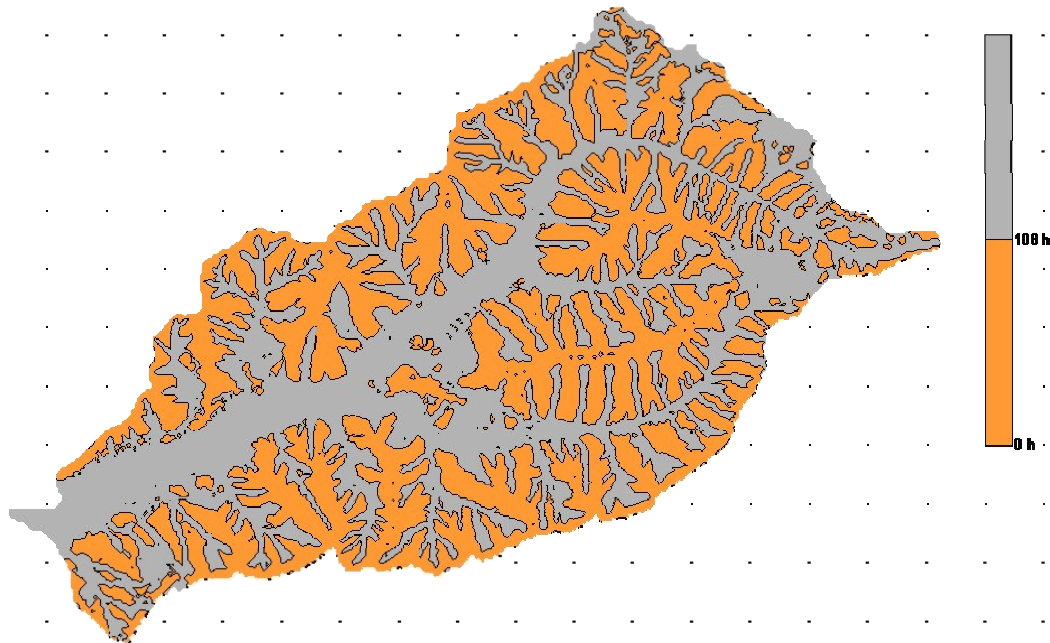


Fuente: Archivo digital investigación.

5.1.5 Tiempo de recarga para alcanzar equilibrio de drenaje.

Con el fin de observar el tiempo necesario de recarga que debe presentarse para lograr un estado de equilibrio de drenaje en la cuenca, se procede a aplicar la ecuación (28) utilizando los sistemas raster de pendientes y de áreas de aporte. De acuerdo a lo anterior se obtienen lo siguiente (véase figura 78).

Figura 78. Plano de áreas de aporte de la cuenca de la quebrada Angulito, generado mediante la ecuación (28).



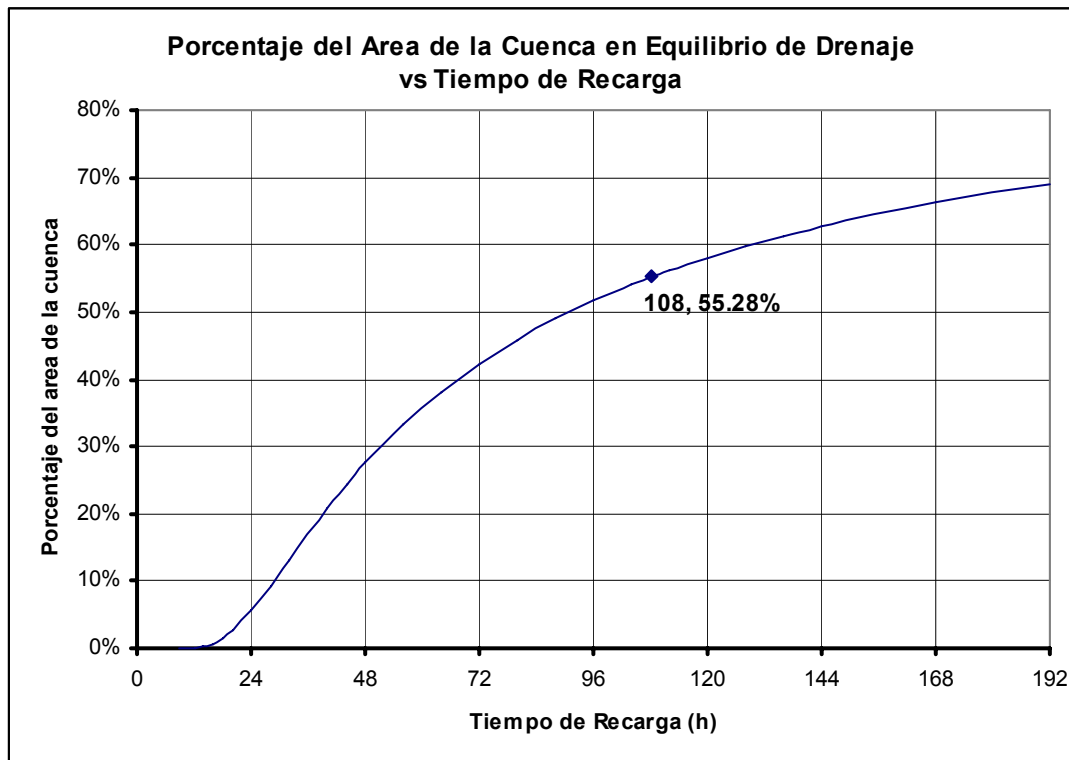
Fuente: Archivo digital investigación.

Como se observa, gran parte de la cuenca alcanza un estado de equilibrio de drenaje luego de 108h de recarga (el tiempo aproximado de duración del evento de precipitación en Febrero de 2005). Considerando que al llegar a este estado un talud se vuelve más propenso ante posibles deslizamientos, lo anterior puede ser tomado como un indicativo del peligro que puede presentarse en la cuenca debido a un evento prolongado de precipitación como el ocurrido.

Para poder entender este fenómeno con mayor facilidad se muestra la gráfica de porcentaje del área de la cuenca en estado de equilibrio de drenaje contra tiempo de recarga (véase figura 79). Tal como se puede observar en dicha figura, luego de 108

horas de recarga más del 55% de la cuenca se encuentra en estado de equilibrio de drenaje, punto en el cual pueden presentarse numerosas fallas y deslizamientos de los taludes.

Figura 79. Porcentaje del área de la cuenca en equilibrio de drenaje vs. tiempo de recarga.



Fuente: Archivo digital investigación.

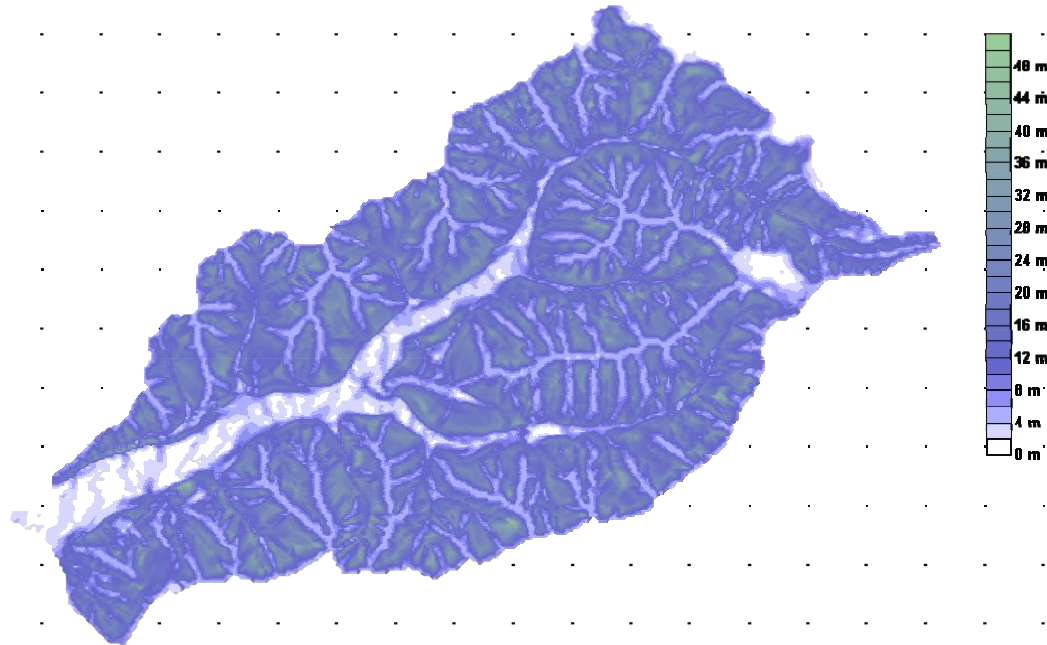
En este estudio, considerando la duración aproximada del evento de precipitación presentado en Febrero 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito como de 108 horas, para aquellas áreas que no han logrado su equilibrio de drenaje luego este tiempo se tomará un área de aporte máxima dada por la ecuación (29). De acuerdo a lo anterior se obtiene un plano de áreas de aporte tal como el que se muestra en la figura 80.

5.1.6 Planos de estabilidad de taludes para mejores y peores condiciones.

Con el fin de corroborar el estado de las laderas de la cuenca de la quebrada Angulito antes de presentarse algún evento de precipitación, se plantea la realización de un plano

de estabilidad de taludes para las mejores condiciones del suelo (estado seco y cohesión máxima).

Figura 80. Plano de áreas de aporte para 108 horas de recarga de la cuenca de la quebrada Angulito, considerando el área de aporte máxima.



Fuente: Archivo digital investigación.

De forma similar, es importante observar los sectores que pueden llegar a presentar, dándose las condiciones necesarias, problemas de estabilidad. Lo anterior se realiza efectuando cálculos de estabilidad para las peores condiciones posibles (estado saturado y cohesión nula). De esta manera es posible detectar las zonas de la cuenca que, aún llegando a presentarse un estado completo de saturación, no presentarán problemas de inestabilidad debido a su baja pendiente. Estas zonas serán eliminadas de estudios posteriores.

Los cálculos mencionados anteriormente se realizan en base a la fórmula de estabilidad para taludes infinitos según lo estipulado en la ecuación (34). Los valores de humedad relativa son ajustados de acuerdo a la condición a estudiar: $w = 0$ para estado seco y $w = 1$ para estado saturado. Se debe entender que para los estudios de estabilidad de

taludes para las peores condiciones se supondrá estado saturado para la totalidad del área de la cuenca, aunque existan una muy baja probabilidad de que esto llegase a ocurrir.

Los resultados de dichos cálculos se muestran en dos planos raster con celdas de 5x5m (véase figura 81 y 82). Tal como se muestra en estos planos, mientras que cuando el suelo se mantiene en estado seco ($w = 0$) los taludes se muestran estables, al saturarse este, generalmente por eventos de precipitación prolongados, se presentan serios problemas de estabilidad en toda la extensión de la cuenca.

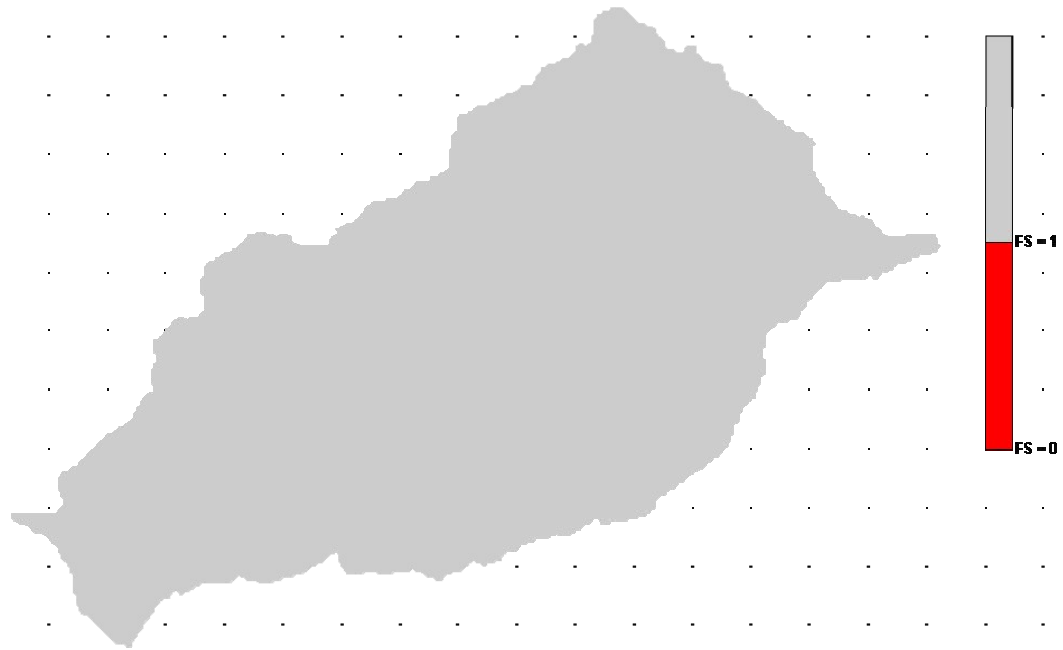
De esta manera es posible considerar que más de un 72% del área total de la cuenca puede llegar a presentar deslizamientos si se lograra alcanzar un estado de completa saturación.

5.1.7 Humedad y precipitación necesarias para ocasionar inestabilidad.

Como punto final en este modelo se plantea generar un plano basado en un sistema raster que contenga información sobre la humedad y la precipitación (presentada durante un tiempo t igual a 108 horas) necesarias para ocasionar problemas de inestabilidad en los taludes. Se entiende que a menor sea esta precipitación los taludes se encontrarán ante un mayor peligro de verse afectados por deslizamientos.

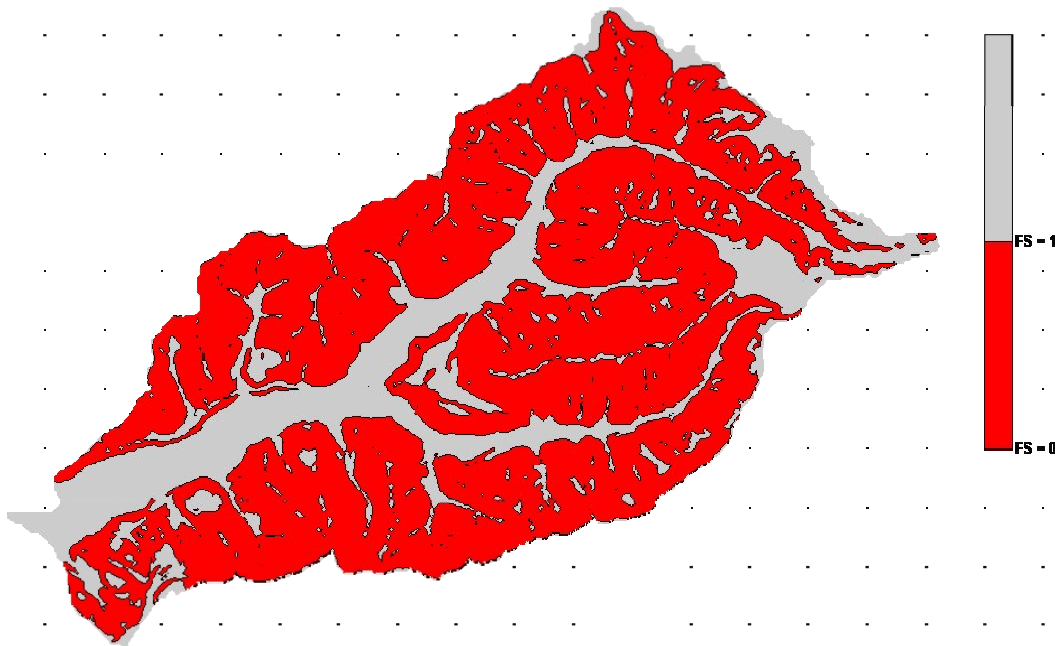
Con el fin de generar estos planos se implementan las ecuaciones (36) y (37) utilizando el sistema raster de áreas de aporte generado para un tiempo de recarga igual a 108 horas. Lo anterior brinda como resultado dos sistemas raster con celdas de 5x5m (véase figura 83 y 84) que facilitan la ubicación de los sectores que presentan mayores problemas de estabilidad y permiten dar una estimación bastante razonable del área total de los taludes fallados durante el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito.

Figura 81. Plano de estabilidad de taludes de la cuenca de la quebrada Angulito bajo las mejores condiciones ($w=0$).



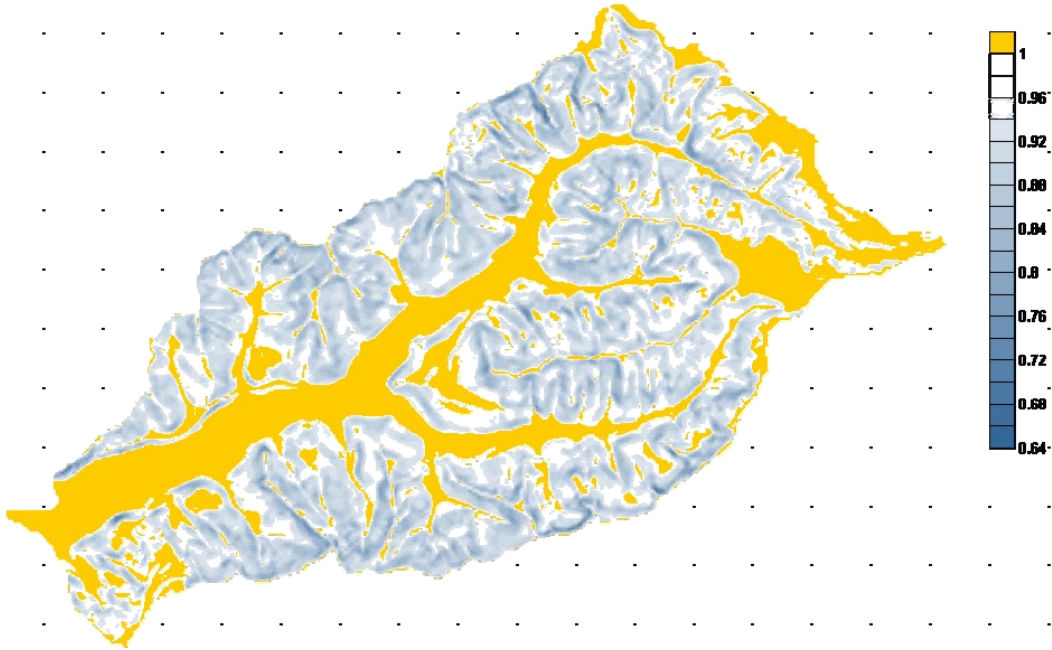
Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 82. Plano de estabilidad de taludes de la cuenca de la quebrada Angulito bajo las peores condiciones ($w=1$).



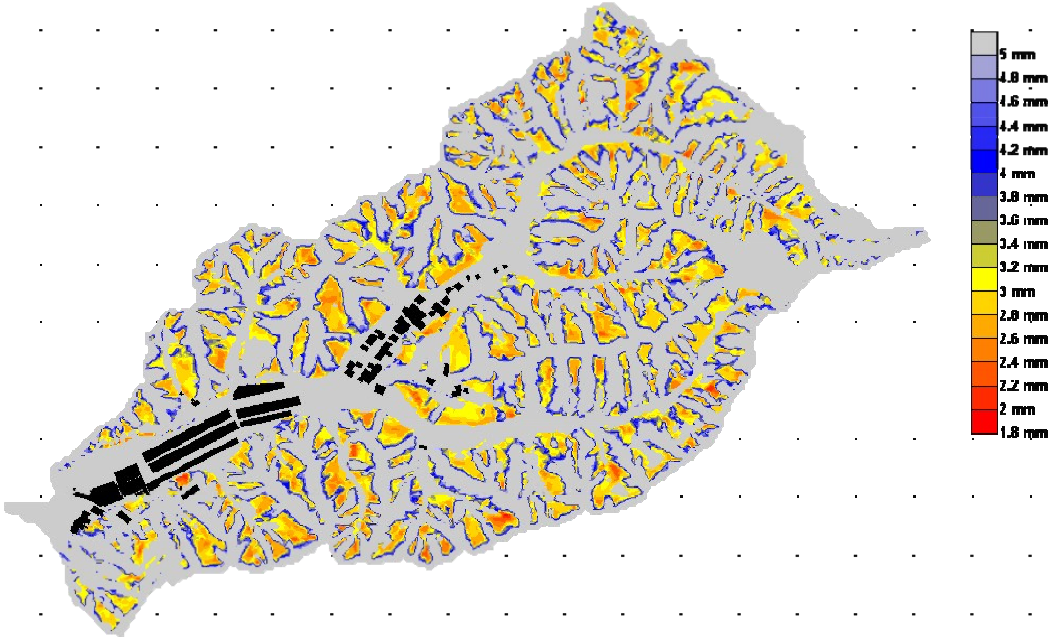
Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 83. Plano de humedad necesaria para generar inestabilidad. Zonas amarillas requieren $w > 1$ (zonas totalmente estables).



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 84. Plano de precipitación necesaria para generar inestabilidad en los taludes de la cuenca de la quebrada Angulito (viviendas se muestran en negro).



Fuente: Archivo digital investigación.

Tal como se observa en el plano de humedad necesaria para ocasionar inestabilidad en el terreno (figura 83), los suelos de la cuenca se muestran propensos a deslizamientos a partir de valores de humedad mayores a 64%. Existen de igual manera sectores que muestran humedades necesarias mayores a 100%, imposibles de lograr. Estas zonas coinciden con aquellas mostradas en el plano de estabilidad de taludes para las peores condiciones ...véase numeral 5.1.6... como no susceptibles a deslizamientos, lo cual explicaría los resultados. Debido a que valores de humedad relativa mayores a 100% no son congruentes con la realidad y corresponden a zonas de elevada estabilidad con muy poca probabilidad de falla, estas no son analizadas en la elaboración del plano de precipitación necesaria para ocasionar inestabilidad.

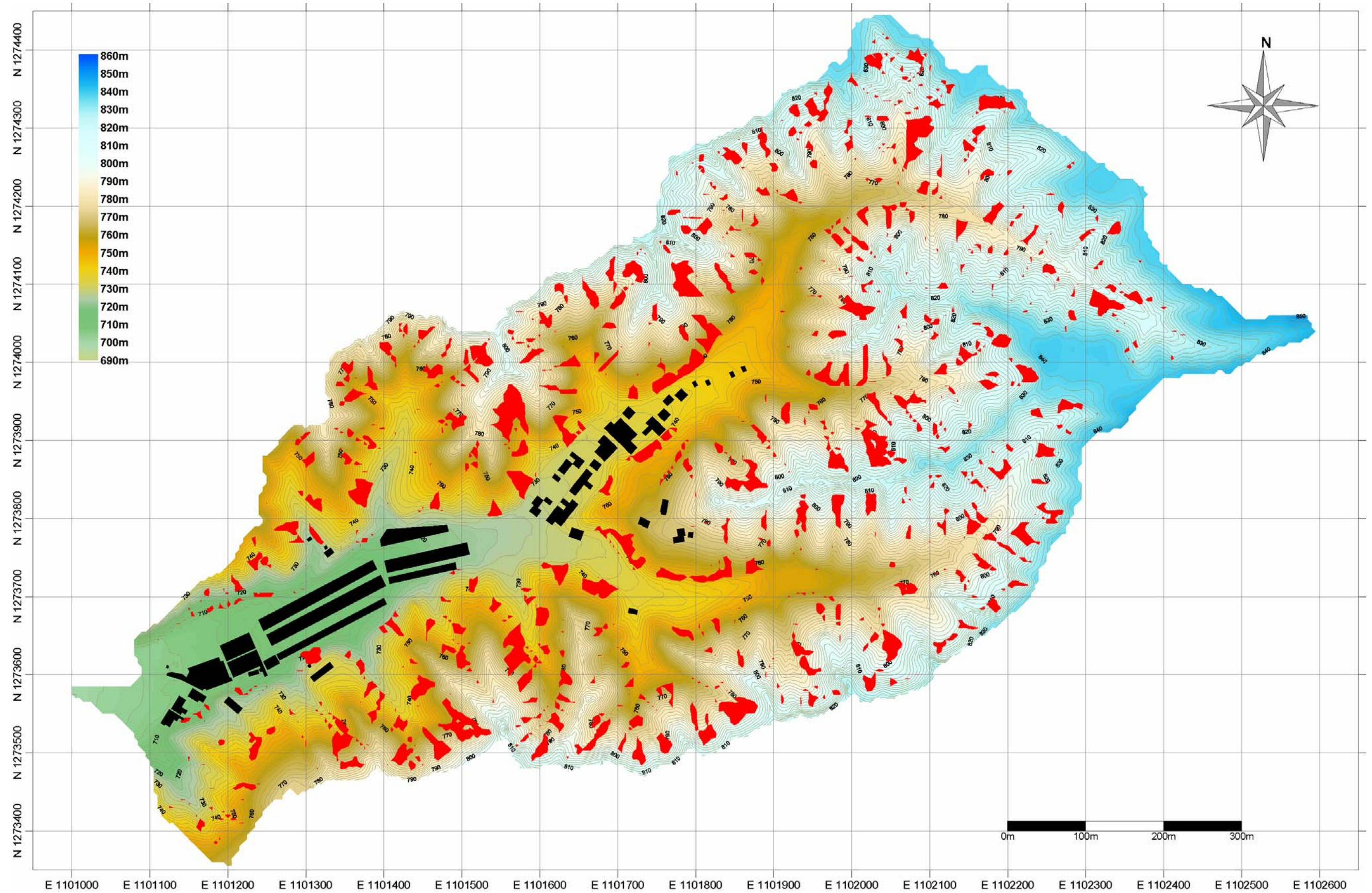
Considerando la precipitación promedio presentada durante las 108 horas de duración del evento de Febrero de 2005 (2.8mm), es posible obtener una estimación del área total fallada y del volumen removido de material. Utilizando el sistema raster de precipitación necesaria para ocasionar inestabilidad de taludes, se obtiene un plano aproximado de los deslizamientos presentados durante el fenómeno ocurrido (véase figura 85).

