



ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ

CONTRATO 200-12-3-391 DE 2013

GE-333



**Consorcio
J & G**

TOMO V AMENAZA REGIONAL (AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA - AMENAZA POR INUNDACION - AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES)

Bogotá D.C., Marzo de 2015



**ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE
LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE
RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS
ESPECIFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS
MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA,
JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ**



Bogotá D.C., Marzo de 2015

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CONTROL DE CAMBIOS

ENTREGA DE INFORMES	ENTIDAD	Unidades
Original	Interventoría	1

CAMBIOS REALIZADOS

Versión	Cambios realizados respecto a la versión anterior	Fecha
4	Ajustado de acuerdo a observaciones de informe de interventoría final	21/04/2015

APROBACIÓN CAMBIOS

Versión	Realizó	Revisó	Aprobó	Observaciones	Fecha
1	LAG	MHB	FFS		12/15/2014
2	LAG	MHB	FFS	AMENAZA REGIONAL	16/02/2015
3	LAG	MHB	FFS	AJUSTE OBSERVACIONES INTERVENTORIA	01/04/2015

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	3

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	16
2.	SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	18
2.1	MARCO DE REFERENCIA SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL.....	18
2.1.1	Análisis de procesos Jerárquicos AHP	18
2.1.2	Lógica Difusa	22
2.1.3	Método Estadístico	28
2.1.4	Método De Validación Del Mapa De Susceptibilidad.....	33
2.2	MAPA SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL.....	36
2.1.5	MODELO DE DATOS	36
2.1.6	CALIFICACIÓN DE LAS VARIABLES	37
2.1.7	CATEGORIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	40
2.1.8	GEOMORFOLOGÍA	42
2.1.9	GEOLOGÍA.....	69
2.1.10	COBERTURA DEL SUELO.....	74
2.1.11	GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	82
2.1.12	BONDAD DE AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	85
2.1.13	SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO RESPECTO AL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	92
3.	AMENAZA REGIONAL POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	94
3.1	MARCO DE REFERENCIA AMENAZA REGIONAL	94
2.1.14	Los Fenómenos de Remoción en Masa.....	94
2.1.15	Análisis de Estabilidad de Taludes.....	98
2.1.16	Método Probabilístico de Análisis de Estabilidad de Taludes.....	104

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	4

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.1.17	Cálculo de la Amenaza.....	112
2.1.18	Categorización de la Amenaza.....	114
3.2	GENERACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA REGIONAL	116
3.3	VALIDACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA REGIONAL.....	117
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA AMENAZA REGIONAL.....	124
3.5	CONCLUSIONES.....	127
4.	AMENAZA REGIONAL POR INUNDACIÓN.....	131
4.1	MARCO TEORICO.....	131
4.1.1	Definiciones	131
4.1.2	Metodologías utilizadas para la determinación de los niveles de Amenaza por inundaciones	133
4.2	MODELACIÓN MATEMATICA.....	137
4.2.1	Descripción del modelo matemático FLO-2D	137
4.2.2	Ecuaciones hidrodinámicas utilizadas en el modelo FLO-2D	138
4.2.3	Algoritmo de solución del modelo FLO-2D para la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo	140
4.2.4	Criterios de estabilidad numérica.....	142
4.2.5	Tamaños de celda recomendados.....	143
4.2.6	Limitaciones del modelo FLO-2D.....	144
4.2.7	Fases del modelo FLO-2D.....	144
4.3	METODOLOGÍA	145
4.3.1	Descripción general de la zona de estudio	145
4.3.2	Caracterización Hidrológica.....	146
4.3.3	Metodología propuesta para el presente estudio	148
4.3.4	IMPLEMENTACIÓN MODELO FLO-2D.	149
4.3.5	Resultados.....	155
4.3.6	Análisis de resultados.....	159
4.4	DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA.....	162

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	5

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

4.5	CONCLUSIONES.....	165
5.	AMENAZA REGIONAL POR AVENIDAS TORRENCIALES	168
5.1	DEFINICIONES.....	168
5.2	METODOLOGÍA	182
5.2.1	Procesos Erosivos	182
5.2.2	Procesos de Remoción en Masa	193
5.2.3	Implementacion del modelo mediante software FLO-2D	194
5.3	SIMULACIÓN Y MODELACIÓN	195
5.3.1	Aporte de Sedimentos por Inestabilidad de Laderas	195
5.3.2	Análisis Hidrológico	197
5.3.3	Análisis de flujo mediante software FLO-2D- Resultados.....	198
5.3.4	Análisis de los resultados	200
5.4	DETERMINACION DE LA AMENAZA.....	203
5.5	CONCLUSIONES.....	204
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	207

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	6
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala numérica para comparación entre pares	20
Tabla 2. Índices de aleatoriedad (IA) de las matrices de comparaciones por pares, según su orden (Ormazábal, 2002).....	22
Tabla 3. Valores del número difuso triangular para las diferentes categorías borrosas	23
Tabla 4. Formato tabla de concordancia para eventos de movimientos en masa existentes y pronosticados	34
Tabla 5. Valoración del Coeficiente Kappa (tomado de Cerda y Villarroel (2008)).	35
Tabla 6. Grados de Susceptibilidad.....	38
Tabla 7. Categorización adoptada para la Susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa.....	41
Tabla 8. Rangos de pendientes.....	47
Tabla 9. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de pendientes	47
Tabla 10. Rangos de Curvatura longitudinal propuestos inicialmente.....	50
Tabla 11. Agrupación de Rangos de Curvatura longitudinal y área de movimientos en masa	51
Tabla 12. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de curvatura	51
Tabla 13. Rangos de Longitud de flujos (LF) propuestos inicialmente.....	53
Tabla 14. Reagrupación de Rangos de longitud de flujos (LF) y área de movimientos en masa	54
Tabla 15. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de Longitud de flujo	55
Tabla 16. Rangos de IRR propuestos inicialmente	57
Tabla 17. Reagrupación de Rangos de IRR y área de movimientos en masa	57
Tabla 18. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de IRR para la Zona 1	58
Tabla 19. Rangos de Kc propuestos inicialmente	60
Tabla 20. Reagrupación de Rangos de Kc y área de movimientos en masa	61
Tabla 21. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de Kc.....	61
Tabla 22. Rangos de DD propuestos inicialmente	64
Tabla 23. Reagrupación de Rangos de DD y área de movimientos en masa para la zona de estudio.....	64
Tabla 24. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de DD.....	65