Los deslizamientos obtenidos mediante este modelo fueron luego verificados en campo, encontrándose una alta similitud entre estos. Se considera de esta manera que el modelo de deslizamientos brinda resultados altamente confiables para la estimación del área deslizada que pueda llegar a presentarse de acuerdo con un tiempo de recarga y una intensidad de precipitación.

Se considera que este modelo brinda resultados más confiables del área total de deslizamientos que estimaciones visuales en campo. Lo anterior a causa de lo difícil que resulta una inspección visual completa de la zona por las abruptas condiciones del terreno.

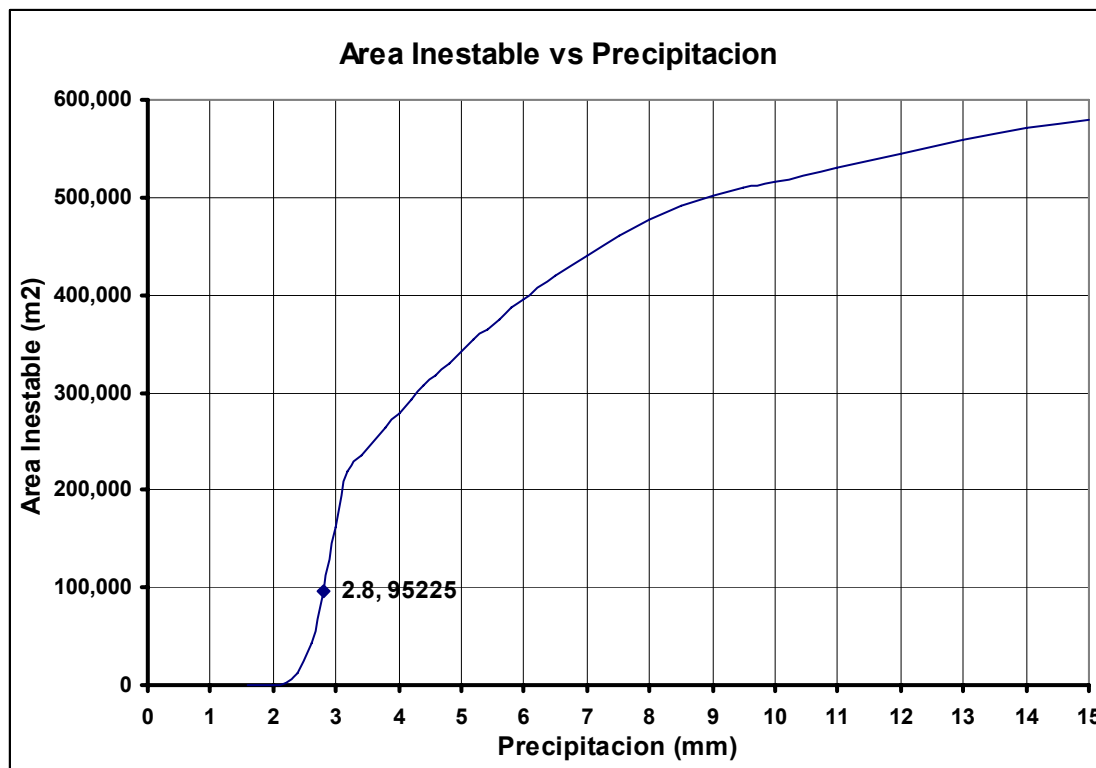
Analizando el sistema raster de precipitación necesaria para ocasionar inestabilidad de los taludes, es posible establecer algunos niveles críticos de precipitación que pueden llegar a causar problemas aún más serios que el ocurrido en Febrero de 2005. De esta manera es posible obtener una gráfica que muestre el área total de deslizamientos en la cuenca en función de la precipitación (véase figura 86).

Figura 85. Plano de deslizamientos estimados para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:5000 (deslizamientos en rojo y viviendas en negro).



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 86. Área de la cuenca que presenta inestabilidad vs. Precipitación (tiempo de recarga igual a 108 horas).



Fuente: Archivo digital investigación.

De esta forma, para un evento con precipitación promedio de 2.8mm de 108 horas de duración es posible estimar un área de deslizamientos cercana a 95225m². Considerando un espesor promedio de los deslizamientos igual a 1m y una porosidad del 37%, se obtiene un volumen de material removido igual a 60000m³, que equivaldrían a cerca de 160000 toneladas.

Es igualmente importante observar que, dado el caso que se llegase a presentar un evento de similar duración pero con una precipitación promedio un 15% superior (3.2mm), se estima un área de deslizamientos cercana a 220000m², representando un incremento del 130%, que equivaldría a 370000 toneladas de material removido.

5.1.8 Conclusiones modelo de deslizamientos.

Luego del desarrollo del modelo digital de deslizamientos es posible llegar a comprender parte del comportamiento general de la cuenca analizada y de los materiales allí

presentes. De esta manera, se considera que luego de analizar los resultados obtenidos mediante la realización del modelo, es posible concluir lo siguiente:

- Las laderas de la cuenca de la quebrada Angulito pueden ser consideradas como de alta pendiente, ya que más de un 75% de su área presenta pendientes mayores a 30%, e incluso más de un 40% del área total muestra pendientes superiores al 57%.
- La elevada pendiente de las laderas de la cuenca de la quebrada Angulito ayuda a explicar la rápida aparición de un gran número de deslizamientos ante eventos de precipitación prolongados.
- De acuerdo al modelo, un evento de precipitación con duración cercana a 108 horas, tal como el presentado en Febrero de 2005, es suficiente para que más de un 55% de la cuenca logre llegar a un estado de equilibrio de drenaje.
- Eventos de precipitación muy elevada pero de corta duración son considerados mucho menos peligrosos que eventos de precipitación relativamente baja pero muy prolongada, debido a que estos últimos logran que una mayor parte de la cuenca llegue a estado de equilibrio de drenaje, facilitando su saturación.
- Aunque la totalidad de los taludes de la cuenca se muestran estables en estado seco, más del 72% del área total puede llegar a presentar deslizamientos bajo ciertos niveles de humedad.
- Los problemas de estabilidad en la cuenca de la quebrada Angulito comienzan a presentarse cuando la humedad relativa del suelo supera el 64%.
- Durante el evento de precipitación ocurrido en Febrero de 2005 en la cuenca, se estima que se presentó un área de deslizamientos cercana a 95225m^2 , con más de 160000 toneladas de material removido.
- Aunque el evento ocurrido durante Febrero de 2005 se mostró devastador para los asentamientos humanos localizados en la cuenca, si se llegase a presentar un evento de similar duración pero con un 15% más de intensidad (3.2mm/h en promedio) se estima que el área de deslizamientos llegaría a cerca de 220000m^2 , lo que equivaldría a más de 370000 toneladas de material removido (un incremento del 130%).
- Mediante inspecciones visuales en campo, se comprueba que el modelo digital de deslizamientos brinda estimaciones altamente confiables y bastante acertadas de las zonas que presentan deslizamientos ante un evento de precipitación dado en cuencas de similares características a la analizada.

5.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

Luego de estimar la cantidad de material removido durante el evento, se hace importante entrar a estudiar posibles métodos de estimación de los caudales de escorrentía presentados. Estas aproximaciones del caudal máximo de la quebrada Angulito adquieren importancia en dos aspectos: permite el análisis y la caracterización del tipo de flujo (mediante el cálculo de la concentración de material), y brinda la información necesaria para la realización de modelos hidráulicos que conlleven a la delimitación de las zonas de inundación.

Dentro de las herramientas computacionales utilizadas en este proceso se encuentran el **HEC Hydrologic Modeling System v.2.2.2 (HEC-HMS)**, software desarrollado por el **U.S. Army Corps of Engineers**, y el **NAM-gph v.1.0.B**, desarrollado por el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático de la Universidad Industrial de Santander.

Es importante mencionar que en la cuenca de la quebrada Angulito no existe ningún tipo de herramienta de medición, ya sea de precipitación o de caudal de la quebrada. Esto puede verse altamente influenciado por el hecho de que la quebrada Angulito es del tipo intermitente, con un nivel freático que se mantiene por debajo de la superficie del terreno durante los tiempos secos que abarcan la mayoría del año. Debido a esto no existe ningún dato preciso que permita realizar calibraciones del modelo planteado.

Considerando la falta de información, se hace necesario establecer algún otro indicativo de los caudales que pudieron haberse presentado durante el evento de precipitación de Febrero de 2005. De esta manera se recurrió a registros fotográficos tomados luego del evento y a inspecciones en campo de las ruinas de algunas viviendas, para así estimar los niveles de agua alcanzados. En aquellos puntos donde fue posible determinar dichas alturas se procedió a realizar levantamientos topográficos de las secciones para, mediante la utilización de modelos hidráulicos, determinar el caudal presentado en el lugar.

Aunque durante el proceso de elaboración y calibración del modelo se buscó implementar toda la información existente para obtener resultados con la mayor precisión posible,

existe en ellos un elevado grado de incertidumbre debido a la carencia de mediciones precisas. Igualmente se debe entender que las simplificaciones realizadas al modelar un flujo hiperconcentrado que recorre un medio tan heterogéneo, como lo son los asentamientos humanos localizados en la cuenca, pueden generar inexactitud en los resultados.

Los resultados obtenidos mediante la implementación de los modelos hidrológicos no son más que aproximaciones a los valores verdaderamente presentados, por lo que no deben ser considerados en ningún momento como totalmente ciertos. Sin embargo, debido a que en el presente estudio se plantea la utilización de los resultados primordialmente para delimitar las posibles zonas de inundación, y dado que estas no muestran cambios considerables bajo pequeñas diferencias en caudales, se considera que los valores obtenidos en los modelos hidrológicos son lo suficientemente precisos para ser utilizados en la realización del estudio.

5.2.1 Selección y elaboración de secciones de control.

Durante inspecciones en campo se seleccionaron dos secciones de control en aquellos sitios donde fue posible determinar los niveles de inundación alcanzados. En dichos lugares se realizaron levantamientos topográficos para determinar la geometría de la sección.

Con el fin de considerar la cantidad de material sedimentado en el sitio, se recurrió a registros fotográficos tomados inmediatamente después de ocurrido el desastre (véase figura 87). Dichos niveles de sedimentos fueron luego incorporados en las secciones para así, conociendo la altura de inundación alcanzada en ellos, poder calibrar los modelos hidrológicos.

De esta manera se tiene que en la sección 1 se muestra una altura de sedimentos cercana a 1.3m y una altura de inundación de aproximadamente 1.6m, lo que conllevaría un espesor de lámina de agua de cerca de 30cm. Para la sección dos, se estima una capa de sedimentos de 1m de espesor con una altura de inundación de aproximadamente 1.4m, lo que implica un espesor de lámina de agua cercana a 40cm. Las alturas descritas hacen relación a los niveles alcanzados en la zona de viviendas, específicamente, en la

margen derecha de los bloques de casas. Los esquemas de las secciones de control planteadas se muestran en la figura 88.

Figura 87. Registros fotográficos de los niveles alcanzados en los lugares seleccionados para: (a) sección 1 y (b) sección (2).



Fuente: Archivo fotográfico investigación.

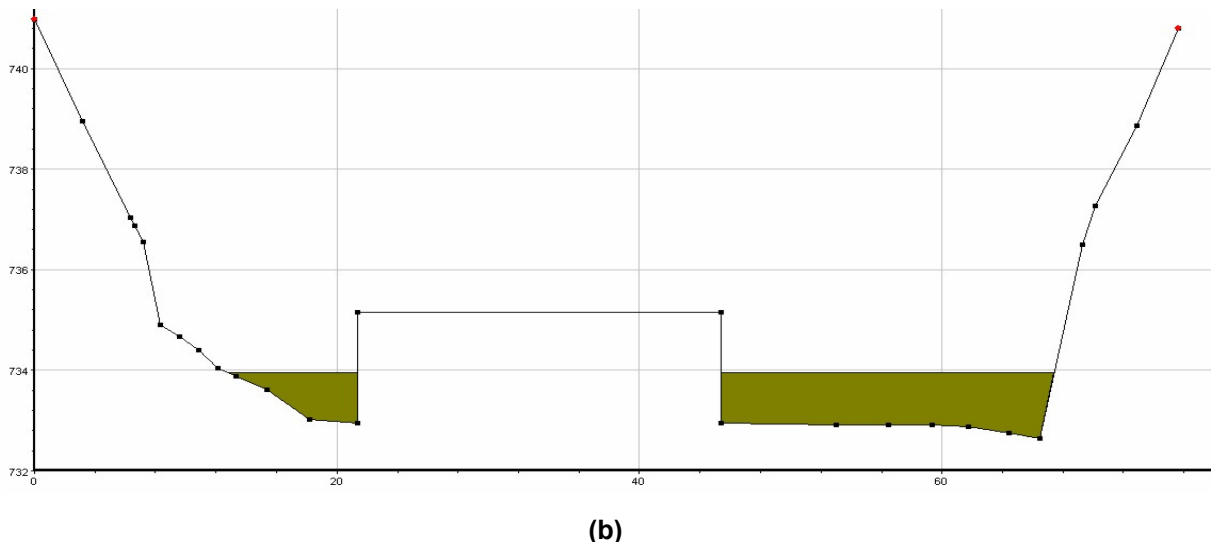
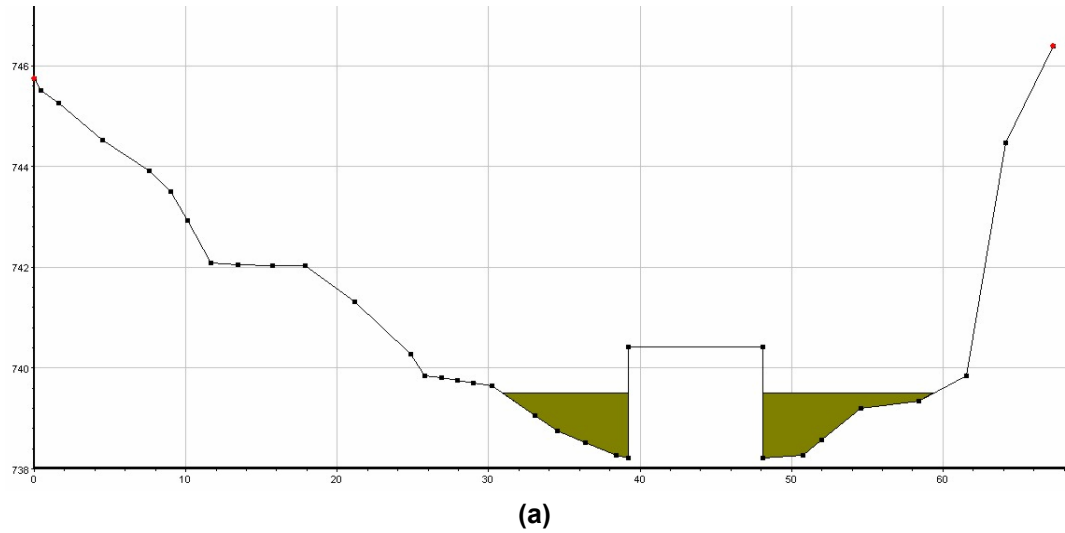
5.2.2 Desarrollo del modelo hidrológico en HEC-HMS.

Para el desarrollo del modelo hidrológico se implementaron dos herramientas: el software **HEC Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) v.2.2.2**, y la herramienta **HEC-GeoHMS v.1.1**, ambos desarrollados por el **U.S Army Corps of Engineers**.

El programa HEC-HMS está diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en cuencas. Para su implementación se requieren tres factores principales: una representación física de la cuenca, datos meteorológicos que incluyen la información de la precipitación ocurrida, y unos parámetros de control que se encuentran relacionados a la fecha y hora de inicio y final del estudio al igual que al intervalo de tiempo de análisis.

Con el fin de extraer información para el desarrollo del modelo hidrológico a partir del MDE de la zona, desarrollado con anterioridad, se implementa la herramienta **HEC-GeoHMS v1.1**. Dicho software no es más que una extensión para el programa **ArcView 3.2** que complementa su extensión **Spatial Analyst**, para de esta manera permitir un fácil manejo y procesamiento de los modelos digitales de elevación.

Figura 88. Esquema de las secciones de control: (a) sección 1 y (b) sección 2, escala 1:150 vertical y 1:500 horizontal.



Fuente: Archivo digital investigación.

5.2.2.1 Implementación de HEC-GeoHMS. Aunque el HEC-GeoHMS permite el desarrollo y extracción de un gran número de datos a partir del MDE del terreno, en el momento solo se explicarán brevemente algunos de los pasos realizados para obtener aquella información que luego será utilizada para el desarrollo del modelo hidrológico. Si

se desea conocer con mayor detalle el proceso realizado es posible consultar los manuales del software⁵⁸.

Los pasos realizados para obtener la información requerida a partir del MDE del terreno se enumeran a continuación:

- El MDE del terreno es importado a ArcView y sus depresiones o **pits** son corregidas. Como **pit** se conoce aquella celda de la grilla que se encuentra rodeada por celdas de altura mayor. Cuando lo anterior ocurre, el software iguala la elevación del **pit** a la elevación más baja de alguna de sus celdas vecinas. Se debe trabajar con grillas sin depresiones para poder obtener el plano de direcciones de flujo.
- A partir del MDE con **pits** corregidos se obtiene un plano de direcciones de flujo generado en base de la dirección del descenso con mayor pendiente para cada celda. En este proceso sólo se tomarán 8 posibles direcciones: norte, nor-este, este, sur-ese, sur, sur-oeste, oeste, nor-oeste; teniendo en cuenta que cada celda posee solo ocho celdas vecinas.
- Se genera un plano de acumulación de flujo o áreas de aporte, obtenido al calcular el número de celdas que drenan por cada una de las celdas de la grilla. Se debe tener en cuenta que, a diferencia del proceso realizado para el desarrollo del modelo de deslizamientos ...véase numeral 5.1.4..., las áreas de aporte serán valores enteros, ya que se considera que una celda drena en su totalidad a una de sus vecinas.
- Se deben luego definir los flujos principales tomando en consideración un valor mínimo de área de aporte. De acuerdo a esto, y considerando cada celda que posee un valor mayor al definido como perteneciente al conjunto de corrientes, es posible delimitar los ríos del sistema. Para el caso del presente estudio se tomó un valor mínimo de área de aporte igual a 600 celdas.
- Una vez definidas las corrientes, estas deben ser subdivididas. El punto donde dos o más corrientes se encuentran se llama una unión o **junction**.
- Para cada corriente es luego delimitada un área de aporte o subcuenca. Inicialmente tanto las corrientes como las subcuencas se encuentran en formato raster, poco

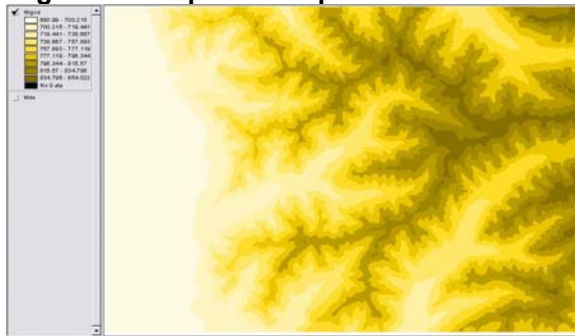
⁵⁸ U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoHMS, User's Manual [online]. [USA]: U.S.A.C.E, December 2003. Available from internet: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/hechms-document.html>>

práctico para el proceso, por lo que deben ser luego transformadas a un archivo **shape**.

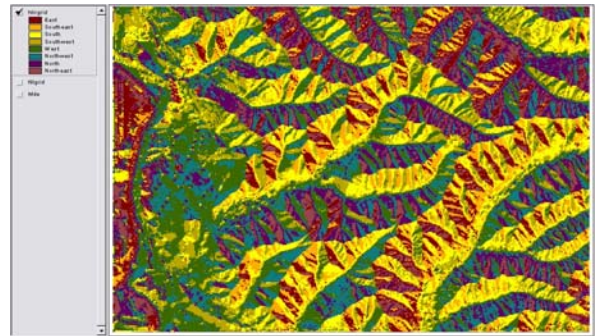
- Con el objetivo de seleccionar un área de estudio, se debe indicar cual será el punto de salida u **outlet** de la cuenca a analizar. Una vez elegido dicho punto, el software selecciona el área total de la cuenca y extrae todos sus componentes para que esta sea trabajada por separado a manera de proyecto individual.
- Para cada una de las subcuencas pertenecientes al área de estudio seleccionada es calculada la ubicación de su centroide. Aunque existen diversas metodologías para este fin, en el presente estudio se escogió el método de la elipse, que aproxima la forma de la subcuenca a una elipse y ubica su centroide donde se encontraría el de esta.
- Se procede entonces a la definición de las longitudes máximas de recorrido de flujo. Lo anterior debe ser calculado para cada una de las subcuencas del área de estudio.
- Con fin de facilitar el trabajo en HEC-HMS, HEC-GeoHMS puede generar un plano de locación de los elementos de la cuenca con la simbología del primero (véase figura 89). Este paso sirve para observar como será la representación final obtenida con HEC-GeoHMS.
- Como paso final, cada uno de los elementos que componen el área de estudio recibe un nombre y algunas de sus características son extraídas, dentro de las que se encuentran: longitud y pendiente promedio de las corrientes, elevación de los centroides, área y pendiente promedio de las subcuencas, longitud y pendiente de los recorridos máximos del flujo para cada subcuenca, entre otros.

Una vez obtenida la información requerida es posible exportarla mediante la creación de un archivo que puede ser leído por el programa HEC-HMS. Dicho archivo posee un extensión del tipo *.hms y puede ser importado por el programa de modelamiento hidrológico.

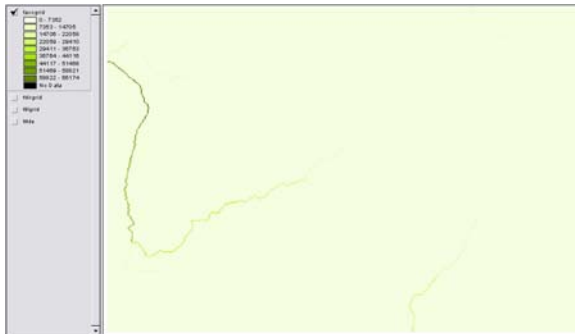
Figura 89. Esquema del proceso realizado en HEC-GeoHMS.



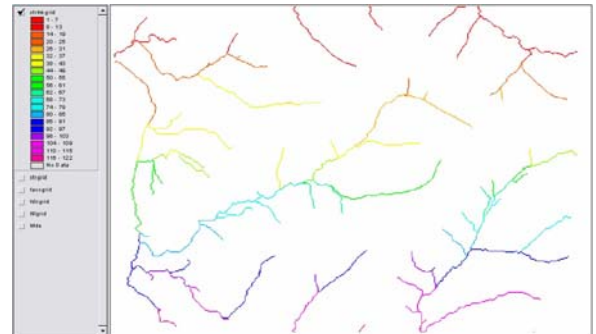
(a) MDE con pits corregidos.



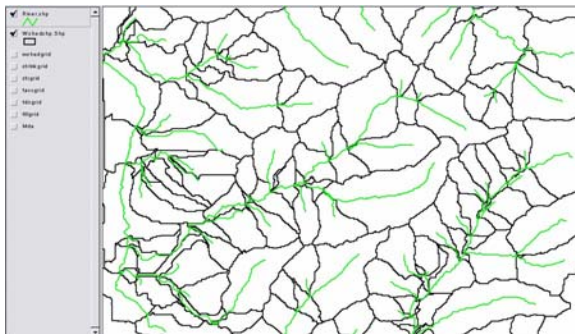
(b) Direcciones de flujo.



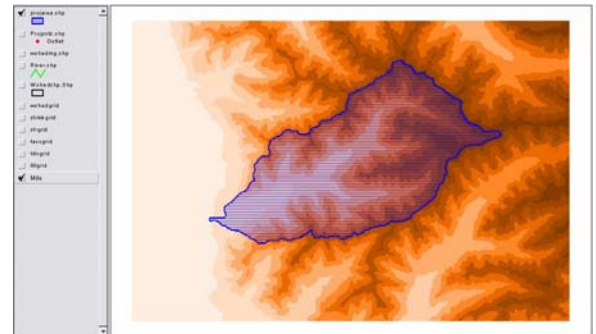
(c) Flujo acumulado o áreas de aporte.



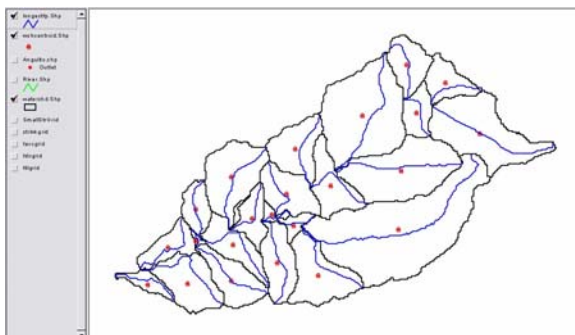
(d) Definición y subdivisión de corrientes.



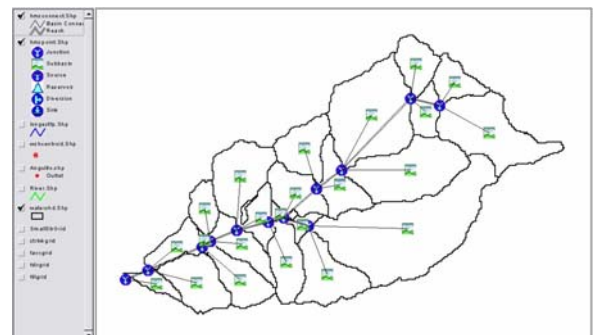
(e) Definición de subcuencas.



(f) Selección de la cuenca de estudio.



(g) Centroides y longitudes máximas de flujo.



(h) Esquema con nomenclatura de HEC-HMS.

Fuente: Archivo digital investigación.

5.2.2.2 Desarrollo del modelo hidrológico en HEC-HMS. El programa HEC-HMS es utilizado para modelar procesos de precipitación-escorrentía en cuencas. Este software trabaja en base a tres principales tipos de información: propiedades de la cuenca, datos de precipitación del evento analizado y especificaciones de control.

- Propiedades de la cuenca: las propiedades de la cuenca son extraídas principalmente de la representación digital del terreno (MDE). Esta información es procesada para que pueda ser importada en HEC-HMS mediante el software HEC-GeoHMS ...véase numeral 5.2.2.1...

Para el análisis de la cuenca se realizan tres tipos de procesos: un análisis de las pérdidas ocurridas, transformación a escorrentía y el tránsito por canales abiertos. Existen diferentes metodologías para desarrollar cada uno de estos procesos y su selección depende principalmente de la información requerida.

Las pérdidas ocurridas durante el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito fueron estimadas mediante la implementación de la metodología del **Soil Conservation Service's (SCS) Curve Number**. El SCS, ahora conocido como el **Natural Resources Conservation Service**, desarrolló esta metodología con el fin de estimar la precipitación efectiva para una tormenta en base a la precipitación acumulada, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la humedad precedente. De esta manera, los parámetros necesarios para la aplicación de este modelo son las pérdidas iniciales, tomadas en este caso como nulas, y el número de curva, que se encuentra entre 0 y 100. El principal beneficio obtenido mediante la implementación de la metodología del número de curva del SCS radica en que este no requiere que la cuenca se encuentre aforada.

Según Aparicio⁵⁹, el número de curva para un suelo compuesto de arenas con bajo contenido de limos y arcillas, cubierto con pastizales y con pendiente superior al 1%, tal como el observado en la cuenca de la quebrada Angulito, es igual a 68. A este número de curva se le debe aplicar una corrección según la altura de precipitación acumulada cinco

⁵⁹ APARICIO, F. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa, 2001. p. 188.

días atrás. Dicha corrección se utiliza con el fin de tener en cuenta la posible existencia de humedad en el suelo en el momento de inicio del evento de precipitación estudiado. Se observa que en las estaciones cercanas la precipitación de los 5 días anteriores al evento (2-6 de Febrero) no supera los 25mm (véase tabla 20), por lo que al número de curva se le debe aplicar una corrección que lo reduce en magnitud. De esta forma el número de curva será igual a 49.

Tabla 20. Precipitación diaria en los primeros 15 días de Febrero 2005.

NOMBRE ESTACIÓN	Precipitación en 24 horas en los 15 primeros días de Febrero de 2005 (mm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CLUB CAMPESTRE	0	0	0	11	0	4.5	2.3	1.1	45.5	3.2	54.5	130	17.5	0	0
LLANO GRANDE	0	0	0	0	0	0	51	182	2.1	12.6	143	27.1	0	0	0
RUITOQUE	6.5	0	0	11.7	0	8.8	34	10	53	0.5	46	108	0	0	0
CHIMITA	0	0	0	0.1	0.2	7.2	0	31.3	34.1	5.9	38	103	0	0	0
PTAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1.8	88.4	129	0	0	0

Fuente: CDMB, IDEAM, URBANAS.

Para la transformación de las subcuencas y el tránsito de los ríos se utilizó la metodología de la onda cinemática que, según Beven⁶⁰, brinda una buena aproximación en su modelamiento. En la primera, la lluvia efectiva es transformada en escorrentía directa utilizando la ecuación de continuidad y una aproximación del flujo como constante y uniforme. De esta forma la subcuenca es modelada conceptualmente como dos planos rectangulares con flujo superficial que drenan a un canal principal a manera de flujo lateral (véase figura 90).

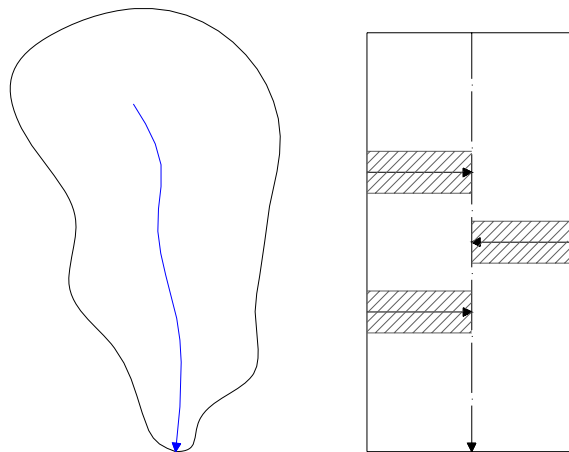
Los parámetros requeridos y utilizados para la transformación de la subcuenca son los siguientes:

- Longitud de los planos: aproximado a la máxima longitud de recorrido del flujo, calculada mediante HEC-GeoHMS.
- Pendiente de los planos: aproximado a la pendiente promedio de la subcuenca, calculada mediante HEC-GeoHMS.

⁶⁰ BEVEN, Op. cit., p. 177.

- Rugosidad: calculada mediante el método de Cowan y corroborada por el **Virginia Department of Transportation (VDOT)**⁶¹, siendo igual a 0.24 para flujo laminar de baja profundidad sobre una superficie cubierta de pastos densos.
- Porcentaje del área de la subcuenca: aproximado visualmente para cada plano.
- Longitud del canal: calculado mediante HEC-GeoHMS.
- Pendiente del canal: calculado mediante HEC-GeoHMS.
- Pendiente lateral del canal: aproximada a la pendiente promedio de la subcuenca, calculada mediante HEC-GeoHMS.
- Ancho del canal: aproximado mediante los planos topográficos.

Figura 90. Modelo conceptual de la subcuenca (izq.) con el método de la onda cinemática (der).



Fuente: Esquemas investigación.

La metodología aplicada para el tránsito por los canales es muy similar a la descrita para la transformación de las subcuencas. Está basada en la ecuación de continuidad para el momento con un flujo constante y uniforme. Para el desarrollo del proceso se deben especificar ciertos parámetros:

- Sección del canal: en este caso considerado trapezoidal.
- Longitud del canal: hallada mediante HEC-GeoHMS.

⁶¹ VIRGINIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Drainage Manual [online]. [Virginia, USA]: The Department, April 2002. Available from internet: <http://www.extranet.vdot.state.va.us/locdes/electronic%20pubs/2002%20Drainage%20Manual/pdf/_Start%20VDOT%20Drainage%20Manual.pdf>. Appendix 6D-2, p. 2.

- Pendiente de energía: aproximada a la pendiente del canal, calculada mediante HEC-GeoHMS.
- Ancho del canal: aproximado mediante los planos y las secciones topográficas.
- Rugosidad: estimada en 0.2 de acuerdo a lo establecido por Xu y Feng⁶²

5.2.2.3 Datos meteorológicos y especificaciones de control. Una vez incorporadas al modelo las características físicas de la cuenca, es necesario ingresar la información meteorológica concerniente al evento a analizar. Se debe tener en cuenta que en el software (HEC-HMS), debido a los métodos utilizados, no existen herramientas que permitan la incorporación de la evapotranspiración.

De esta manera, la información de precipitación especializada ...véase numeral 4.2.2... es incorporada al modelo considerándola como uniforme sobre toda la cuenca. La evapotranspiración no es considerada en este punto del estudio.

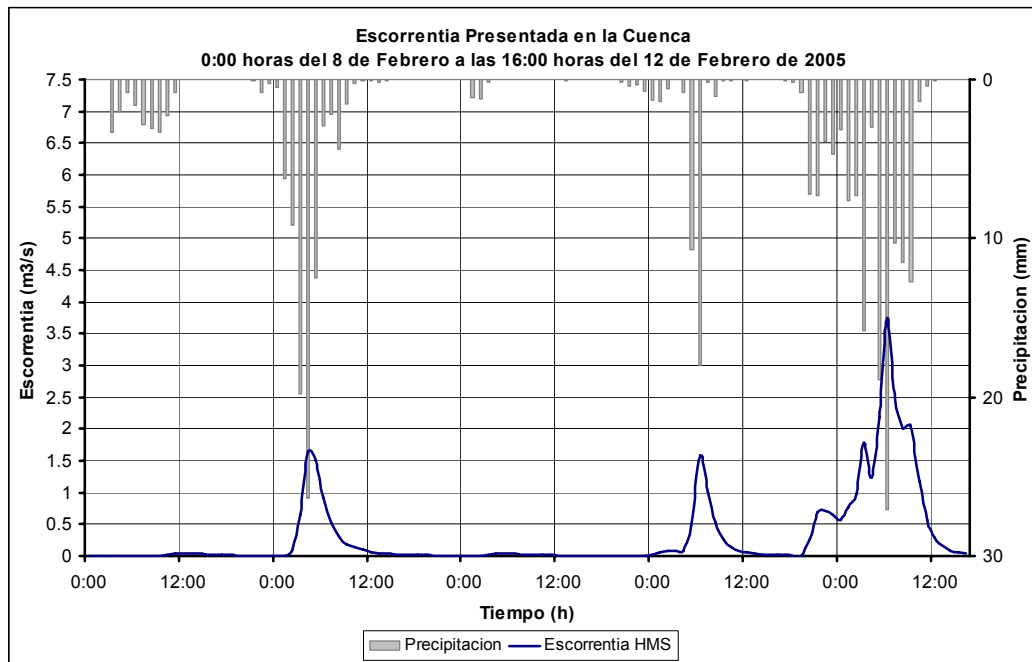
Como características de control se introducen la fecha y hora de inicio y fin del evento (0:00 horas del 8 de Febrero a las 0:00 horas del 13 de Febrero de 2005), y el intervalo de tiempo entre datos (1 hora).

Una vez incorporada toda la información es posible proceder a la ejecución del modelo. De esta manera se obtienen, entre otros, los caudales de escorrentía directa a la salida de la cuenca y en cada una de las uniones de las corrientes. Esta información debe ser luego incorporada al modelo hidráulico para su calibración y ajuste. Durante este proceso es importante observar que cambios significativos de caudal causan muy poco efecto en relación al nivel del agua presentado en las secciones de control, por lo que los ajustes son realizados hasta obtener un nivel considerado lo suficientemente cercano (alrededor de 5cm por encima o debajo) al nivel observado.

Finalizado todo el proceso se obtiene un resultado final de escorrentía para la cuenca. Los datos de escorrentía obtenidos a partir del modelo calibrado para la salida de la cuenca pueden ser vistos en la figura 91.

⁶² SUÁREZ, Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 171.

Figura 91. Escorrentía estimada mediante HEC-HMS para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito.



Fuente: Archivo digital investigación.

De esta forma, el caudal máximo de escorrentía directa presentado durante el evento de precipitación entre el 8 y el 12 de Febrero de 2005, estimado mediante el software HEC-HMS para la cuenca de la quebrada Angulito, es igual a $3.75\text{m}^3/\text{s}$.

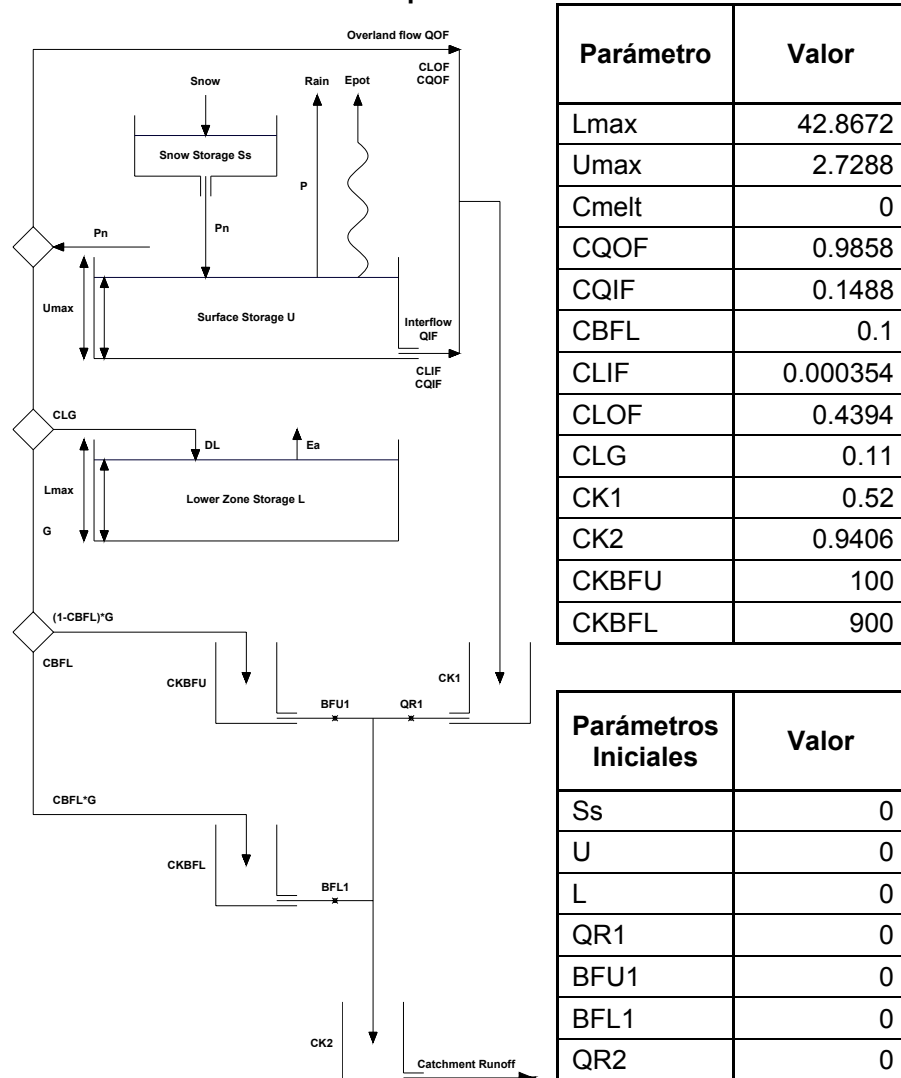
5.2.3 Desarrollo del modelo hidrológico en NAM.

El NAM es un software de modelación precipitación-escorrentía creado por el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) de la Universidad Industrial de Santander, en base a modelos desarrollados por la sección de Hidrología del Instituto de Ingeniería Hidrodinámica e Hidráulica de la Universidad Técnica de Dinamarca (**Technical University of Denmark**).

El software realiza la modelación en base a datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura, y puede ser calibrado mediante mediciones tomadas en la cuenca. Debido a la falta de información de datos de escorrentía de la quebrada Angulito, los caudales obtenidos por la implementación del presente modelo serán comparados con las alturas de inundación encontradas en campo, tal como se realizó con el modelo en HEC-HMS.

Los datos de precipitación y evapotranspiración son incorporados al modelo mediante un archivo de texto. De igual forma, el programa NAM v.1.0.B requiere de algunos otros parámetros para realizar el modelamiento. Algunos de estos, tales como el almacenamiento subsuperficial (estimado en cerca de 40mm considerando un espesor de capa permeable de 1m con 37% de porosidad) o el aporte por descongelamiento de nieve (tomado como 0), son aproximados de acuerdo a las propiedades encontradas en la cuenca, mientras que otros son estimados mediante la calibración del modelo. Los parámetros finales tomados, al igual que un esquema de su función en NAM, pueden ser vistos en la tabla 21.

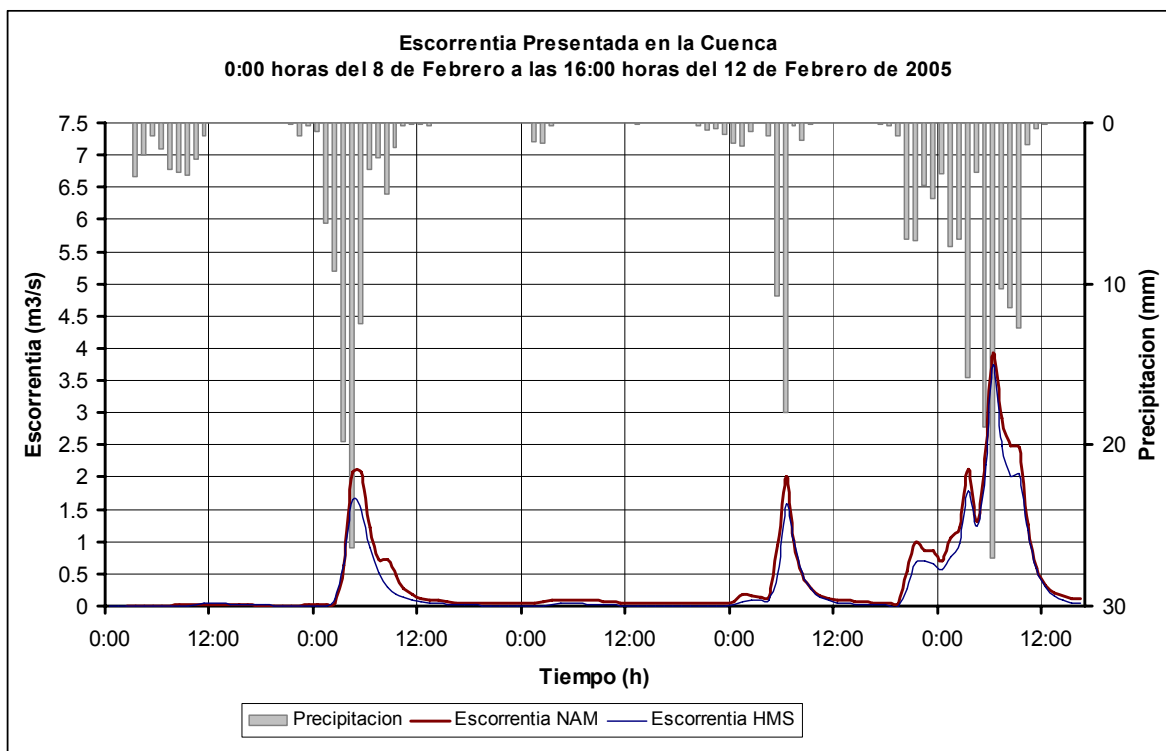
Tabla 21. Parámetros utilizados para el modelo en NAM.



Fuente: Archivo digital investigación.

De esta manera, el caudal máximo de escorrentía directa presentado durante el evento de precipitación entre el 8 y el 12 de Febrero de 2005, estimado mediante el software NAM para la cuenca de la quebrada Angulito, es igual a $3.93\text{m}^3/\text{s}$ (véase figura 92). Es importante considerar que los caudales mencionados anteriormente (tanto el hallado mediante HEC-HMS como el estimado con NAM) corresponden a caudales de agua que no incluyen el material deslizado y transportado por el flujo. El material será incluido luego, cuando se analicen las características presentadas por el flujo ocurrido en Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito.

Figura 92. Escorrentía estimada mediante NAM para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito (se incluye la estimación mediante HMS).



Fuente: Archivo digital investigación.

5.3 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

Al obtener la cantidad estima de material deslizado y los caudales presentados en la quebrada, obtenidos a partir de modelos hidrológicos, es posible llegar a caracterizar el flujo ocurrido.

En primera instancia, se tiene un total estimado de material deslizado durante el evento de Febrero de 2005 igual a 59991m^3 , lo que equivale a 156998 toneladas. Considerando que durante el último evento de precipitación, ocurrido entre las 20:00 horas del 11 de Febrero y las 13:00 horas del 12 de Febrero, se presentaron prácticamente la totalidad de los deslizamientos (aproximado a un 80% de estos a partir de afirmaciones de testigos), y teniendo en cuenta que la escorrentía promedio durante este evento fue de entre $1.24\text{m}^3/\text{s}$ y $1.46\text{m}^3/\text{s}$, se tiene que la concentración de sedimentos en el flujo se encuentra entre un 34% y 37%. De manera similar, el peso unitario del fluido se estima en 1.6.

El suelo del miembro Órganos encontrado en la cuenca de la quebrada Angulito, tal como se ha mencionado anteriormente, presenta bajos contenidos de material fino, siendo menor a 20% en todas las muestras extraídas. El material arcilloso allí encontrado presenta una alta dispersión, por lo que al encontrarse en solución sus fuerzas de atracción (cohesión) desaparecen, reduciendo en cierto grado la viscosidad y en gran medida el esfuerzo cortante límite. Lo anterior ocasiona que el material no se comporte como un fluido tipo Bingham (como ocurre en la mayoría de flujos de lodos) y pase a presentar características de un fluido newtoniano.

Considerando los bajos contenidos de material fino y las propiedades dispersivas de aquel que puede ser encontrado, es posible afirmar que los flujos que se presenten en la cuenca de la quebrada Angulito serán del tipo no viscoso.

Según Suárez⁶³, el flujo ocurrido en la cuenca de la quebrada Angulito el 11 y 12 de Febrero de 2005 puede ser clasificado, según sus características, como un flujo hiperconcentrado granular no viscoso. Los flujos de este tipo se comportan aproximadamente como fluidos newtonianos, lo que permite la implementación de la ecuación de Manning y diversas herramientas computacionales para su modelamiento.

⁶³ SUÁREZ, Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 177.

De esta forma, solo falta estimar el valor de rugosidad a implementar en la modelación del flujo. Según Suárez⁶⁴, flujos no viscosos de materiales predominantemente gruesos en canales con gran cantidad de gradas y contracciones, y donde la profundidad se encuentra entre 0.5m y 1m, presentan una rugosidad de cauce cercana a 0.2.

5.4 MODELO HIDRÁULICO DEL FLUJO

Una vez caracterizado el flujo ocurrido es posible entrar a modelar su recorrido por el cauce. La implementación de la ecuación de Manning facilita enormemente el procesamiento, ya que existen herramientas computacionales de libre acceso para su estudio.

Dentro de estas herramientas sobresale el software **HEC-River Analysis System** (HEC-RAS), desarrollado por el **U.S. Army Corps of Engineers**. Este software permite el modelamiento hidráulico unidimensional de sistemas de canales, ya sea naturales o contruidos por el hombre, bajo regímenes de flujo permanente o no permanente.

El software trabaja en base a tres tipos de información: información geométrica, que incluye la esquemática de los ríos, uniones, secciones, etc.; datos de caudal, y condiciones de borde.

5.4.1 Implementación de HEC-GeoRAS.

Con el fin de procesar la información geométrica necesaria para el desarrollo del modelo hidráulico en base al MDE del terreno es posible utilizar el HEC-GeoRAS. Este software consiste en una extensión que puede ser utilizada mediante el programa Arcview v3.2.

Mediante la utilización del software HEC-GeoHMS es posible extraer y exportar a HEC-HMS toda la información geométrica requerida para el modelamiento. Los procesos realizados en el procesamiento de dicha información a partir del MDE del terreno son:

⁶⁴ SUÁREZ, Control de Erosión en Zonas Tropicales, Op. cit., p. 171.

- El MDE del terreno es importado a Arcview, las obstrucciones (para este caso las viviendas) son incorporados a la grilla y a partir de esta se genera un **Triangulated Irregular Network** (TIN).
- Se importan las líneas que representan los centroides de los canales (en este caso generadas mediante HEC-GeoHMS), al igual que las secciones perpendiculares al flujo cuya geometría será extraída a partir del TIN del terreno, espaciadas generalmente, para este estudio, cada 5m (véase figura 93).
- Se crean polígonos que representen las zonas de flujo no efectivo.
- Se procede a extraer la respectiva geometría tanto de los canales como de las secciones trazadas, ubicando en estas las zonas de flujo no efectivo. En este punto se extrae información que incluye la nomenclatura de ríos y secciones, la geometría de estos, la longitud del río entre las secciones, entre otros.
- Una vez finalizado este proceso la información es exportada a HEC-RAS mediante la creación de un archivo de extensión *.RASimport.sdf.

Se debe considerar que, debido a que la geometría de las secciones será extraída a partir del TIN, es importante que exista información topográfica bastante precisa para que este último sea una representación fiel del terreno. En el presente estudio, gracias a la topografía existente con curvas de nivel cada 2m, la información procesada del TIN puede considerarse como muy similar al terreno real.

5.4.2 Modelamiento hidráulico por HEC-RAS.

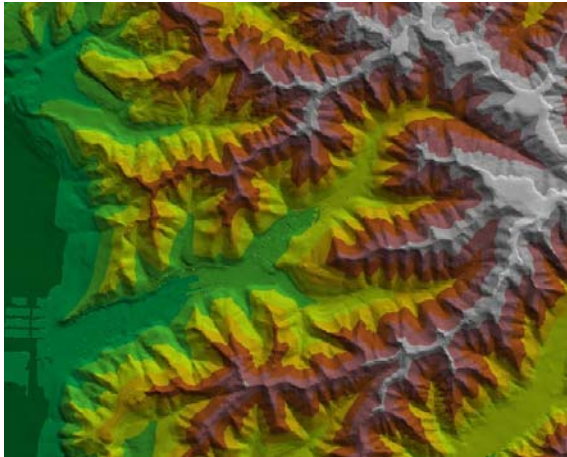
El modelamiento hidráulico del flujo es realizado mediante el uso del software HEC-RAS v.3.1.3 para un flujo permanente. De esta manera, se espera obtener mediante su implementación una estimación del nivel de agua alcanzado por la inundación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito.

HEC-RAS trabaja en base de la solución de la ecuación de energía unidimensional, donde las pérdidas de energía son calculadas mediante la ecuación de Manning y coeficientes de contracción y expansión. Según el **U.S. Army Corps of Engineers**⁶⁵, dichos

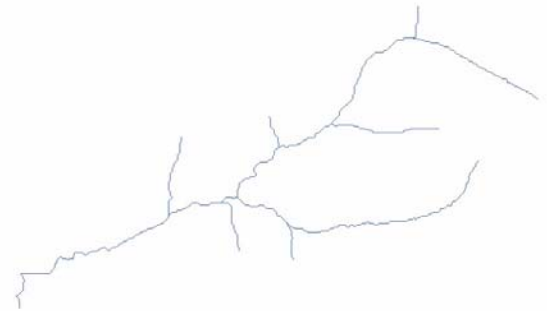
⁶⁵ U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual [online]. [U.S.A]: U.S.A.C.E., November 2002. Available from internet: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/hydref/>>

coeficientes pueden ser tomados como 0.1 y 0.3, respectivamente, para secciones con transiciones graduales y como 0.3 y 0.5 para secciones con transiciones fuertes (tales como el choque con una vivienda).

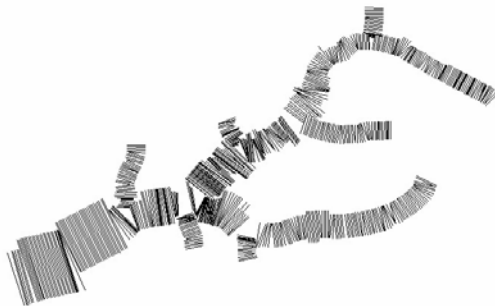
Figura 93. Esquema de los procesos realizados en HEC-GeoRAS.



(a) TIN del terreno y viviendas.



(b) Línea de centroides de los canales.



(c) Secciones trabajadas.



(d) Zonas de flujo no efectivo

Fuente: Archivo digital investigación.

De esta forma, HEC-RAS requiere de tres tipos de información para realizar el modelamiento: información geométrica (importada de HEC-GeoRAS), datos de caudales (obtenidos ya sea de NAM o HEC-HMS) y condiciones de frontera.

La información geométrica es importada de HEC-GeoRAS, aunque debe ser revisada y corregida, y las secciones de control deben ser introducidas. De igual forma, el número de Manning que se tomará para el presente estudio, igual a 0.2 ...véase numeral 5.3..., debe ser incorporado a todas las secciones, en conjunto con los valores de coeficiente de contracción (para transición gradual o fuerte según sea el caso).

Los datos de caudal pueden ser tomados ya sea de los resultados obtenidos mediante el uso del software NAM o del HEC-HMS. Lo anterior debido a que la diferencia existente entre los caudales máximos mostrados mediante la implementación de estos dos programas es menor al 5%, lo que se considera afecta muy poco los niveles de inundación que se hallarán mediante HEC-RAS. Considerando que los valores de caudal mostrados por NAM brindan niveles de inundación más cercanos a aquellos observados en campo (aunque con poca diferencia con los mostrados por HEC-HMS), los resultados obtenidos mediante su uso serán tomados como datos de entrada para HEC-RAS.

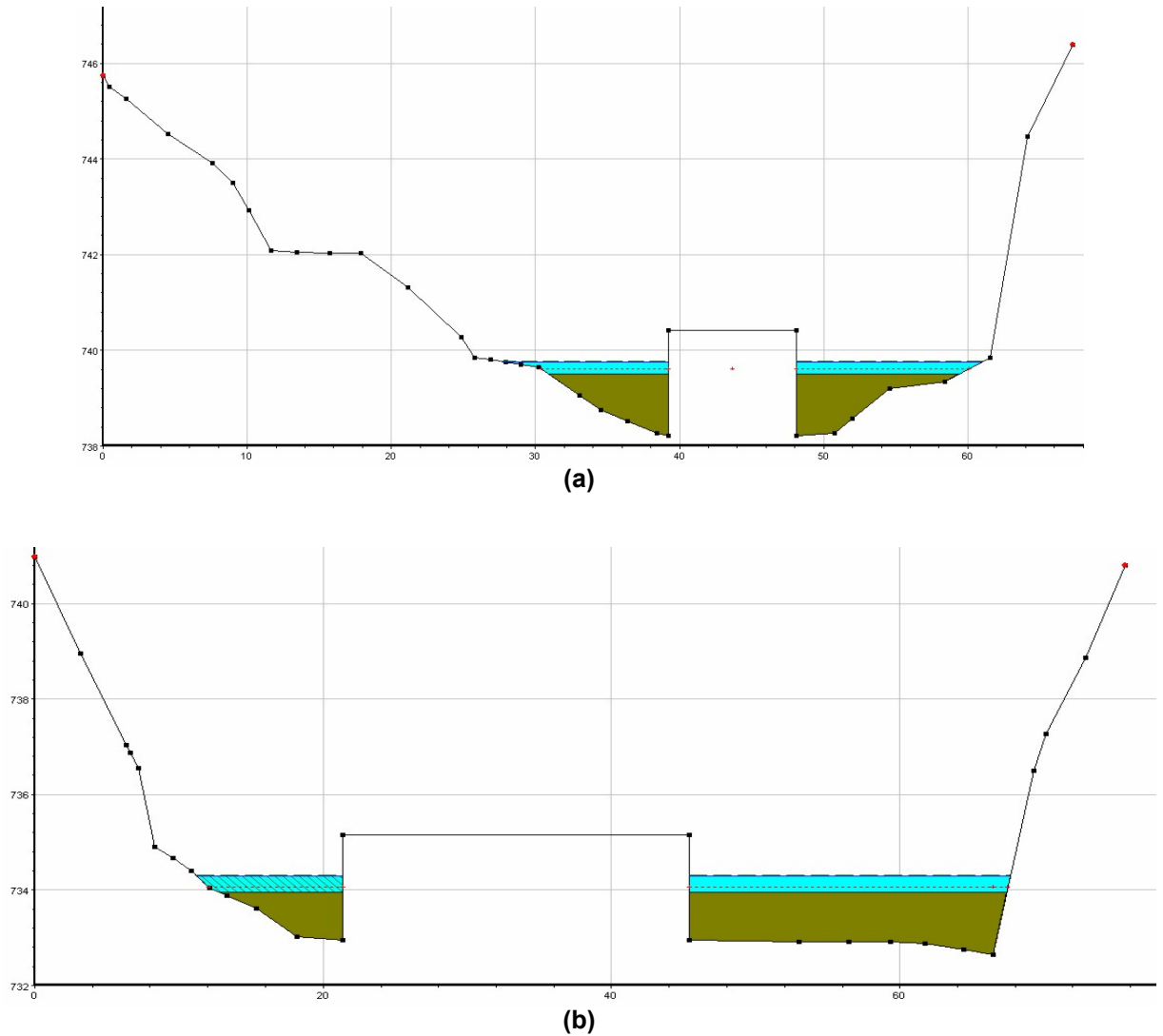
Debido a que en el presente estudio se realizará un modelamiento hidráulico para flujo permanente, solo se tomarán los valores de caudal máximo obtenidos con NAM. Dichos valores deben ser aumentados de acuerdo a la cantidad de sedimentos que transporta el flujo. De esta manera se tiene que los valores máximos de caudal hallados mediante NAM deben ser aumentados en un 33.64%, lo que resulta en un caudal máximo de agua y sedimentos a la salida de la cuenca estimado en $5.9\text{m}^3/\text{s}$. Debido a la falta de información existente, se implementarán en el modelo hidráulico condiciones de borde que corresponden a niveles críticos de flujo.

Los valores de caudal serán incorporados a cada corriente de acuerdo a las subcuencas de las cuales esta reciba aporte. En algunos casos, debido a que en el modelo hidráulico no se incorporan todas las corrientes de aporte, se incluirán cambios de caudal en secciones medias de los ríos.

Una vez incorporada toda la información necesaria es posible entrar a modelar el flujo. De esta manera se obtiene un nivel de inundación estimado para cada una de las secciones planteadas, dentro de las cuales se incluyen las secciones de control. Los niveles de inundación alcanzados en estas últimas, hallados mediante el modelamiento y tomados al

margen derecho de los bloques de casas, son de 1.54m para la sección 1 y 1.35m para la sección 2. Lo anterior indica espesores de lámina de agua iguales a 26cm y 35cm respectivamente (véase figura 94). Dichos niveles se muestran cercanos a los vistos en campo.

Figura 94. Esquema del nivel de inundación para: (a) sección de control 1 y (b) sección de control 2. Escala 1:150 vertical y 1:500 horizontal.



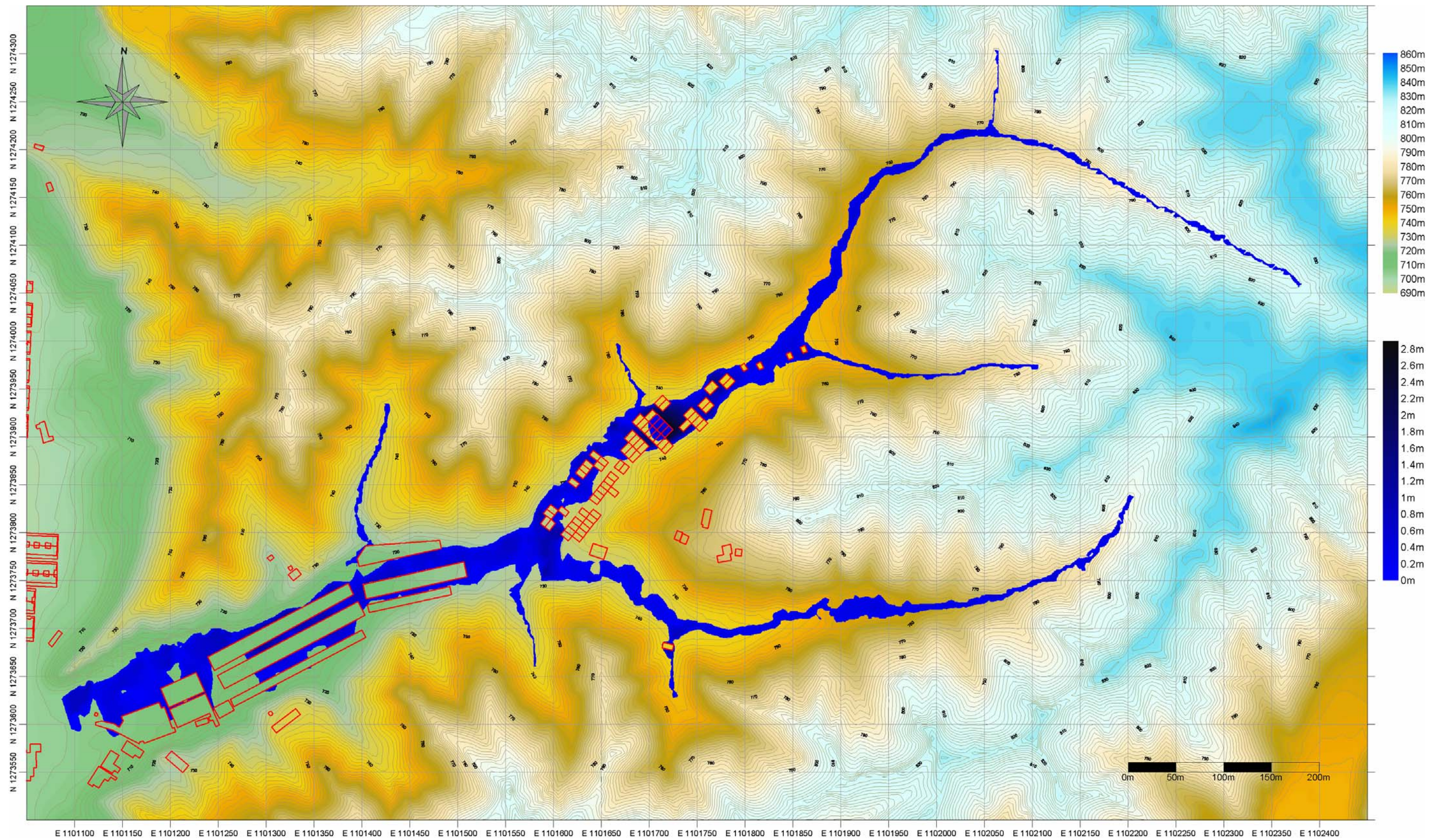
Fuente: Archivo digital investigación.

5.4.3 Delimitación de las zonas de inundación.

Luego de modelar el flujo es posible llegar a elaborar un plano que muestre las zonas de inundación presentadas durante el evento precipitación de Febrero en la cuenca de la quebrada Angulito. Lo anterior es logrado al exportar la información generada por HEC-RAS de vuelta a HEC-GeoRAS. Este último software puede procesar dicha información para crear el plano de las zonas de inundación presentadas (véase figura 95).

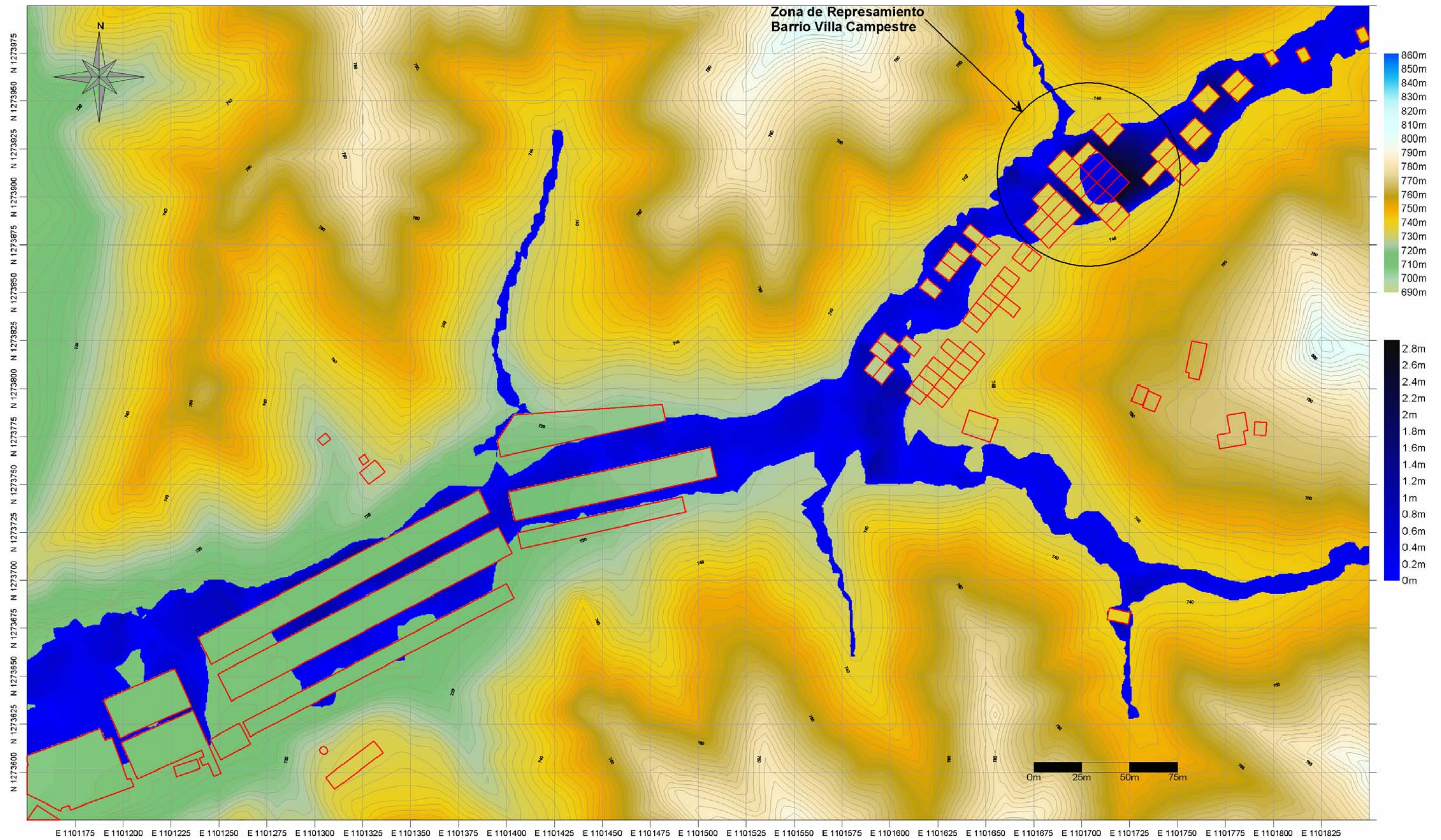
En este plano es posible observar la problemática existente en la zona correspondiente a la parte baja del barrio Villa Campestre (véase figura 96). En este sector existe una zona de represamiento, producto la invasión excesiva del cauce de la quebrada por asentamientos humanos. Lo anterior ocasiona niveles de agua que pueden llegar a cubrir la totalidad de la altura de algunas viviendas, causando su posible colapso tal como se observó en Febrero de 2005. De igual forma, en el plano se aprecia que las viviendas de los barrios Portal de Castilla, Villa Campestre, Angulito y algunos predios pertenecientes a la empresa Transejes de Colombia S.A., se encuentran localizados dentro del cauce de la quebrada y en su zona de inundación.

Figura 95. Plano de zonas de inundación para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:4000.



Fuente: Archivo digital investigación.

Figura 96. Plano de zonas de inundación para el evento de precipitación de Febrero de 2005 en los barrios localizados en la cuenca de la quebrada Angulito, escala 1:2000.



Fuente: Archivo digital investigación.

6. CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió caracterizar los mecanismos hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos del fenómeno que se presentó en Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito, en el municipio de Girón, departamento de Santander. A continuación se presenta un resumen de algunas de las conclusiones de la presente investigación:

6.1 ASPECTOS GEOTÉCNICOS

- Las principales características que afectan la susceptibilidad de las laderas de la cuenca de la quebrada Angulito a los flujos de lodos y detritos son las siguientes:
 - La permeabilidad alta del suelo.
 - La pendiente fuerte del terreno.
 - El contenido bajo de materiales finos (arcillas).
 - Las características dispersivas del suelo.
 - La falta de cobertura vegetal de raíz profunda.
 - El clima árido característico de la región.
- La permeabilidad alta del suelo facilita la infiltración y el rápido movimiento del flujo subterráneo superficial. Esto propicia la saturación rápida del suelo de los taludes. La permeabilidad es mayor en la superficie que a profundidad y esto permite que el agua de precipitación se infiltre más rápido de la que esta puede ser desalojada, produciendo la saturación de los perfiles superficiales del suelo.
- La cuenca presenta taludes de alta pendiente, donde más de un 47% de su extensión posee inclinaciones superiores al 57% (30°). Debido a esto, se estima que más del 72% del área total de la cuenca puede llegar a deslizarse bajo condiciones de saturación, en un solo evento de lluvias de gran intensidad.
- Los deslizamientos que se presentaron en la cuenca pueden ser atribuidos, de manera directa, a las propiedades dispersivas del material fino presente en la matriz del suelo. Dicha dispersión actúa de dos formas: ocasiona la pérdida inmediata de la cohesión presente en el suelo, produciendo una disminución drástica de la resistencia, y facilita el rápido lavado de la fase arcillosa provocando un colapso de su estructura.

- Aunque existe un bajo porcentaje de material fino en el suelo, este le aporta gran parte de su resistencia a manera de cohesión. Al saturarse, el material fino se dispersa, pierde su cohesión y se produce una disminución drástica y rápida de la resistencia general del suelo, causando las fallas.
- Mediante pruebas de laboratorio se comprobó que el suelo es altamente dispersivo, llegando a presentar porcentajes de dispersión incluso superiores al 90%.
- Las propiedades dispersivas del suelo de la cuenca se atribuyen a los altos contenidos de sodio intercambiable en la fase arcillosa, que llega a mostrar valores de ESP superiores al 16% (los más altos registrados en la región), y a la presencia de arcillas del tipo montmorillonita. Estas arcillas (montmorillonitas sódicas) son reconocidas por sus efectos adversos sobre la estabilidad del suelo a causa de sus características expansivas, que ocasionan su total disgregación y pérdida de cohesión al entrar en contacto con agua. Otros aspectos que propician la aparición de propiedades dispersivas en el suelo son los bajos niveles mostrados de calcio intercambiable, que facilitan la fijación de sodio en las partículas de arcilla, y la poca presencia de materia orgánica.
- El clima árido característico de la zona permite la formación de taludes de alta pendiente, debido a que el suelo posee una elevada resistencia en estado seco. De igual forma, climas secos con temperaturas elevadas ocasionan la precipitación en sales del calcio intercambiable presente en las partículas de arcilla y su reemplazo por iones sodio, promoviendo el aumento de sus características de dispersión con el tiempo.
- De acuerdo al modelo digital de deslizamientos, se estima que durante el evento de precipitación de Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito se presentó un área total de deslizamientos cercana a 95000m². Considerando una profundidad promedio para los deslizamientos igual a 1m, lo anterior equivaldría a un total de material removido de aproximadamente 160000 toneladas.
- Las inspecciones visuales en campo de los deslizamientos presentados durante el evento de precipitación de Febrero de 2005, muestran una correlación relativamente precisa con los resultados del modelo digital de deslizamientos desarrollado en esta investigación. Lo anterior puede ser explicado por la precisión de la modelación del tipo de deslizamiento ocurrido (traslacional de poca profundidad) mediante

herramientas computacionales. Los deslizamientos de traslación son fáciles de modelar y se correlaciona muy bien la teoría con la realidad.

- Se observa que, de haberse presentado un evento de precipitación de similar duración pero con intensidad un 15% superior (cerca de 3.2mm/h), el área de deslizamientos habría sido un 130% mayor, lo que equivaldría a un total de material removido superior a 370000 toneladas. Esto habría ocasionado una catástrofe de mayores proporciones.
- Se recomienda la adición de yeso agrícola como una posible solución a los problemas de dispersión que presentan los suelos de la cuenca. Tal como se observó en pruebas de laboratorio, la aplicación de un 1% en peso de yeso agrícola reduce drásticamente las propiedades dispersivas del suelo. Sus métodos de aplicación deben ser objeto de diseños detallados.
- Se considera que un plan de revegetalización de la cuenca puede ser utilizado como un posible mejorador de las condiciones del suelo. Se debe estudiar la utilización de especies nativas de raíz profunda, tales como el fique, para brindar al suelo una resistencia adicional que reduzca su susceptibilidad a deslizamientos. Se requiere que las profundidades de raíces de las especies a utilizar sean mayores a 1m.

6.2 ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

- El evento de precipitación presentado en Febrero de 2005 en la cuenca de la quebrada Angulito puede analizarse como cuatro eventos individuales consecutivos de alta intensidad y poca duración. Los primeros tres eventos ocasionaron la saturación del suelo de la cuenca, mientras que el último, más intenso y prolongado, terminó por activar los deslizamientos y generar los flujos.
- Mediante modelamientos hidrológicos e hidráulicos se estima que durante el evento de precipitación se obtuvo un caudal máximo de agua y sedimentos de aproximadamente $5.9\text{m}^3/\text{s}$. Considerando la cantidad de material removido se obtiene una concentración de sedimentos en el flujo cercana al 30%, por lo que puede clasificarse como un flujo hiperconcentrado. Este tipo de flujos puede ser representado como un fluido newtoniano, lo que permite su modelación hidráulica mediante la ecuación de Manning.
- Se observa en el modelo hidráulico de la quebrada Angulito que existen en su recorrido algunos lugares donde el cauce ha sido invadido prácticamente en su

totalidad. Esto genera la aparición de diversos represamientos que pueden ocasionar serios daños para las viviendas que los conforman, tal como se observó en Febrero de 2005. La principal problemática se muestra en el barrio Villa Campestre, donde el cauce ha sido reducido drásticamente, produciendo un represamiento mayor y una más alta sedimentación de material.

- Considerando el material que puede ser removido bajo condiciones de precipitaciones intensas (370000 toneladas debido a una precipitación de 3.2mm/h durante 108 horas), se concluye que se requiere la construcción de canales para el transporte de agua y sedimentos de un ancho superior a 20m.
- Aunque un sistema de piscinas, tal como el implementado hasta el momento, se muestra como una posible solución a corto plazo, su implementación no representa una solución definitiva a los problemas planteados. Esto debido a su rápida y fácil colmatación con los sedimentos transportados durante precipitaciones ordinarias, tal como se ha observado durante los primeros meses de funcionamiento de las piscinas construidas en la cuenca de la quebrada Angulito, que ya muestran una colmatación superior al 50%.
- Se requiere la instalación de un mayor número de estaciones hidrometeorológicas en la zona, con el fin de crear un sistema de alerta temprana basado en la identificación de eventos críticos de precipitación que puedan llegar a causar daños a la población.

6.3 ASPECTOS GENERALES

- Considerando que gran parte de la escarpa occidental de la meseta de Bucaramanga fue afectada por deslizamientos, se recomienda iniciar un programa extensivo de investigación con el fin de analizar sus mecanismos de ocurrencia en las demás cuencas y así diseñar medidas correctivas y de mitigación de los mismos.
- Considerando las características de los suelos de la cuenca y la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de precipitación superiores al presentado en Febrero de 2005, con resultados estimados catastróficos para la población, se debe estudiar la implementación de planes de reubicación para los sectores que pueden llegar a sufrir mayores daños, localizados tanto en las laderas de la cuenca como en la zona de inundación de la quebrada. Sobresalen en esta clasificación los barrios Angulito, Villa Campestre y Asocovigirón.

BIBLIOGRAFÍA

AGASSI, Menachem. Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. United States of America: Marcel Dekker, 1996. p. 4.

ANDRESSEN, R. and PULWARTY, R. Analysis of the Exceptional Rains Causing the Vargas Disaster in Venezuela, December, 1999. USA: Office Global Programs, 2000. p. 4-25.

APARICIO, Francisco. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa, 2001. 303 p.

AYOTTE, Dana. Predicting the Runout Behaviour of Debris Flows and Debris Avalanches. Vancouver, Canada: University of British Columbia. p. 2.

BEVEN, Keith. Rainfall-Runoff Modeling, The primer. England: John Wiley, June 2003. 372 p.

BRUFAU, P. *et al.* Mathematical Modeling of Debris Flow. En: Journal of Hydraulic Research. U.S.A. Vol. 38 (2000); p. 2-3.

BRUNSDEN, D. Mudslides Slope Instability. USA: Jhon Wiley, 1984. p. 363.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION. The Australian Soil Classification [online]. (Australia): CSIRO Land and Water, 2004. Available from internet: <http://www.clw.csiro.au/aclep/asc_re_on_line/so/sodosols.htm>

CRUDEN, D. and VARNES, D. Landslide Types and Processes in Landslides, Investigation and Mitigation. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1996. p. 40.

DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES (DPI). Soil Glossary [online]. [Victoria, Australia]: DPI, 2005. Available from internet: <http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/gloss_DG>

FORSYTHE, Peter. Experiences in Identification and Treatment of Dispersive Clays in Mississippi Dams. En: Symposium Presented at the American Society for Testing and Materials (ASTM). (79th : 1976 : Chicago). Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. Chicago: ASTM, 1976. 485 p.

GEOTECNOLOGÍA. Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen I: Geología y Geotecnia. Bucaramanga: CDMB, 2005. 81 p.

----- . Diagnóstico de las Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro, Volumen II: Meteorología e Información Hidrológica. Bucaramanga: CDMB, 2005. 74 p.

GENTIAOS, C. y LAFUENTE, M. Lluvias Torrenciales en Vargas Venezuela en Diciembre de 1999. Protección Ambiental y Recuperación Urbana. Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2000. p. 3-4.

GÓMEZ, I. y VÉLEZ, O. Predicción de las Fluctuaciones de los Niveles Freáticos a Partir de Precipitaciones y su Influencia en la Estabilidad de los Taludes en la Meseta de Bucaramanga. Medellín: Sociedad Colombiana de Geología, 1990. p. 20.

GRANT, Keith *et al.* Protecting a Dispersive Soil Storage by Water Treatment. En: Symposium Presented at the American Society for Testing and Materials (ASTM). (79th : 1976 : Chicago). Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. Chicago: ASTM, 1976. 485 p.

ISTANBULLUOGLU, Erkan. Evaluation of Precipitation Thresholds for Ground Saturation & Slope Stability [online]. [Utah, United States of America]: Utah State University, 2001. Available from internet: <<http://hydrology.neng.usu.edu/giswr/archive99/termp/erkan/tp.htm>>

LAROCCA, S. Zona de Convergencia Intertropical [en línea]. [Venezuela]: Instituto Meteorológico de Venezuela, 2000. Disponible en Internet: <<http://www.lmmeteoven.org/index.html>>

MADERO, E. Reacciones de Superficie en el Suelo. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 1994. p. 20.

MITCHELL, James K. Fundamentals of Soil Behavior. United States of America: John Wiley, 1976. 422 p.

SANTACANA, Núria. Analysis of the Susceptibility of a Hillside to the Break for Superficial Slips to Regional Scale [online]. [España]: University of Catalunya, sep. 2002 [cited September 2005]. Available from internet: <<http://www.tdx.cesca.es/TDX-0713101-113341>>

SEPULVEDA, S. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos. Aplicación en la Quebrada Las Cañas, Región Metropolitana. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Departamento de Geología, 1998. p. 6.

SHAFFER, Jen. Landslides & Mudslides [online]. [USA]: Oregon University, 2002 [cited December 2005]. Available from internet: <<http://www.wildfirenews.com/forests/forest/analysis.html>>

SILVA, Gustavo. Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas [en línea]. [Colombia]: Universidad Nacional de Colombia. [citado Junio 2005]. Disponible en internet: <<http://www.geocities.com/gsilvam/#publicaciones>>

SILVEIRA, N. Zona de Convergencia Intertropical [en línea]. [Brasil]: Fundación Cearense de Meteorología y Recursos Hídricos (FUNCEME), 2000. Disponible en Internet: <http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/caracna2.htm>

SITIAR, N. Initiation of Rainfall Induced Debris Flows. En: Simposio Panamericano de Deslizamientos. (1° : 1989 : Guayaquil). I Simposio Panamericano de Deslizamientos. Guayaquil, Ecuador, 1989. p. 23.

SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 1999. 548 p.

----- . Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos, 2001. 555 p.

TARBOTON, David. TARDEM, A Suite of Programs for the Analysis of Digital Elevation Data [online]. [Utah, United States of America]: Utah State University, 2000. Available from internet: <<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/tardem.html>>

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoHMS, User's Manual [online]. [USA]: U.S.A.C.E., December 2003. Available from internet: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/hechms-document.html>>

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual [online]. [U.S.A]: U.S.A.C.E., November 2002. Available from internet: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/hydrref/>>

VAN DER GRAAFF, Robert and PATTERSON, Robert A. Explaining the Mysteries of Salinity, Sodicity, SAR and ESP in On-site Practice [online]. [Armidale, Australia]: Lanfax Laboratories, sep. 2001 [cited September 22 2005]. Available from internet: <<http://www.lanfaxlabs.com.au/papers/P47-mysteries.PDF>>

VAN OLPHEN, H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. United States of America: John Wiley, 1963. 301 p.

VANDINE, D. Debris Flows and Debris Torrents in the South Canadian Cordillera. Montreal: Vandine Geological Engineering Services, 1985. p. 35.

VARGAS, M. Effect of Rainfall and Ground Water Levels. En: International Symposium on Soils Mechanics and Foundation Engineering. (4° : 1971 : New York). Panamerican Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering and 4th International Symposium on Soils Mechanics and Foundation Engineering. New York, 1971. p. 138-141.

VARNES, D. Landslides Types and Process, Special Report 29, Landslides and Engineering practice. Washington: HRB National Research Council, 1958. p. 25.

VIRGINIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Drainage Manual [online]. [Virginia, USA]: The Department, April 2002. Available from internet: <http://www.extranet.vdot.state.va.us/locdes/electronic%20pubs/2002%20Drainage%20Manual/pdf/_Start%20VDOT%20Drainage%20Manual.pdf>

WARD, Phillip. Dispersion of Saline and Non-saline Natric Mollisols and Alfisols [online]. Soil Science, Lippincott Williams & Wilkins, August 2004. Available from internet: <www.soilsci.com/pt/re/soilsci/fulltext.00010694-200408000-00002.htm>

WOLLE, C and HACHICH, W. Rain Induced Landslides in Southeastern Brazil. En: International Congress of Soil Mechanics. (12° : 1989 : Rio de Janeiro). Proceedings of the XII International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989. p. 1639-1642.

ZHANG, Hailin. Interpreting Soil Salinity Analyses [online]. [Oklahoma, USA]: Oklahoma State University, s.f. Available from internet: <http://www.soiltesting.okstate.edu/Extn_Pub/lab%20publications/L-297.pdf>

ANEXO A

Análisis granulométrico por tamizado

Los resultados obtenidos durante las pruebas de análisis granulométrico por tamizado de las muestras extraídas en la cuenca de la quebrada Angulito se muestran a continuación. Las muestras se nombran de acuerdo a un número arábigo que representa el estrato del cual fueron extraídas (1-5) y una letra que indica su orden de extracción. Los estratos analizados son: 1) miembro Finos formación Bucaramanga, 2) miembro Órganos nivel superior formación Bucaramanga, 3) estrato limoso miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga, 4) manto gravoso de 1m de espesor miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga, 5) estrato limoso miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga. Dichos estratos se encuentran ordenados según su localización en el perfil de suelo (superior a inferior).

Para mayor detalle sobre el sitio de extracción puede verse el plano de localización de muestreos ...véase numeral 4.4.1...

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

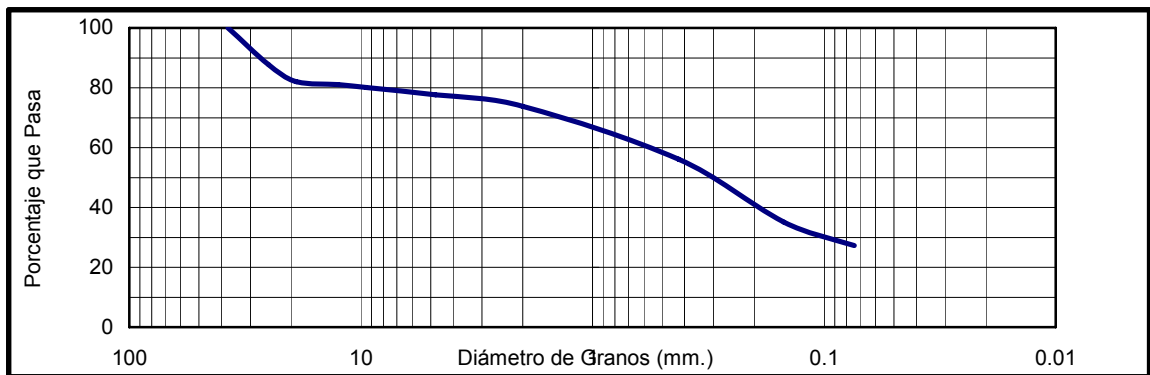
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 1	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	--------	--------------------	-------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	910.00
W. Tara (grs)	199.90
W. Suelo Seco (grs)	757.00
% Humedad	12.67

CLASIFICACION	
SUCS	SC
Descripción:	Arena arcillosa meteorizada color blanco y rojizo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamiz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1 1/2	37.500	0.00	100.00
1	25.000	93.20	87.69
3/4	19.000	43.00	82.01
1/2	12.500	7.30	81.04
3/8	9.500	6.70	80.16
4	4.760	19.20	77.62
10	2.000	28.90	73.80
40	0.425	133.70	56.14
100	0.149	159.30	35.10
200	0.074	59.60	27.23



Grava = 22.38%

Arena = 50.40%

Finos = 27.23%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

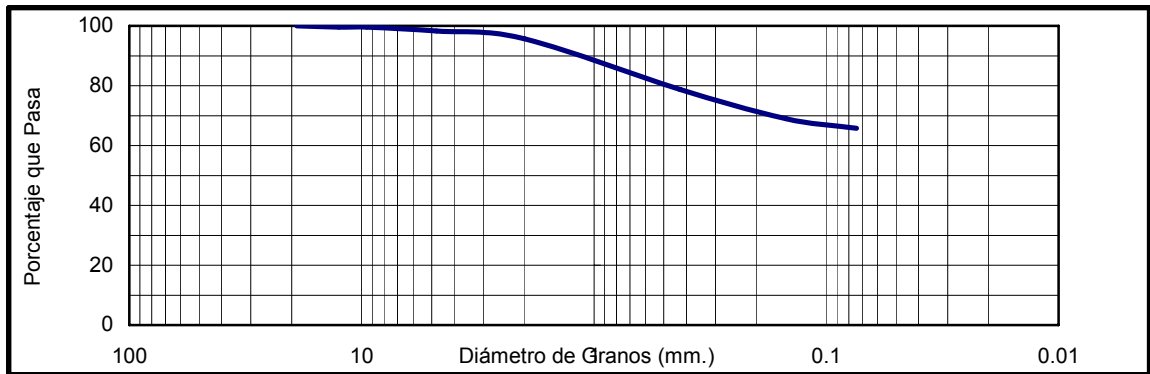
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 1A	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	986.00
W. Tara (grs)	194.50
W. Suelo Seco (grs)	791.50
% Humedad	1.77

CLASIFICACION	
SUCS	CL
Descripción:	Arcillosa color blanco y rojizo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
3/4	19.000	0.00	100.00
1/2	12.500	3.50	99.56
3/8	9.500	0.00	99.56
4	4.760	10.00	98.29
10	2.000	20.30	95.73
40	0.425	134.80	78.70
100	0.149	76.90	68.98
200	0.074	25.10	65.81



Grava = 1.71%

Arena = 32.48%

Finos = 65.81%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

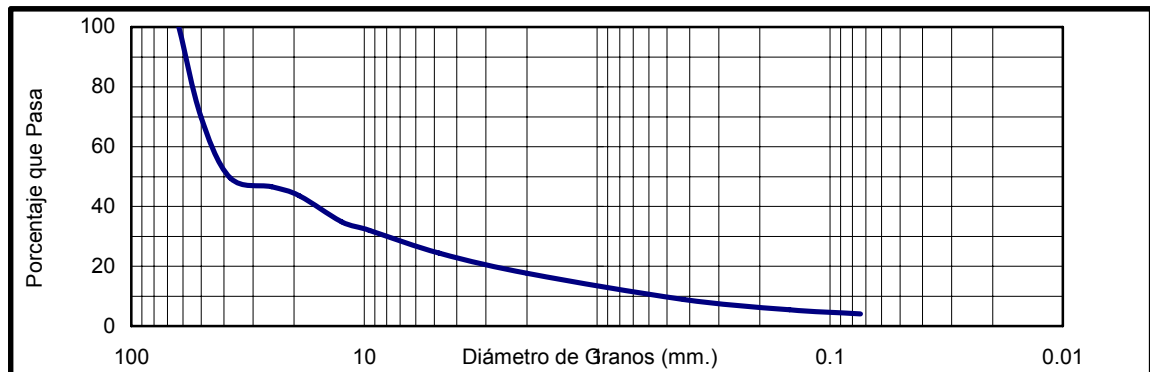
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2	PROFUNDIDAD superficial
---------------	-----------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	985.00
W. Tara (grs)	194.80
W. Suelo Seco (grs)	790.20
% Humedad	1.90

CLASIFICACION	
SUCS	GP
Descripción:	Grava redondeada mal gradada

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
2 1/2	62.500	0.00	100.00
2	50.000	239.50	69.69
1 1/2	37.500	159.30	49.53
1	25.000	23.00	46.62
3/4	19.000	23.30	43.67
1/2	12.500	69.80	34.84
3/8	9.500	22.80	31.95
4	4.760	59.40	24.44
10	2.000	53.50	17.67
40	0.425	69.30	8.90
100	0.149	27.50	5.42
200	0.074	11.00	4.02



Grava = 75.56%

Arena = 20.41%

Finos = 4.02%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

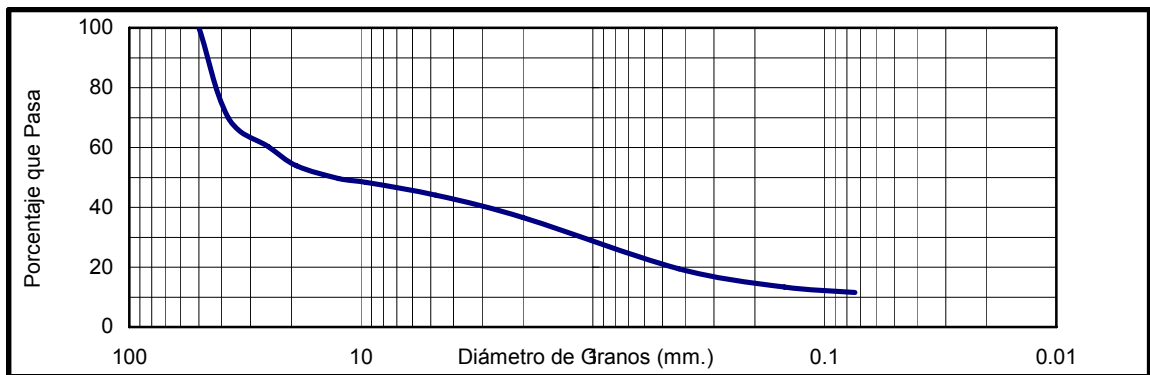
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2A	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	982.00
W. Tara (grs)	195.10
W. Suelo Seco (grs)	786.90
% Humedad	2.29

CLASIFICACION	
SUCS	GM-GC
Descripción:	Grava redondeada en matriz poco plastica

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
2	50.000	0.00	100.00
1 1/2	37.500	235.60	70.06
1	25.000	77.40	60.22
3/4	19.000	49.80	53.90
1/2	12.500	33.60	49.63
3/8	9.500	10.50	48.29
4	4.760	32.90	44.11
10	2.000	59.50	36.55
40	0.425	134.30	19.48
100	0.149	48.30	13.34
200	0.074	14.30	11.53



Grava = 55.89%

Arena = 32.58%

Finos = 12%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

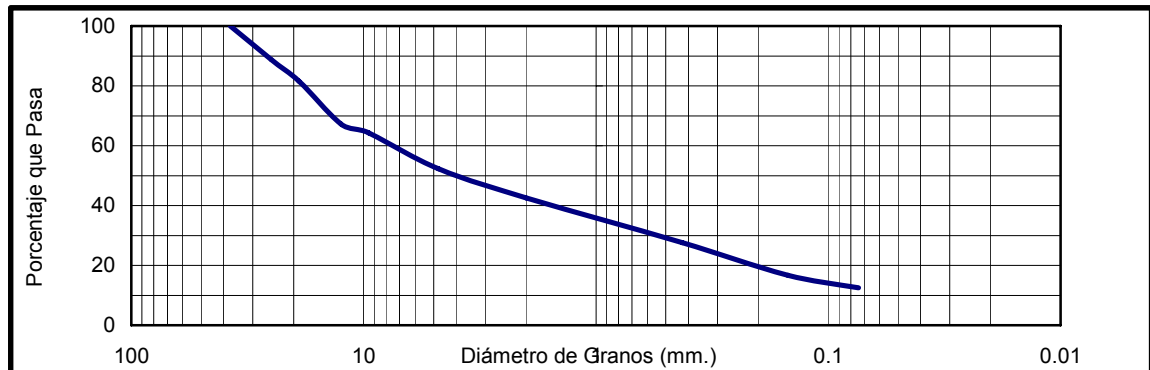
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 05/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2B	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	388.50
W. Tara (grs)	69.20
W. Suelo Seco (grs)	319.30
% Humedad	3.60

CLASIFICACION	
SUCS	GM-GC
Descripción:	Grava redondeada en matriz poco plastica

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
1 1/2	37.500	0.00	100.00
1	25.000	35.80	88.79
3/4	19.000	23.00	81.58
1/2	12.500	45.60	67.30
3/8	9.500	9.80	64.23
4	4.760	38.10	52.30
10	2.000	31.10	42.56
40	0.425	47.90	27.56
100	0.149	34.80	16.66
200	0.074	13.30	12.50



Grava = 47.70%

Arena = 39.81%

Finos = 12.50%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

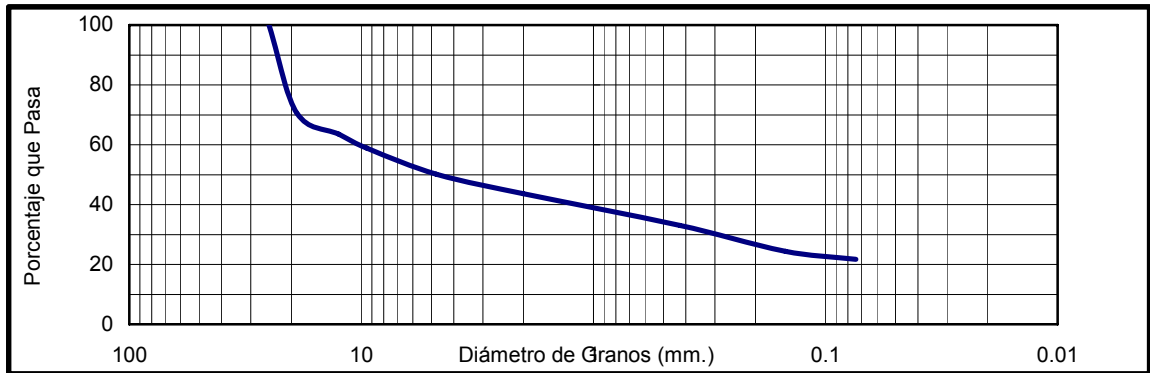
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 05/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 2C	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	---------	--------------------	-------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	382.50
W. Tara (grs)	72.40
W. Suelo Seco (grs)	310.10
% Humedad	5.64

CLASIFICACION	
SUCS	GM-GC
Descripción:	Grava redondeada en matriz poco plastica

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
Tamiz		Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
No.	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	91.20	70.59
1/2	12.500	22.00	63.50
3/8	9.500	14.10	58.95
4	4.760	27.40	50.11
10	2.000	20.05	43.65
40	0.425	33.00	33.01
100	0.149	26.70	24.40
200	0.074	8.40	21.69



Grava = 49.89%

Arena = 28.43%

Finos = 21.69%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

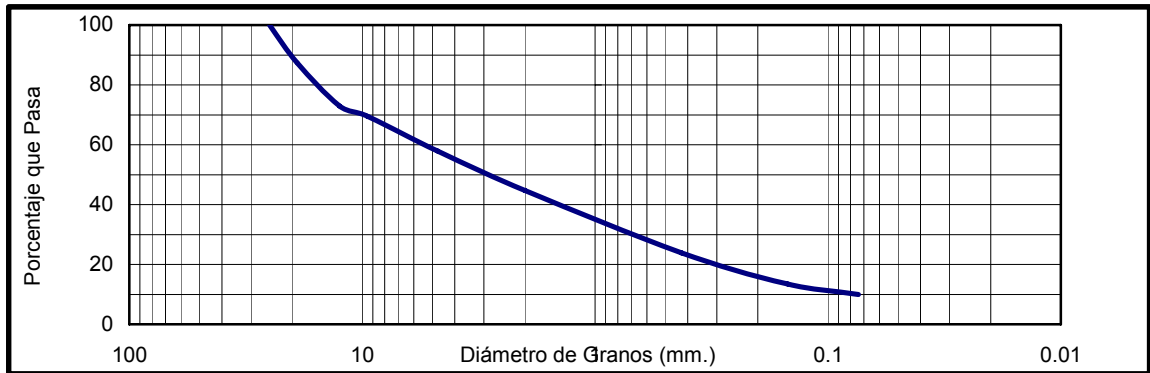
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 05/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 2D	PROFUNDIDAD
---------------	----------------	----------------	--------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	385.40
W. Tara (grs)	62.20
W. Suelo Seco (grs)	323.20
% Humedad	3.60

CLASIFICACION	
SUCS	GP-GC
Descripción:	Grava redondeada mal gradada en matriz arcillosa

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
1	25.000	0.00	100.00
3/4	19.000	40.90	87.35
1/2	12.500	46.40	72.99
3/8	9.500	11.20	69.52
4	4.760	37.20	58.01
10	2.000	42.90	44.74
40	0.425	67.50	23.86
100	0.149	33.60	13.46
200	0.074	11.40	9.93



Grava = 41.99%

Arena = 48.08%

Finos = 9.93%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

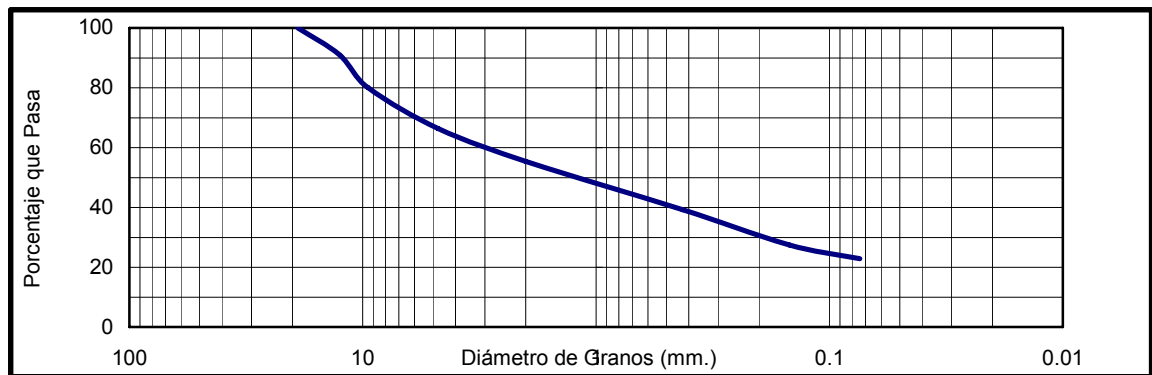
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 05/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2E	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	377.60
W. Tara (grs)	67.20
W. Suelo Seco (grs)	310.40
% Humedad	5.64

CLASIFICACION	
SUCS	GM-GC
Descripción:	Grava redondeada en matriz poco plastica

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
3/4	19.000	0.00	100.00
1/2	12.500	28.20	90.91
3/8	9.500	33.40	80.15
4	4.760	42.70	66.40
10	2.000	34.30	55.35
40	0.425	50.10	39.21
100	0.149	36.40	27.48
200	0.074	14.30	22.87



Grava = 33.60%

Arena = 43.52%

Finos = 22.87%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

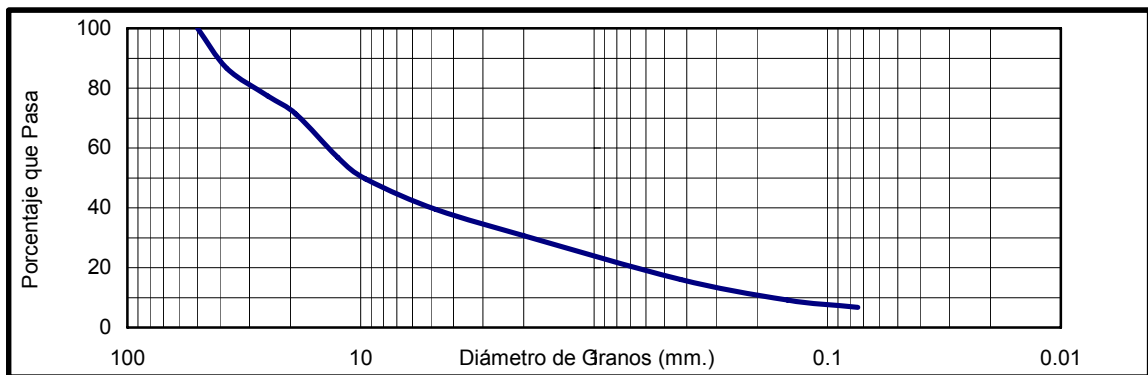
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 05/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2F	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	385.60
W. Tara (grs)	66.50
W. Suelo Seco (grs)	319.10
% Humedad	4.51

CLASIFICACION	
SUCS	GP-GC
Descripción:	Grava redondeada mal gradada en matriz arcillosa

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
2	50.000	0.00	100.00
1 1/2	37.500	42.70	86.62
1	25.000	29.80	77.28
3/4	19.000	18.80	71.39
1/2	12.500	46.60	56.78
3/8	9.500	22.80	49.64
4	4.760	32.50	39.45
10	2.000	27.90	30.71
40	0.425	46.90	16.01
100	0.149	21.70	9.21
200	0.074	7.80	6.77



Grava = 60.55%

Arena = 32.69%

Finos = 6.77%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

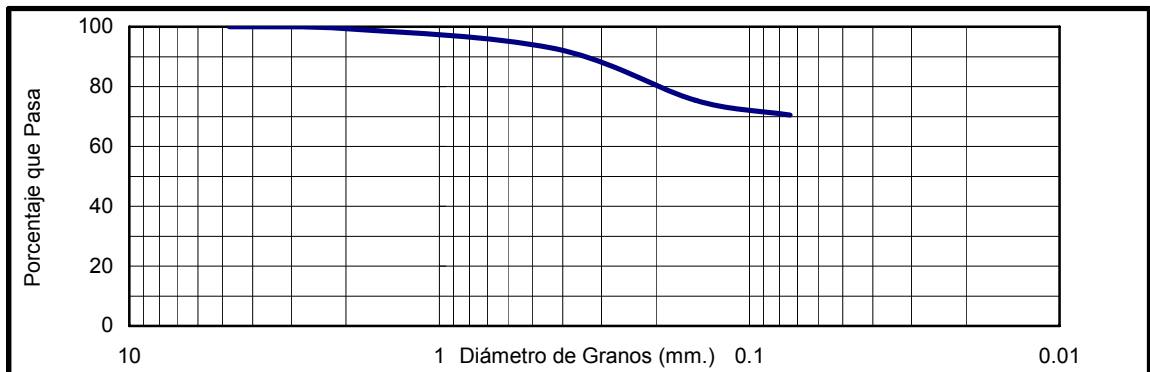
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 3	PROFUNDIDAD superficial
---------------	-----------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	959.00
W. Tara (grs)	195.70
W. Suelo Seco (grs)	763.30
% Humedad	5.37

CLASIFICACION	
SUCS	ML
Descripción:	Limo de baja plasticidad color rojizo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
4	4.760	0.00	100.00
10	2.000	5.10	99.33
40	0.425	50.60	92.70
100	0.149	132.10	75.40
200	0.074	37.50	70.48



Grava = 0.00%

Arena = 29.52%

Finos = 70.48%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

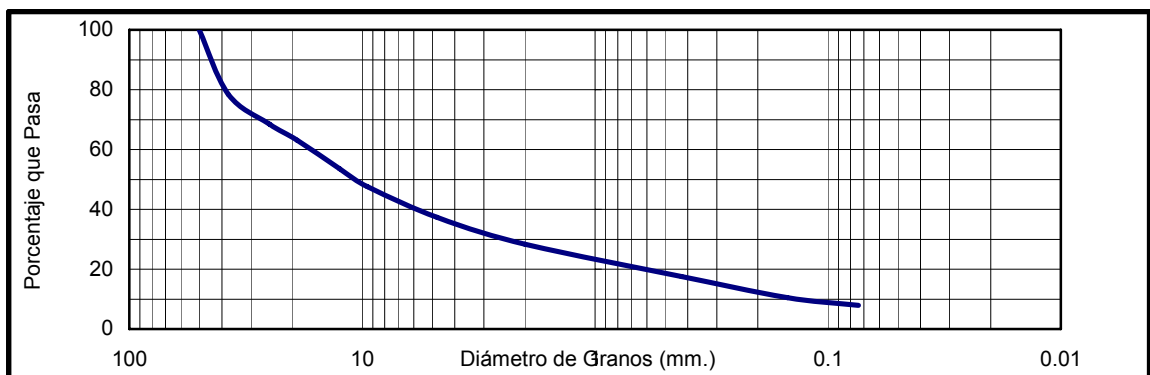
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 4	PROFUNDIDAD superficial
---------------	-----------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	973.00
W. Tara (grs)	197.20
W. Suelo Seco (grs)	775.80
% Humedad	3.48

CLASIFICACION	
SUCS	GP-GC
Descripción:	Grava mal gradada en matriz color rojizo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
2	50.000	0.00	100.00
1 1/2	37.500	167.20	78.45
1	25.000	77.60	68.45
3/4	19.000	41.60	63.08
1/2	12.500	73.80	53.57
3/8	9.500	46.40	47.59
4	4.760	79.70	37.32
10	2.000	69.50	28.36
40	0.425	83.60	17.58
100	0.149	55.30	10.45
200	0.074	20.00	7.88



Grava = 62.68%

Arena = 29.44%

Finos = 7.88%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
Normas INV-E 123 - ASTM D422 - AASHTO T88 - NLT 104

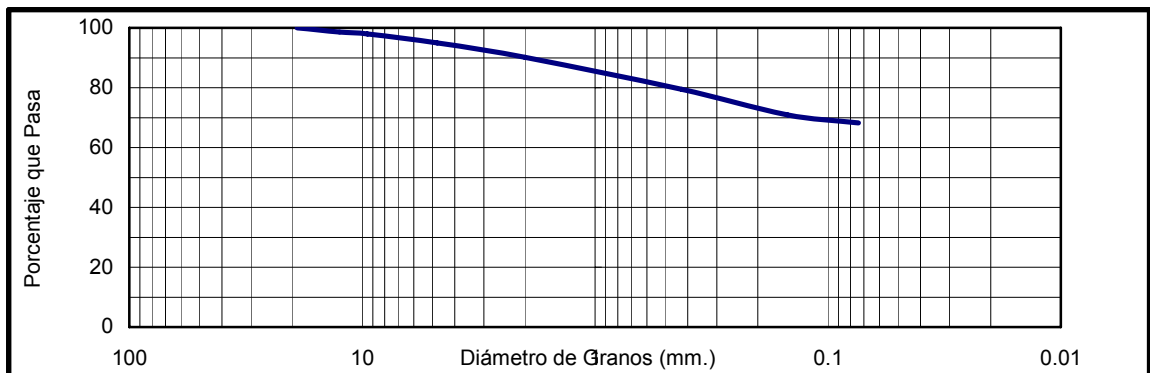
EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 5	PROFUNDIDAD superficial
---------------	-----------------------	--------------------------------

CONTENIDO DE HUMEDAD	
W. S. Seco + tara (grs)	892.00
W. Tara (grs)	197.30
W. Suelo Seco (grs)	694.70
% Humedad	15.55

CLASIFICACION	
SUCS	ML-CL
Descripción:	Limo-arcilloso de baja plasticidad color rojizo

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS			
No.	Tamiz	Peso Retenido grs.	% Que Pasa %
	mm.		
3/4	19.000	0.00	100.00
1/2	12.500	9.50	98.63
3/8	9.500	4.70	97.96
4	4.760	21.00	94.93
10	2.000	33.30	90.14
40	0.425	74.00	79.49
100	0.149	59.60	70.91
200	0.074	18.40	68.26



Grava = 5.07%

Arena = 26.67%

Finos = 68.26%

ANEXO B

Determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Los resultados obtenidos durante los ensayos de determinación de límites de los materiales de la cuenca de la quebrada Angulito se muestran a continuación. Las muestras se nombran de acuerdo a un número arábigo que representa el estrato del cual fueron extraídas (1-5) y una letra que indica su orden de extracción. Los estratos analizados son: 1) miembro Finos formación Bucaramanga, 2) miembro Órganos nivel superior formación Bucaramanga, 3) estrato limoso miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga, 4) manto gravoso de 1m de espesor miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga, 5) estrato limoso miembro Órganos nivel inferior formación Bucaramanga. Dichos estratos se encuentran ordenados según su localización en el perfil de suelo (superior a inferior).

Para mayor detalle sobre el sitio de extracción puede verse el plano de localización de muestreos ...véase numeral 4.4.1...

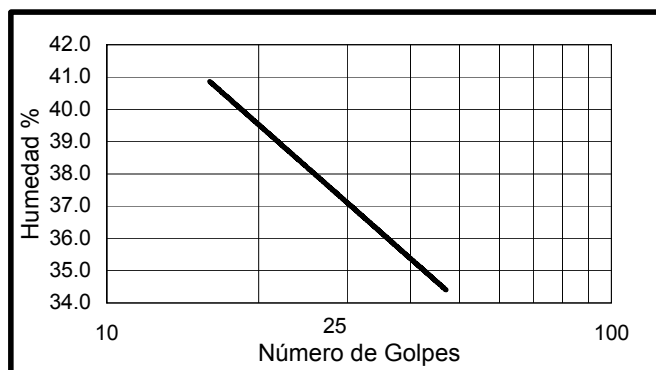
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 1	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	--------	--------------------	-------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	27.70	28.50	29.40	30.60
W tara + S. Seco	23.50	23.90	24.40	25.00
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	34.43	36.51	38.17	40.88
No. de Golpes	47	33	25	16

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.30	10.80		
W tara + S. Seco	9.30	9.60		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	20.00	22.64		



LIMITE LÍQUIDO	38.51
LIMITE PLÁSTICO	21.32
ÍNDICE PLÁSTICO	17.19
CLASIFICACIÓN	SC

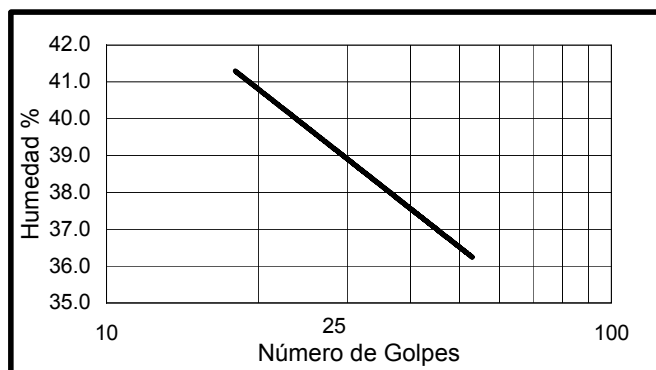
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 1A	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	------------------------	--------------------	-------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	27.70	28.60	29.40	30.60
W tara + S. Seco	23.40	23.90	24.30	25.00
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	35.54	37.30	39.23	40.88
No. de Golpes	53	43	35	18

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.60	11.10		
W tara + S. Seco	9.50	9.90		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	21.15	21.43		



LIMITE LÍQUIDO	40.11
LIMITE PLÁSTICO	21.29
ÍNDICE PLÁSTICO	18.82
CLASIFICACIÓN	CL

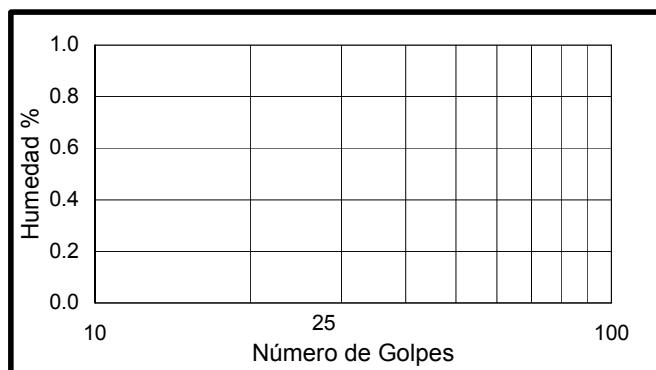
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 2	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	--------	--------------------	-------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	NP	NP	NP	NP
W tara + S. Seco	NP	NP	NP	NP
W tara	NP	NP	NP	NP
Humedad %	NP	NP	NP	NP
No. de Golpes	NP	NP	NP	NP

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	NP	NP		
W tara + S. Seco	NP	NP		
W tara	NP	NP		
Humedad %	NP	NP		



LIMITE LÍQUIDO	NP
LIMITE PLÁSTICO	NP
ÍNDICE PLÁSTICO	NP
CLASIFICACIÓN	GP

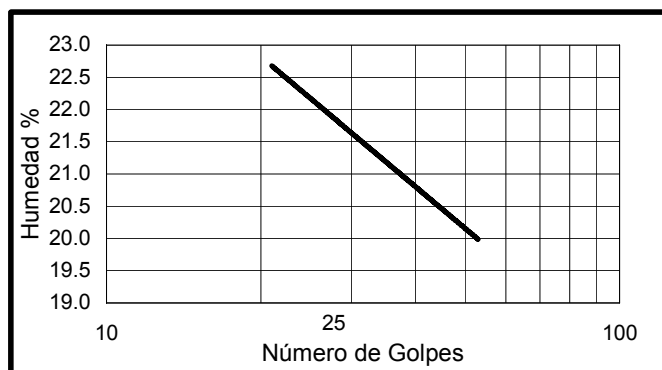
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 2A	PROFUNDIDAD superficial
---------------	------------------------	--------------------------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	23.50	24.60	25.90	26.50
W tara + S. Seco	21.50	22.30	23.30	23.70
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	19.61	20.91	21.67	22.58
No. de Golpes	53	45	30	21

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.30	11.00		
W tara + S. Seco	9.50	10.10		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	15.38	15.52		



LIMITE LÍQUIDO	22.23
LIMITE PLÁSTICO	15.45
ÍNDICE PLÁSTICO	6.78
CLASIFICACIÓN	GM-GC

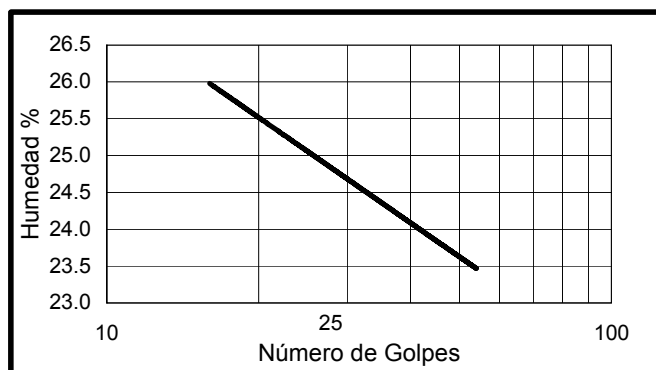
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 27/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 3	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	---------------	--------------------	-------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	29.60	30.40	31.70	32.60
W tara + S. Seco	26.10	26.70	27.60	28.20
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	23.65	24.03	25.15	26.04
No. de Golpes	54	35	25	16

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.70	11.20		
W tara + S. Seco	9.50	9.90		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	23.08	23.21		



LIMITE LÍQUIDO	25.17
LIMITE PLÁSTICO	23.15
ÍNDICE PLÁSTICO	2.02
CLASIFICACIÓN	ML

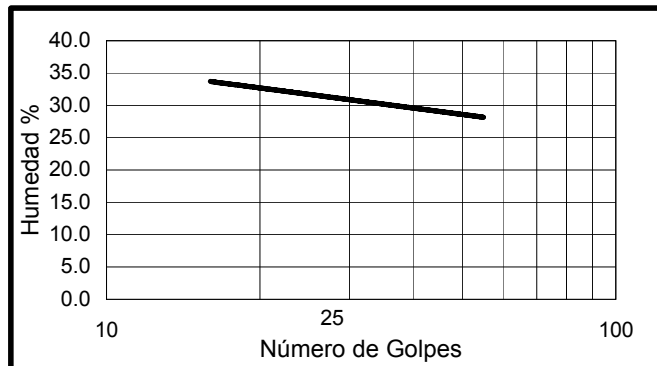
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 28/2005

SONDEO	MUESTRA	CAPA 4	PROFUNDIDAD	superficial
---------------	----------------	--------	--------------------	-------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	25.30	26.20	27.60	28.30
W tara + S. Seco	22.20	22.80	23.70	24.00
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	28.44	29.57	31.45	33.86
No. de Golpes	55	37	26	16

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.40	11.10		
W tara + S. Seco	9.30	9.80		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	22.00	23.64		



LIMITE LÍQUIDO	31.93
LIMITE PLÁSTICO	22.82
ÍNDICE PLÁSTICO	9.11
CLASIFICACIÓN	GP-GC

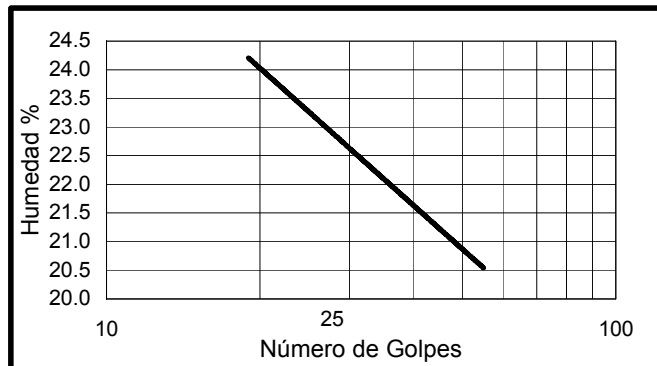
**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO
E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS
Normas INV-E 125-126 - AASHTO T89-790 - NLT 105-106**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	IVAN DARIO PIMIENTO
FECHA DE ENSAYO	JUNIO 28/2005

SONDEO	MUESTRA CAPA 5	PROFUNDIDAD superficial
---------------	-----------------------	--------------------------------

LIMITE LIQUIDO				
Tara No.	1	2	3	4
W tara + S. Hum.	24.30	25.10	26.60	27.30
W tara + S. Seco	22.10	22.60	23.70	24.20
W tara	11.30	11.30	11.30	11.30
Humedad %	20.37	22.12	23.39	24.03
No. de Golpes	55	37	25	19

LIMITE PLASTICO				
Tara No.	5	6		
W tara + S. Hum.	10.30	11.00		
W tara + S. Seco	9.50	10.10		
W tara	4.30	4.30		
Humedad %	15.38	15.52		

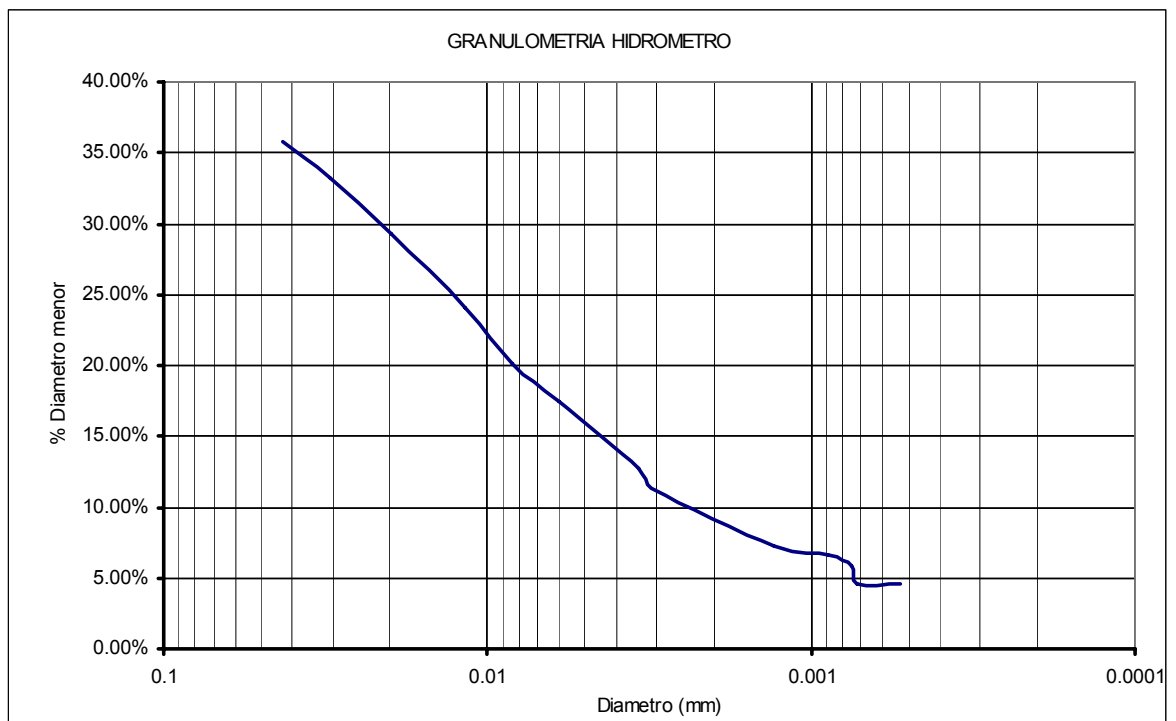


LIMITE LÍQUIDO	23.38
LIMITE PLÁSTICO	15.45
ÍNDICE PLÁSTICO	7.93
CLASIFICACIÓN	ML-CL

ANEXO C

Análisis granulométrico por medio del hidrómetro

El análisis de granulometría por hidrómetro se realizó sólo sobre el material fino perteneciente a la capa 2 (nivel superior miembro Órganos formación Bucaramanga), debido a que este es el material en el cual se presentaron la mayoría de los deslizamientos. Los resultados del ensayo se muestran a continuación.



ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO
Norma ASSHTO T88 - ASTM D422

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
MATERIAL	GRAVA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD COLOR ROJIZO
ENSAYADO POR	NESTOR SUAREZ - JAVIER SUAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 24/2005
TIPO DE HIDROM.	152H

DATOS

Peso seco (g)	75	Correccion de Cero	5	Correccion Menisco	1
Agente Dispersante	Hexametafosfato	GS de los Solidos	2.725	Alfa	0.985

Hora de la Lectura	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Correccion por Temperatura	Lectura	Lectura Corregida	% Mas Fino	Lectura Corregida Menisco	L (cm)	L/T	K	D (mm)
7/26/05 10:38	inicio										
7/26/05 10:39	1	24	1.3	30	27.30	35.85%	31	11.2	11.2000	0.01273	0.0426
7/26/05 10:40	2	24	1.3	28	25.30	33.23%	29	11.5	5.7500	0.01273	0.0305
7/26/05 10:44	5	24	1.3	25	22.30	29.29%	26	12	2.4000	0.01273	0.0197
7/26/05 10:54	15	24	1.3	21	18.30	24.03%	22	12.7	0.8467	0.01273	0.0117
7/26/05 11:09	30	24	1.3	18	15.30	20.09%	19	13.2	0.4400	0.01273	0.0084
7/26/05 11:39	60	24	1.3	16	13.30	17.47%	17	13.5	0.2250	0.01273	0.006
7/26/05 13:53	194	25	1.7	12	9.70	12.74%	13	14.2	0.0732	0.01258	0.0034
7/26/05 14:49	250	24.5	1.5	11	8.50	11.16%	12	14.3	0.0572	0.01266	0.003
7/27/05 10:06	1407	24.5	1.5	8	5.50	7.22%	9	14.8	0.0105	0.01266	0.0013
7/28/05 13:19	3040	24.5	1.5	7.5	5.00	6.57%	8.5	14.9	0.0049	0.01266	0.0009
7/29/05 9:54	4275	24.5	1.5	7	4.50	5.91%	8	15	0.0035	0.01266	0.0007
7/29/05 17:08	4709	24.5	1.5	6	3.50	4.60%	7	15.2	0.0032	0.01266	0.0007
8/1/05 11:33	8694	24.5	1.5	6	3.50	4.60%	7	15.2	0.0017	0.01266	0.0005

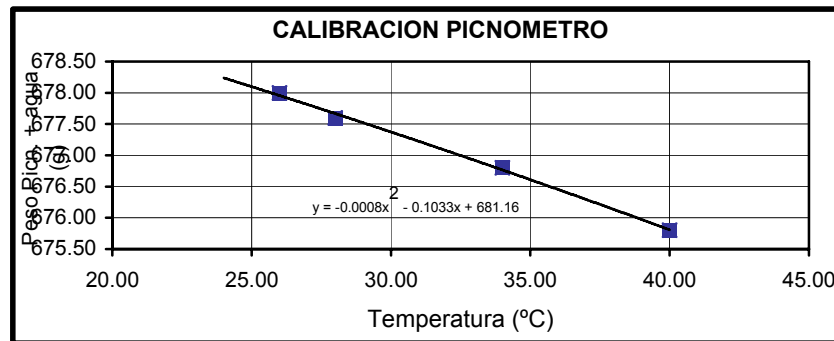
ANEXO D

Determinación del peso específico del suelo y del llenante mineral

DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO DEL SUELO Y DEL LLENANTE MINERAL
Normas AASHTO T84 - ASTM C128

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
MATERIAL	CAPA 2: GRAVA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD COLOR ROJIZO
ENSAYADO POR	NESTOR SUAREZ - JAVIER SUAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 22/2005
TIPO PICNOMETRO	CAPACIDAD 500ml

CALIBRACION DEL PICNOMETRO	
Temperatura (°C)	Peso con agua (gr)
40	675.80
34	676.80
28	677.60
26	678.00



PASANTE TAMIZ No. 4		RETENIDO TAMIZ No. 4	
Peso del Picnometro. + Agua + Muestra (g)	765.1	Peso en aire de muestra S.S.S. (g)	1259.5
Temp. del Ensayo (°C)	24	Peso en agua de muestra saturada	772
Valor de K	0.9991	% Retenido Tamiz No. 4	55.89%
Peso Picn.+Agua (g)	678.22		
Peso muestra seca (g)	139.09		
% Ret. Tamiz No. 4	44.11%		

RESULTADOS	
Gs (Pasa tamiz 4)=	2.662
Ga (Ret tamiz 4)=	2.584
G =	2.617

ANEXO E

Peso unitario del suelo en el terreno mediante el método del cono de arena

**PESO UNITARIO DEL SUELO EN EL TERRENO
MÉTODO DEL CONO DE ARENA
Norma ASSHTO T191-61 - ASTM D1556-64**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO
MATERIAL	CAPA 2: GRAVA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD COLOR ROJIZO
ENSAYADO POR	NESTOR SUAREZ - JAVIER SUAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 24/2005

Peso específico real seco (g/cm³): 2.676

DATOS DE CAMPO

Muestra No.		1	2
Abscisa		CUENCA ANGULITO	CUENCA ANGULITO
Cota		Sector Subcuenca Oeste	Sector Subcuenca Este
Wmuestra hum.	gr	2648.00	1866.00
Densidad Arena	gr/cm ³	1.400	1.400
Wcono antes	gr	5905.00	5838.00
Wcono después	gr	2295.00	2690.00
Warena cono	gr	1608.00	1608.00
Warena hueco	gr	2002.00	1540.00
Vol. hueco	cm ³	1430.00	1100.00
Densidad Húmeda	gr/cm ³	1.852	1.696

HUMEDAD

Tara No.		1	2
Wtara	gr	7.1	5.46
Wtara+suelo húm.	gr	60.14	42.82
Wtara+suelo sec.	gr	57.76	40.63
Humedad	%	4.70	6.23

DENSIDAD Y POROSIDAD EN CAMPO

Densidad Seca	gr/cm ³	1.769	1.597
Porosidad		33.907%	40.324%

ANEXO F

Ensayo de corte directo consolidado drenado

Para la determinación de los parámetros de resistencia al corte se realizaron dos ensayos de corte directo sobre material perteneciente al nivel superior del miembro Órganos. El material fue probado bajo condiciones de baja humedad (para simular su resistencia en estado seco) y saturación (resistencia en las peores condiciones).

Durante el ensayo de corte directo para el estado saturado se tomaron siete niveles de esfuerzo normal, mientras que para la condición de baja humedad se tomaron solo cuatro. Con el fin de simular la condición de saturación, el material se sumergió en agua durante uno a tres días, tiempo durante el cual fue igualmente sometido a la carga normal para permitir la consolidación.

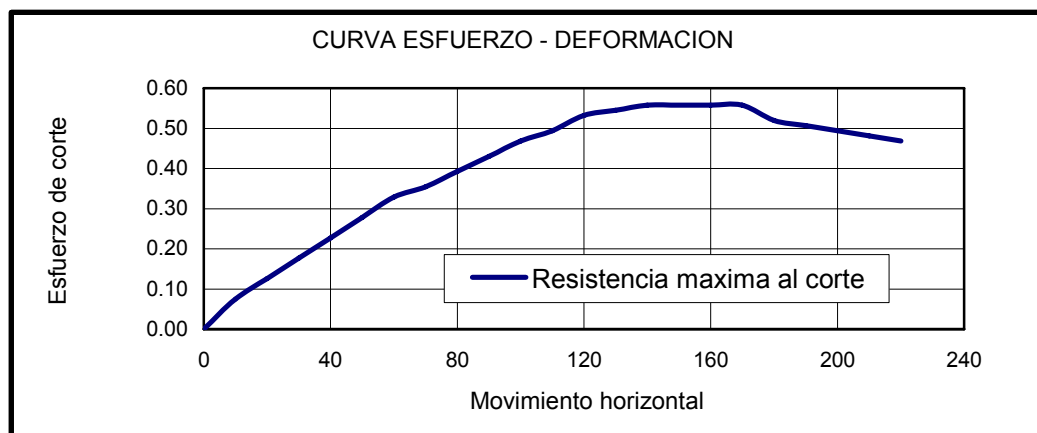
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia seca)

Carga :	15.213	kg	Punto No :	1
Esfuerzo vertical :	0.480	kg/cm ²	Velocidad Corte:	1.2

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	22	7	0.0747
20	40	11	0.1256
30	54	15	0.1765
40	74	19	0.2274
50	86	23	0.2782
60	105	27	0.3290
70	120	29	0.3545
80	144	32	0.3926
90	160	35	0.4307
100	172	38	0.4688
110	182	40	0.4942
120	185	43	0.5323
130	186	44	0.5450
140	183	45	0.5577
150	178	45	0.5577
160	170	45	0.5577
170	150	45	0.5577
180	140	42	0.5196
190	130	41	0.5069
200	119	40	0.4942
210	109	39	0.4815
220	99	38	0.4688



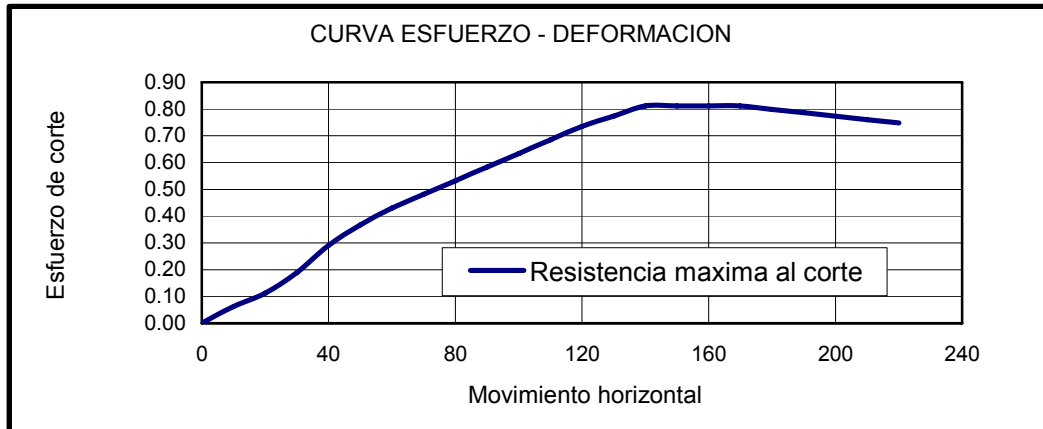
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia seca)

Carga :	25.213	kg	Punto No :	2
Esfuerzo vertical :	0.796	kg/cm ²	Velocidad Corte:	1.2

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE SATURADO

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	25	6	0.0620
20	48	10	0.1129
30	120	16	0.1892
40	132	24	0.2909
50	145	30	0.3672
60	160	35	0.4307
70	171	39	0.4815
80	186	43	0.5323
90	202	47	0.5830
100	215	51	0.6338
110	225	55	0.6846
120	229	59	0.7353
130	230	62	0.7734
140	226	65	0.8114
150	220	65	0.8114
160	208	65	0.8114
170	195	65	0.8114
180	180	64	0.7987
190	164	63	0.7861
200	150	62	0.7734
210	134	61	0.7607
220	118	60	0.7480



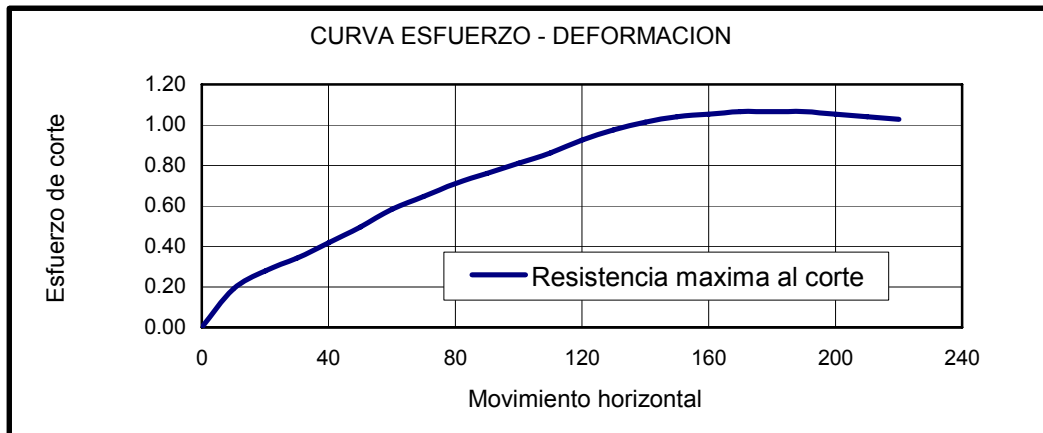
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia seca)

Carga :	35.213	kg	Punto No :	3
Esfuerzo vertical :	1.112	kg/cm ²	Velocidad Corte:	1.2

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	70	16	0.1892
20	130	23	0.2782
30	180	28	0.3417
40	251	34	0.4180
50	294	40	0.4942
60	350	47	0.5830
70	410	52	0.6465
80	451	57	0.7099
90	470	61	0.7607
100	490	65	0.8114
110	497	69	0.8621
120	501	74	0.9255
130	504	78	0.9762
140	500	81	1.0142
150	490	83	1.0396
160	478	84	1.0522
170	463	85	1.0649
180	452	85	1.0649
190	445	85	1.0649
200	434	84	1.0522
210	421	83	1.0396
220	411	82	1.0269



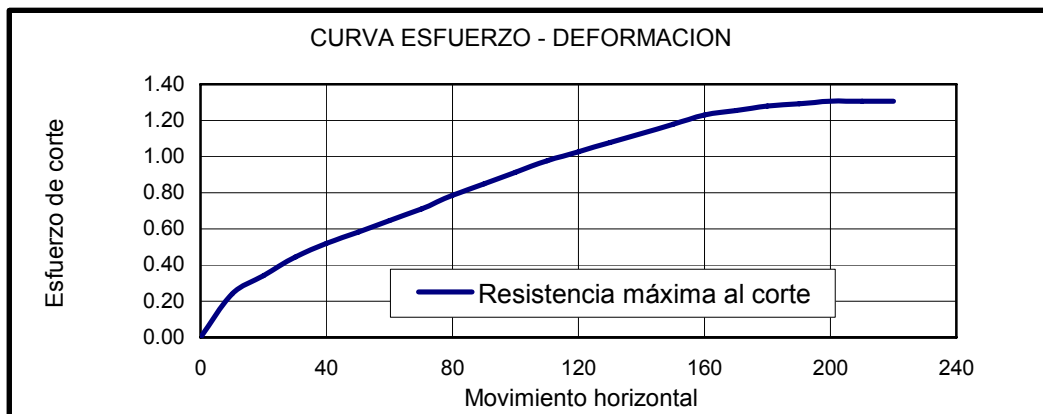
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia seca)

Carga :	45.213	kg	Punto No :	4
Esfuerzo vertical :	1.428	kg/cm ²	Velocidad Corte:	1.2

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL	ESFUERZO
HORIZONTAL	VERTICAL	DE	DE CORTE
1E-3 pulg	2E-3 mm	CARGA	kg/cm ²
0	0	0	0
10	51	20	0.2401
20	92	28	0.3417
30	137	36	0.4434
40	188	42	0.5196
50	241	47	0.5830
60	281	52	0.6465
70	315	57	0.7099
80	333	63	0.7861
90	352	68	0.8495
100	368	73	0.9128
110	377	78	0.9762
120	390	82	1.0269
130	401	86	1.0776
140	410	90	1.1282
150	415	94	1.1789
160	418	98	1.2295
170	421	100	1.2548
180	415	102	1.2801
190	405	103	1.2928
200	394	104	1.3055
210	380	104	1.3055
220	363	104	1.3055



PARAMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE
ENSAYO DE CORTE DIRECTO CONSOLIDADO DRENADO
Equipo WYKEHAM FARRANCE Modelo No. 25401 Serie No. 105705-0
Normas INV-E 154 - ASTM D3080 - AASHTO T236

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
LOCALIZACIÓN	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia seca)

Sondeo		Muestra	CAPA 2A	Profundidad	superficial
---------------	--	----------------	---------	--------------------	-------------

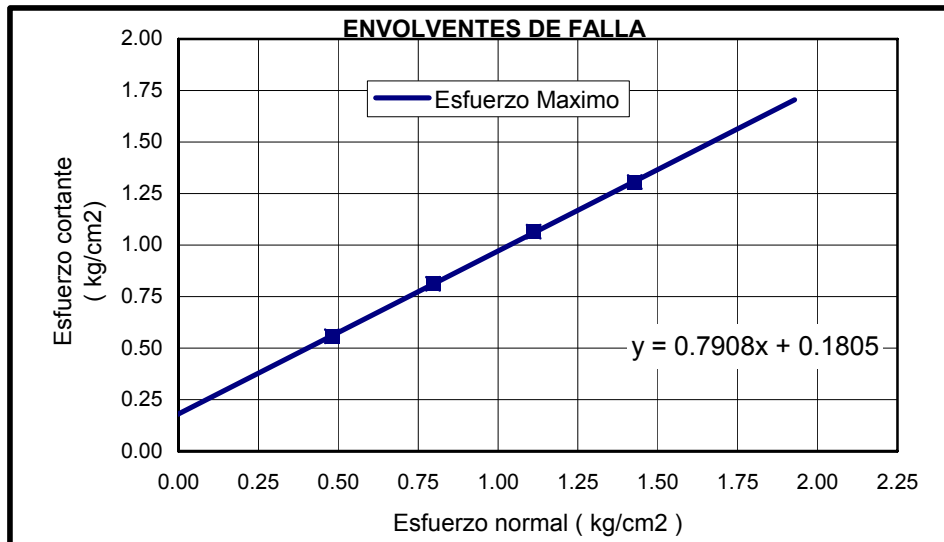
Descripción del suelo : Arena Arcillosa Meteorizada
 Color blanco y rojizo

Estado de la muestra Alterada Humeda
 Inalterada Saturada

Fecha Ensayo: JUL18/2005

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Prueba Numero	Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo Cortante Máximo Kg/cm ²
1	0.480359962	0.5577
2	0.796116198	0.8114
3	1.111872434	1.0649
4	1.427628671	1.3055



Parámetros	Máximos
Angulo de fricción interna	38.335
Cohesión kg/cm ²	0.180

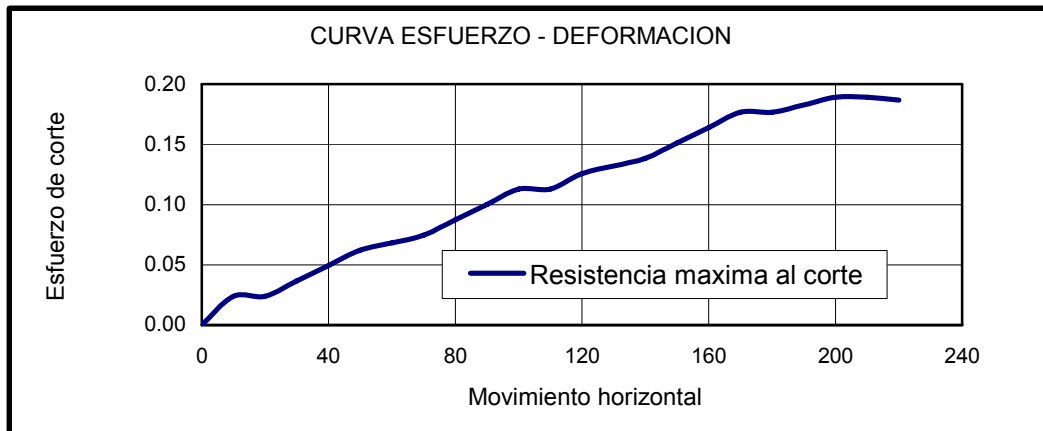
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	5.213	kg	Punto No :	1
Esfuerzo vertical :	0.165	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	30	3	0.0239
20	72	3	0.0239
30	112	4	0.0366
40	146	5	0.0493
50	159	6	0.0620
60	175	6.5	0.0684
70	186	7	0.0747
80	204	8	0.0875
90	225	9	0.1002
100	244	10	0.1129
110	258	10	0.1129
120	269	11	0.1256
130	274	11.5	0.1320
140	276	12	0.1383
150	278	13	0.1511
160	281	14	0.1638
170	285	15	0.1765
180	270	15	0.1765
190	265	15.5	0.1829
200	255	16	0.1892
210	247	16	0.1892
220	242	15.8	0.1867



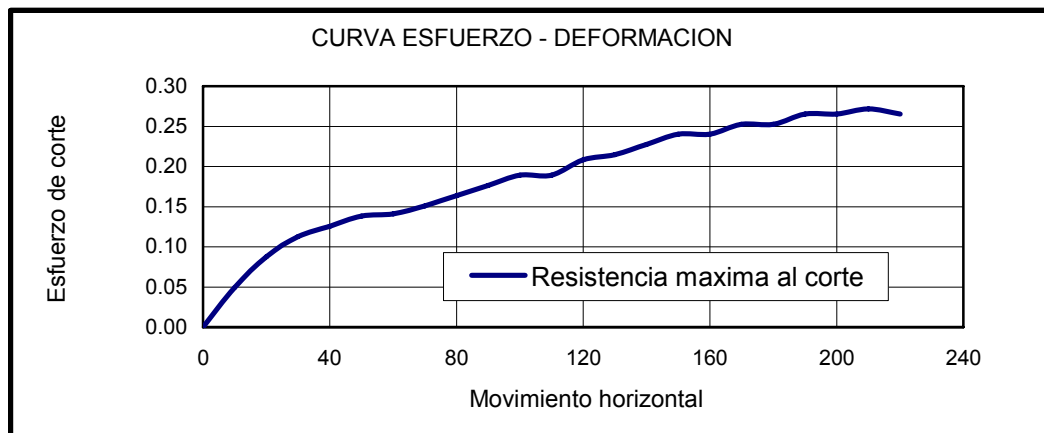
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	8.213	kg	Punto No :	2
Esfuerzo vertical :	0.259	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	18	5	0.0493
20	32	8	0.0875
30	37	10	0.1129
40	46	11	0.1256
50	83	12	0.1383
60	95	12.2	0.1409
70	140	13	0.1511
80	190	14	0.1638
90	205	15	0.1765
100	230	16	0.1892
110	263	16	0.1892
120	302	17.5	0.2083
130	310	18	0.2146
140	324	19	0.2274
150	348	20	0.2401
160	356	20	0.2401
170	358	21	0.2528
180	371	21	0.2528
190	370	22	0.2655
200	361	22	0.2655
210	350	22.5	0.2718
220	342	22	0.2655



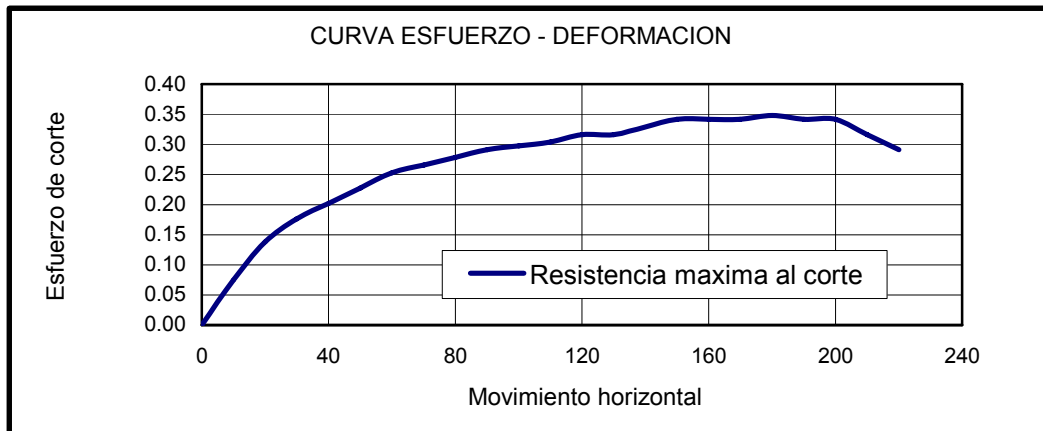
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	10.213	kg	Punto No :	3
Esfuerzo vertical :	0.322	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	16	7	0.0747
20	39	12	0.1383
30	59	15	0.1765
40	68	17	0.2019
50	91	19	0.2274
60	101	21	0.2528
70	119	22	0.2655
80	138	23	0.2782
90	159	24	0.2909
100	171	24.5	0.2973
110	181	25	0.3036
120	186	26	0.3163
130	195	26	0.3163
140	198	27	0.3290
150	200	28	0.3417
160	201	28	0.3417
170	201	28	0.3417
180	194	28.5	0.3481
190	180	28	0.3417
200	175	28	0.3417
210	164	26	0.3163
220	162	24	0.2909



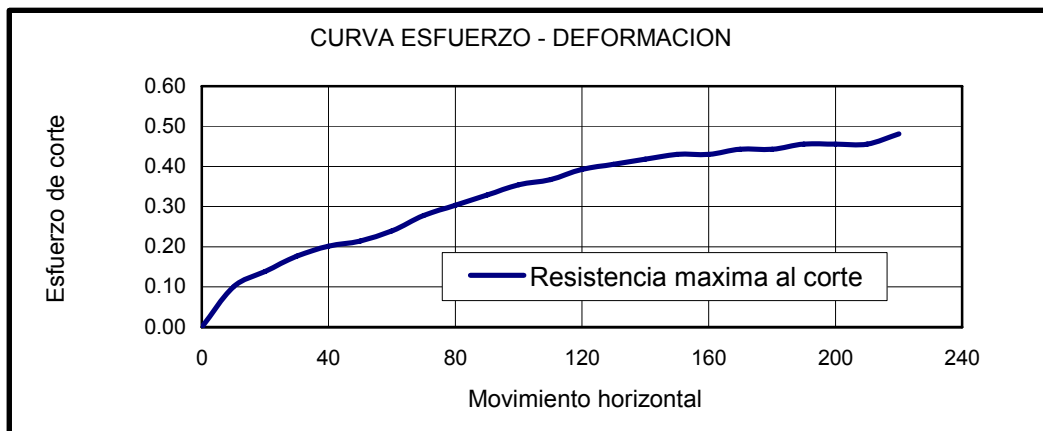
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	15.213	kg	Punto No :	4
Esfuerzo vertical :	0.480	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	35	9	0.1002
20	80	12	0.1383
30	134	15	0.1765
40	175	17	0.2019
50	193	18	0.2146
60	22	20	0.2401
70	257	23	0.2782
80	275	25	0.3036
90	289	27	0.3290
100	305	29	0.3545
110	320	30	0.3672
120	336	32	0.3926
130	346	33	0.4053
140	350	34	0.4180
150	355	35	0.4307
160	357	35	0.4307
170	358	36	0.4434
180	357	36	0.4434
190	357	37	0.4561
200	355	37	0.4561
210	353	37	0.4561
220	148	39	0.4815



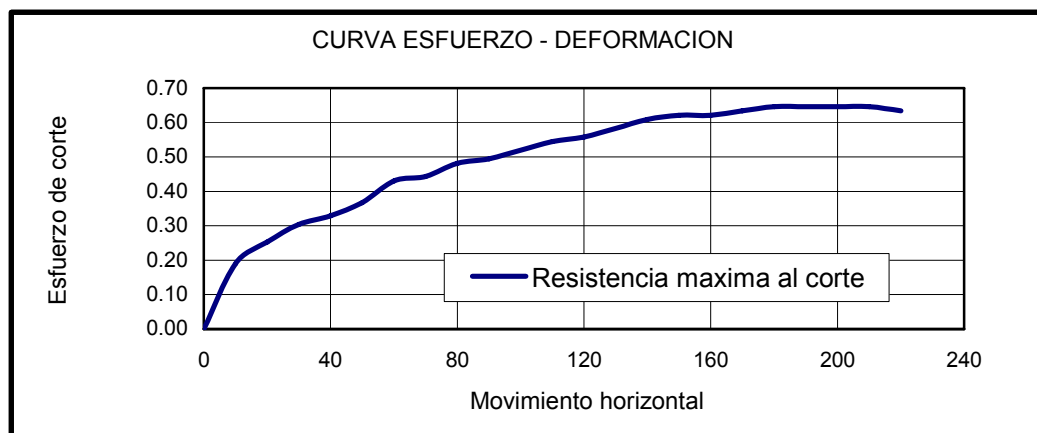
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	25.213	kg	Punto No :	5
Esfuerzo vertical :	0.796	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	17	16	0.1892
20	41	21	0.2528
30	58	25	0.3036
40	83	27	0.3290
50	108	30	0.3672
60	145	35	0.4307
70	169	36	0.4434
80	200	39	0.4815
90	222	40	0.4942
100	240	42	0.5196
110	256	44	0.5450
120	273	45	0.5577
130	284	47	0.5830
140	290	49	0.6084
150	291	50	0.6211
160	291	50	0.6211
170	291	51	0.6338
180	288	52	0.6465
190	283	52	0.6465
200	279	52	0.6465
210	277	52	0.6465
220	276	51	0.6338



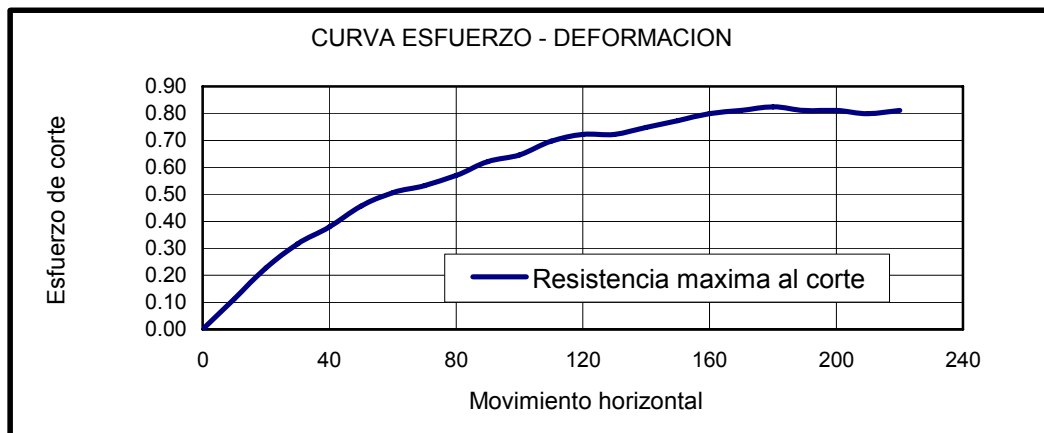
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	35.213	kg	Punto No :	6
Esfuerzo vertical :	1.112	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL DE CARGA	ESFUERZO DE CORTE kg/cm ²
HORIZONTAL 1E-3 pulg	VERTICAL 2E-3 mm		
0	0	0	0
10	5	10	0.1129
20	35	19	0.2274
30	57	26	0.3163
40	88	31	0.3799
50	118	37	0.4561
60	157	41	0.5069
70	191	43	0.5323
80	209	46	0.5704
90	233	50	0.6211
100	241	52	0.6465
110	251	56	0.6973
120	258	58	0.7226
130	265	58	0.7226
140	271	60	0.7480
150	278	62	0.7734
160	279	64	0.7987
170	281	65	0.8114
180	282	66	0.8241
190	282	65	0.8114
200	281	65	0.8114
210	279	64	0.7987
220	280	65	0.8114



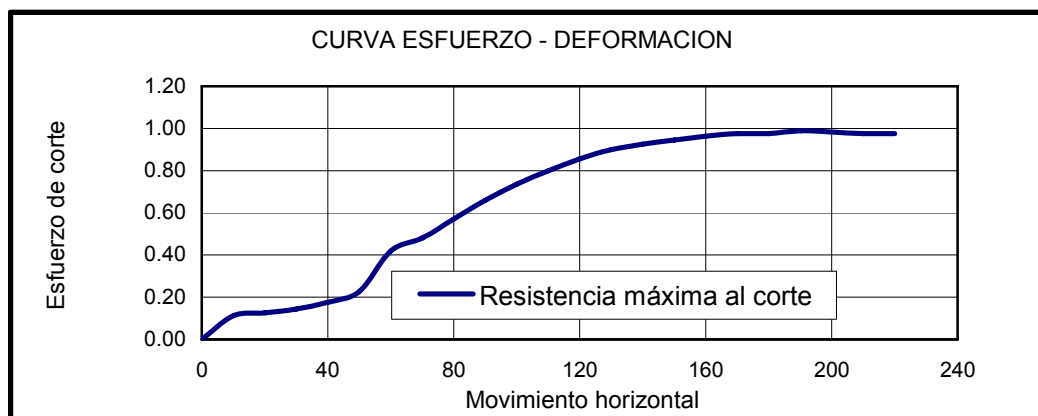
DEFORMACION HORIZONTAL ,VERTICAL Y ESFUERZO DE CORTE

Localizacion : PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

Carga :	45.213	kg	Punto No :	7
Esfuerzo vertical :	1.428	kg/cm ²	Velocidad Corte:	0.08

RESISTENCIA MAXIMA AL CORTANTE

DEFORMACION		LECTURA DIAL	ESFUERZO
HORIZONTAL	VERTICAL	DE	DE CORTE
1E-3 pulg	2E-3 mm	CARGA	kg/cm ²
0	0	0	0
10	16	10	0.1129
20	25	11	0.1256
30	32	12.5	0.1447
40	35	15	0.1765
50	39	19	0.2274
60	48	34	0.4180
70	61	39	0.4815
80	74	46	0.5704
90	81	53	0.6592
100	82	59	0.7353
110	85	64	0.7987
120	91	68.5	0.8558
130	92	72	0.9002
140	93	74	0.9255
150	90	75.5	0.9445
160	87	77	0.9635
170	83	78	0.9762
180	81	78	0.9762
190	76	79	0.9889
200	70	78.5	0.9826
210	69	78	0.9762
220	68	78	0.9762



PARAMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE
ENSAYO DE CORTE DIRECTO CONSOLIDADO DRENADO
Equipo WYKEHAM FARRANCE Modelo No. 25401 Serie No. 105705-0
Normas INV-E 154 - ASTM D3080 - AASHTO T236

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
LOCALIZACIÓN	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO (Resistencia saturada)

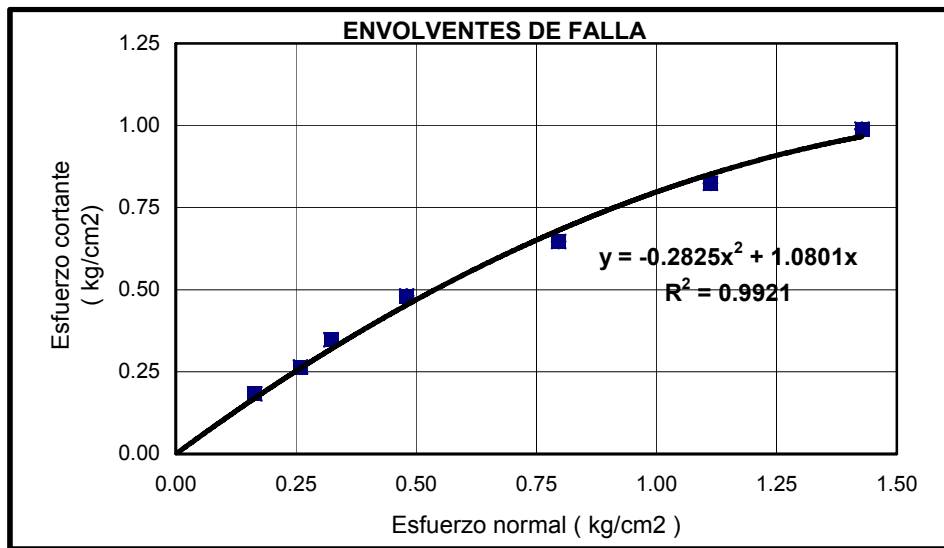
Sondeo		Muestra	CAPA 2A	Profundidad	superficial
---------------	--	----------------	---------	--------------------	-------------

Descripción del suelo : Arena Arcillosa Meteorizada
 Color blanco y rojizo

Estado de la muestra Alterada Humeda
 Inalterada Saturada

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Prueba Numero	Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo Cortante Máximo Kg/cm ²
1	0.164603726	0.182854052
2	0.259330597	0.265490902
3	0.322481844	0.348098102
4	0.480359962	0.481477947
5	0.796116198	0.646508014
6	1.111872434	0.824100727
7	1.427628671	0.988885967



Parámetros	Máximos
Esf. N. Analizado (Kg/cm²):	0.17
Angulo de fricción interna	44.539
Cohesion Saturada kg/cm2	0

ANEXO G
Ensayo de percolación

Se realizaron ensayos de percolación en 4 sitios de la cuenca. En dos de estos se tomaron lecturas de permeabilidad a nivel superficial y profundo (1m).

**ENSAYO DE PERCOLACION
TIPO U.S. BUREAU OF RECLAMATION E-18 CABEZA CONSTANTE**

Empresa: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 Proyecto: PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
 Perforación No: 1 Fecha: AGOSTO 27/2005
 Ubicación: Cuenca Quebrada Angulito H. Revestimiento: N/A cm
 D. Perforación: 6.10 cm H. Cabeza Agua: 110 cm
 D. Revestimiento: N/A cm H. Perforacion: N/A cm
 Profundidad: 65 cm

Volumen cm ³	Tiempo Hora:min:seg	Caudal cm ³ /seg	Perm. K=cm/seg	Perm. Cm / Hora	Percolacion Min / pulg
0.0	0:00:00	-----	-----	-----	-----
12,000.0	0:00:57	210.53	1.14E-01	410.73	<1.5
6,000.0	0:01:43	130.43	7.07E-02	254.47	<1.5
6,000.0	0:02:32	122.45	6.64E-02	238.89	<1.5
6,000.0	0:03:17	133.33	7.23E-02	260.13	<1.5
6,000.0	0:03:52	171.43	9.29E-02	334.45	<1.5
6,000.0	0:04:19	222.22	1.20E-01	433.55	<1.5
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

$$K = \frac{Q}{5.5 * R * H} \quad (\text{Cedergren})$$

ENSAYO DE PERCOLACION
TIPO U.S. BUREAU OF RECLAMATION E-18 CABEZA CONSTANTE

Empresa: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 Proyecto: PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
 Perforación No: 2 Fecha: GOSTO 27/2005
 Ubicación: Cuenca Quebrada Angulito H. Revestimiento: N/A cm
 D. Perforación: 6.10 cm H. Cabeza Agua: 110 cm
 D. Revestimiento: N/A cm H. Perforacion: N/A cm
 Profundidad: 62 cm

Volumen cm ³	Tiempo Hora:min:seg	Caudal cm ³ /seg	Perm. K=cm/seg	Perm. Cm / Hora	Percolacion Min / pulg
cm ³	Hora:min:seg	cm ³ / seg	K=cm/seg	Cm / Hora	Min / pulg
0.0	0:00:00	-----	-----	-----	-----
1,000.0	0:02:00	8.33	4.52E-03	16.26	3.77
1,000.0	0:04:17	7.30	3.96E-03	14.24	5.27
1,000.0	0:06:26	7.75	4.20E-03	15.12	4.59
1,000.0	0:08:47	7.09	3.84E-03	13.84	5.59
1,000.0	0:11:19	6.58	3.57E-03	12.84	6.44
1,000.0	0.0	7.0	0.0	13.7	5.7
1,000.0	0.0	6.5	0.0	12.7	6.6
1,000.0	0.0	5.5	0.0	10.8	8.4
1,000.0	0.0	6.2	0.0	12.1	7.1
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

$$K = \frac{Q}{5.5 * R * H} \quad (\text{Cedergren})$$

**ENSAYO DE PERCOLACION
TIPO U.S. BUREAU OF RECLAMATION E-18 CABEZA CONSTANTE**

Empresa: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 Proyecto: PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
 Perforación No: 3-Profundo Fecha: NOVIEMBRE 12/2005
 Ubicación: Cuenca Quebrada Angulito H. Revestimiento: N/A cm
 D. Perforación: 6.10 cm H. Cabeza Agua: 118 cm
 D. Revestimiento: N/A cm H. Perforacion: N/A cm
 Profundidad: 59 cm

Volumen cm ³	Tiempo Hora:min:seg	Caudal cm ³ /seg	Perm. K=cm/seg	Perm. Cm / Hora	Percolacion Min / pulg
0.0	0:00:00	-----	-----	-----	-----
200.0	0:00:49	4.08	2.06E-03	7.42	12.61
200.0	0:02:20	2.20	1.11E-03	4.00	19.59
200.0	0:03:40	2.50	1.26E-03	4.55	18.14
200.0	0:06:25	1.21	6.12E-04	2.20	26.30
200.0	0:08:55	1.33	6.74E-04	2.42	25.23
200.0	0:13:35	0.71	3.61E-04	1.30	32.26
200.0	0:17:25	0.87	4.39E-04	1.58	30.05
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

$$K = \frac{Q}{5.5 * R * H} \quad (\text{Cedergren})$$

ENSAYO DE PERCOLACION
TIPO U.S. BUREAU OF RECLAMATION E-18 CABEZA CONSTANTE

Empresa: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 Proyecto: PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
 Perforación No: 4-Profundo Fecha: NOVIEMBRE 12/2005
 Ubicación: Cuenca Quebrada Angulito H. Revestimiento: N/A cm
 D. Perforación: 6.10 cm H. Cabeza Agua: 118 cm
 D. Revestimiento: N/A cm H. Perforacion: N/A cm
 Profundidad: 86 cm

Volumen cm ³	Tiempo Hora:min:seg	Caudal cm ³ /seg	Perm. K=cm/seg	Perm. Cm / Hora	Percolacion Min / pulg
0.0	0:00:00	-----	-----	-----	-----
8,343.0	0:02:03	67.83	3.43E-02	123.36	<1.5
1,000.0	0:02:30	37.04	1.87E-02	67.36	<1.5
1,000.0	0:02:59	34.48	1.74E-02	62.71	<1.5
1,000.0	0:03:25	38.46	1.94E-02	69.95	<1.5
1,000.0	0:04:00	28.57	1.44E-02	51.96	<1.5
2,000.0	0:04:50	40.00	2.02E-02	72.75	<1.5
1,000.0	0:05:20	33.33	1.68E-02	60.62	<1.5
1,000.0	0:05:49	34.48	1.74E-02	62.71	<1.5
1,000.0	0:06:24	28.57	1.44E-02	51.96	<1.5
1,000.0	0:07:05	24.39	1.23E-02	44.36	<1.5
1,000.0	0:07:38	30.30	1.53E-02	55.11	<1.5
1,000.0	0:08:10	31.25	1.58E-02	56.83	<1.5
1,000.0	0:08:42	31.25	1.58E-02	56.83	<1.5
1,000.0	0:09:02	50.00	2.53E-02	90.93	<1.5
1,000.0	0:09:28	38.46	1.94E-02	69.95	<1.5
1,000.0	0:09:48	50.00	2.53E-02	90.93	<1.5
1,000.0	0:10:31	23.26	1.17E-02	42.30	<1.5
1,000.0	0:11:17	21.74	1.10E-02	39.54	<1.5
1,000.0	0:11:58	24.39	1.23E-02	44.36	<1.5
1,000.0	0:12:24	38.46	1.94E-02	69.95	<1.5
1,000.0	0:13:05	24.39	1.23E-02	44.36	<1.5
1,000.0	0:13:45	25.00	1.26E-02	45.47	<1.5
2,000.0	0:15:14	22.47	1.14E-02	40.87	<1.5

$$K = \frac{Q}{5.5 * R * H} \quad (\text{Cedergren})$$

ANEXO H

Coeficiente de permeabilidad mediante el método de la cabeza variable

Se realizaron dos ensayos de permeabilidad en laboratorio con muestra alterada extraída del terreno y perteneciente a la capa 2 (nivel superior del miembro Órganos).

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD METODO DE LA CABEZA VARIABLE Normas AASHTO T125 - ASTM D2434

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	JUAN PABLO ALVAREZ
FECHA DE ENSAYO	JULIO 19/2005

Dimensiones de la muestra		
Diámetro	6.27	cm
Altura	2.19	cm
Peso	121.50	gr
Area	30.88	cm ²
Volumen	67.62	cm ³
Peso unitario hum.	1.80	gr/cm ³

Area Transversal de la Bureta : 0.76 cm²

DATOS DEL ENSAYO	
ENSAYO	1
Altura del Agua inicial (cm)	47.0
Altura del Agua final (cm)	28.5
Tiempo del Ensayo (seg)	14400
Temperatura del Ensayo (°C)	20

RESULTADOS			
nT/n20	=	0.999759144	
kT	=	1.87E-06	cm/seg
K20	=	1.87E-06	cm/seg

**COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD
METODO DE LA CABEZA VARIABLE
Normas AASHTO T125 - ASTM D2434**

EMPRESA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO CUENCA ANGULITO
ENSAYADO POR	NESTOR SUAREZ- JAVIER SUAREZ
FECHA DE ENSAYO	AGOSTO 9/2005

Dimensiones de la muestra		
Diámetro	6.20	cm
Altura	2.23	cm
Peso	131.20	gr
Area	30.19	cm ²
Volumen	67.33	cm ³
Peso unitario hum.	1.95	gr/cm ³

Area Transversal de la Bureta : 0.76 cm²

DATOS DEL ENSAYO	
ENSAYO	1
Altura del Agua inicial (cm)	47.0
Altura del Agua final (cm)	28.5
Tiempo del Ensayo (seg)	14400
Temperatura del Ensayo (°C)	20

RESULTADOS			
nT/n20	=	0.999759144	
kT	=	1.95E-06	cm/seg
K20	=	1.95E-06	cm/seg


ANEXO I


Ensayos químicos del suelo

Dentro de esta clasificación se encuentran los ensayos de concentraciones de cationes intercambiables, pH del suelo, capacidad de intercambio catiónico, ESP, entre otros. Dichos ensayos fueron realizados gracias a la colaboración brindada por el Laboratorio Químico de Suelos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander.

Se realizaron ensayos químicos a 6 muestras de suelo de la cuenca de la quebrada Angulito pertenecientes a la capa 2 (nivel superior del miembro Órganos). Su nomenclatura incluye la combinación de dos números arábigos, el primero refleja el orden de la muestra (1-4), y el segundo el número de la extracción (1-2). Para un mayor detalle sobre la localización de la extracción de cada muestra es posible observar el plano de localización de muestreos ...véase numeral 4.4.13...

Los resultados obtenidos incluyen pH, CIC y contenidos de carbono, fósforo, calcio, magnesio, sodio, potasio, aluminio, azufre, boro, hierro, manganeso, cobre y zinc, a manera de iones intercambiables. Dentro de estos sobresalen por su importancia los contenidos de calcio y sodio, que muestran una relación marcada con la presencia de propiedades dispersivas en el suelo.

LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS PROGRAMA DE SUELOS DIRECCIÓN: Carrera 27 Calle 9 <small>Ciudad Universitaria Teléfono: 6344000 Ext. 2499</small> Bucaramanga - Santander del Sur					CONVENIO GOBERNACIÓN DE SANTANDER - UIS SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL <small>Teléfonos: 6301966 Fax: 6300480 - 6339018</small> ESCUELA DE QUÍMICA - UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER										ANÁLISIS DE SUELOS: UN BENEFICIO MAYOR Y PRIORITARIO PARA EL CAMPO							
										DÍA 30		MES SEP		AÑO 2005								
CLIENTE: NESTOR SUAREZ-JAVIER SUAREZ					MUNICIPIO: GIRÓN					VEREDA:					Finca:							
DIRECCIÓN:					TELÉFONOS:					DEPARTAMENTO:					Cultivo:							
TOPOGRAFÍA:					EXTENSIÓN:					ANÁLISIS SOLICITADOS X		CARACTERIZACIÓN X		ELEMENTOS MENORES X		AZUFRE		GIC		CE		
RESULTADO DEL ANÁLISIS DE SUELOS																						
No. Orden	No. Lab.	pH Unidad	% C	P (ppm) Bray II	Ca	Mg	Na	K	Al	% Arena	% Limo	% Arcilla	TEXTURA	CIC meq/100g	CE mmhos/cm	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn	
					meq/100g suelo											(ppm)						
	597	5,0	0,19	8	1,45	0,88	0,15	0,12	2,6	70	14	16	Franco-Arenoso	---	---	---	0,03	10,4	10,93	0,83	1,34	
PARAMETROS					MÉTODO ANALÍTICO								MUESTRA:									
pH: Potencial de Hidrógeno C: Carbono P: Fósforo disponible Ca, Mg, Na, K Al: Aluminio intercambiable % Textura B: Boro Fe, Mn, Cu, Zn S: Azufre CIC Capacidad Intercambio Catiónico CE: Conductividad Eléctrica					Electrométrica: Relación 1:1 Agua destilada Colorimétrica: Walkley Black K2Cr2O7-H2SO4 Colorimétrica: Bray II. HCl 0,1 N-NH4F 0,03 N Absorción Atómica: Extracción: Acetato de Amonio Valoración: Extracción KCl Bouyoucos: Agua destilada Colorimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico Absorción Atómica: Extracción con DTPA Turbidimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico Extracción Acetato de Amonio Electrométrica: Agua destilada								Cuenca de la Quebrada angulito Zona 1-1 Proyecto de grado Escuela de Ingeniería Civil				VoBo  JAIMÉ H. CAMARGO HERNÁNDEZ Químico Mat. Prof. 0047					

LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS					CONVENIO GOBERNACIÓN DE SANTANDER - UIS										ANÁLISIS DE SUELOS: UN BENEFICIO MAYOR Y PRIORITARIO PARA EL CAMPO							
PROGRAMA DE SUELOS DIRECCIÓN: Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Teléfono: 6344009 Ext. 2499 Bucaramanga - Santander del Sur					SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL Teléfonos: 6301966 Fax: 6300480 - 6339018 ESCUELA DE QUÍMICA - UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER										DÍA 23		MES AGOSTO		AÑO 2008			
CLIENTE: NÉSTOR SUÁREZ (UIS)					MUNICIPIO: GIRÓN			VEREDA:				Finca:										
ESCUELA INGENIERÍA CIVIL					TELÉFONOS: 6475135			DEPARTAMENTO: SANTANDER				Cultivo:										
(TESIS DE GRADO)					EXTENSIÓN:			ANÁLISIS SOLICITADOS		CARACTERIZACIÓN X		ELEMENTOS MENORES X		AZUFRE	CIC		CE					
RESULTADO DEL ANÁLISIS DE SUELOS																						
No. Orden	No. Lab.	pH Unidad	% C	P (ppm) Bray II	Ca	Mg	Na	K	Al	% Arena	% Limo	% Arcilla	TEXTURA	CIC meq/100g	CE mmhos/cm	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn	
					meq/100g suelo											(ppm)						
	488	7,2	0,08	78	4,77	1,40	1,11	0,02	---	84	10	6	Arenoso-Franco	---	---	---	0,08	12,0	3,21	0,50	0,70	
PARAMETROS					MÉTODO ANALÍTICO								NOTA:									
pH: Potencial de Hidrógeno					Electrométrico: Relación 1:1 Agua destilada								MUESTRA DE LODOS Y DETRITOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA ANGULITO Zona 4-1									
C: Carbono					Colorimétrico: Walkley Black K2Cr2O7-H2SO4																	
P: Fósforo disponible					Colorimétrico: Bray II. HCl 0,1 N-NH4F 0,03 N																	
Ca, Mg, Na, K					Absorción Atómica: Extracción: Acetato de Amonio																	
Al: Aluminio intercambiable					Valoración: Extracción KCl																	
% Textura					Bouyoucos: Agua desfilada																	
B: Boro					Colorimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico																	
Fe, Mn, Cu, Zn					Absorción Atómica: Extracción con DTPA																	
S: Azufre					Turbidimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico																	
CIC Capacidad Intercambio Catiónico					Extracción Acetato de Amonio																	
CE: Conductividad Eléctrica					Electrométrica: Agua desfilada																	
<p>VoBc</p>  JAIME H. CAMARGO HERNÁNDEZ Químico Mat. Prof. 0047																						

LABORATORIO QUÍMICO DE SUELOS					CONVENIO GOBERNACIÓN DE SANTANDER - UIS								ANÁLISIS DE SUELOS: UN BENEFICIO MAYOR Y PRIORITARIO PARA EL CAMPO								
PROGRAMA DE SUELOS DIRECCIÓN: Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Teléfono: 6344000 Ext. 2499 Bucaramanga - Santander del Sur					SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL Teléfonos: 6301966 Fax: 6300480 - 6339018 ESCUELA DE QUÍMICA - UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER								DÍA		MES		AÑO				
CLIENTE: ESCUELA ING. CIVIL					MUNICIPIO:				VEREDA:				Finca:								
PROYECTO GRADO					TELEFONOS:				DEPARTAMENTO:				Cultivo:								
TOPOGRAFÍA:					EXTENSIÓN:				ANÁLISIS SOLICITADOS		CARACTERIZACIÓN X		ELEMENTOS MENORES X		AZUFRE		CIC		CE		
RESULTADO DEL ANÁLISIS DE SUELOS																					
No. Orden	No. Lab.	pH Unidad	% C	P (ppm) Bray II	Ca	Mg	Na	K	Al	% Arena	% Limo	% Arcilla	TEXTURA	CIC meq/100g	CE mmhos/cm	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn
					meq/100g suelo				(ppm)												
	638	6,7	0,11	118	9,56	2,23	0,55	0,13	---	68	16	16	Fco-Arenosa	10	---	---	0,16	1,5	9,60	0,28	0,68
	639	6,1	0,01	40	3,29	2,16	0,60	0,07	---	80	10	10	Areno-Francoso	7	---	---	0,16	8,7	20,87	1,22	4,72
	640	6,2	0,03	60	6,73	1,58	0,56	0,03	---	80	14	6	Areno-Francoso	8	---	---	0,18	9,7	6,11	0,40	0,67
	641	5,6	0,30	6	3,95	1,84	0,17	0,08	---	68	16	14	Fco-Arenosa	7	---	---	0,02	19,9	11,96	2,51	5,48
PARAMETROS					MÉTODO ANALÍTICO								Caracterización, Análisis y Diagnóstico de los flujos de Lodos y Detritos en la Cuenca de la quebrada Anguito en el municipio de Girón.								
pH: Potencial de Hidrógeno					Electrométrico: Relación 1:1 Agua destilada								MUESTRA: No. 1 : 2-1 No. 2 : 3-1 No. 3 : 3-2 No. 4 : 4-2								
C: Carbono					Colorimétrico: Walkley Black K2Cr2O7-H2SO4																
P: Fósforo disponible					Colorimétrico: Bray II, HCl 0.1 N-NH4F 0.03 N								Néstor Ricardo Suárez Javier Alfonso Suárez								
Ca, Mg, Na, K					Absorción Atómica: Extracción Acetato de Amonio																
Al: Aluminio intercambiable					Valoración: Extracción KCl								VoBo JAIME H. CAMARCO HERNÁNDEZ Químico Mat. Prof. 0047								
% Textura					Bouyouccous: Agua destilada																
B: Boro					Colorimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico																
Fe, Mn, Cu, Zn					Absorción Atómica: Extracción con DTPA																
S: Azufre					Turbidimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico																
CIC Capacidad Intercambio Catiónica					Extracción Acetato de Amonio																
CE: Conductividad Eléctrica					Electrométrica: Agua destilada																