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	7

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 25 Unidades y Ambientes Geomorfológicos.....	67
Tabla 26 Calificación de Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas de la zona de Estudio.....	68
Tabla 27 Unidades geológicas superficiales.	71
Tabla 28. Calificación de las unidades geológicas superficiales	72
Tabla 29. Características de Susceptibilidad a movimientos en masa de los depósitos.....	73
Tabla 30. Coberturas zona de estudio	76
Tabla 31. Calificación de Susceptibilidad de las coberturas del suelo de la zona de estudio.....	80
Tabla 32. Test de Anova Modelo Forward generado por <i>R</i>	83
Tabla 33. Test de Anova Modelo Backward generado por <i>R</i>	83
Tabla 34. Modelo Ajustado con la regresión logística de Firth	84
Tabla 35. Comparación entre las áreas (m ²) clasificadas como estables o inestables por el modelo estadístico y el inventario de procesos producto del mapa de procesos morfodinámicos (Inventario 1).....	87
Tabla 36. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de Susceptibilidad y el inventario de procesos producto del mapa de procesos morfodinámicos (Inventario 1)	87
Tabla 37. Comparación entre los eventos clasificados como estables o inestables por el modelo estadístico y el Inventario 2.	90
Tabla 38. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de Susceptibilidad y los eventos del Inventario 2.	90
Tabla 39. Distribución del área de cada municipio en las categorías de susceptibilidad según la clasificación del mapa de susceptibilidad.	92
Tabla 40. Distribución del área de cada cabecera municipal en las categorías de susceptibilidad según la clasificación del mapa de susceptibilidad.	93
Tabla 41. Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y las laderas (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).	95
Tabla 42. Distribuciones de Probabilidad y parámetros de las variables aleatorias (pendiente, cohesión de las raíces y coeficiente de aceleración horizontal) de la ecuación de talud infinito modificada.....	108
Tabla 43. Valores de los parámetros de las variables aleatorias de las unidades geológicas	109

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	8

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 44. Valores de los parámetros de la distribución uniforme de las variables aleatorias de las coberturas del suelo (tomado de Hang Chok (2008), Schmidt y otros (2001), Jimeno y otros (1999)).	111
Tabla 45. Categorización adoptada para la amenaza por fenómenos de remoción en masa	114
Tabla 46. Probabilidades de ocurrencia de los escenarios planteados para el factor detonante de agua.	117
Tabla 47. Comparación entre las áreas (m ²) clasificadas como estables o inestables por el mapa de amenaza y el inventario de procesos históricos de la consultoría.	118
Tabla 48. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el mapa de amenaza y el inventario de procesos históricos de la consultoría.	119
Tabla 49. Comparación entre el área de las categorías del mapa de amenaza por movimientos en masa y el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa	121
Tabla 50. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de susceptibilidad y el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa.	122
Tabla 51. Descripción de los escenarios analizados para la amenaza regional.	124
Tabla 52. Distribución del área de cada municipio en las categorías de amenaza según la clasificación del mapa de amenaza regional.	125
Tabla 53. Distribución del área de cada centro urbano en las categorías de amenaza según la clasificación del mapa de amenaza regional.	126
Tabla 54 Características de Localización de las Estaciones Hidrometereológicas Cercanas a la Zona de Proyecto	147
Tabla 55 Nivel de amenaza por inundaciones.	164
Tabla 56 Categorización de Amenaza por Fenómeno de Inundación.	164
Tabla 57 Intensidad de la inundación según la Agencia Catalana del Aguas	164
Tabla 58 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por inundación.	167
Tabla 59 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por inundación área de estudio.	167
Tabla 60 Áreas de cada nivel de amenaza por fenómeno de inundación por municipio.	167
Tabla 61 Clase de estructura.	189
Tabla 62 Código de Permeabilidad.	189
Tabla 63 Factor C para zonas de bosque	191

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	9

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 64 Factor C para zonas de pasto, tierras agrícolas o inactivas (Gray & Leiser, 1982)	192
Tabla 65 Porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes corrientes.....	196
Tabla 66 Caudales acumulados en las diferentes corrientes para periodos de retorno determinados	197
Tabla 67. Nivel de amenaza por Avenida Torrencial.....	203
Tabla 68. Categorización de Amenaza por Fenómeno de Avenida Torrencial ...	203
Tabla 69 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por avenidas torrenciales.	206
Tabla 70. Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por avenidas torrenciales área de estudio.....	206
Tabla 71 Áreas de cada nivel de amenaza por fenómeno de avenidas torrenciales por municipio.....	206

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	10

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso propuesto para la evaluación de los pesos ponderados normalizados utilizando metodología AHP-difusa	19
Figura 2. Calificación difusa de los criterios de calificación AHP (relación directa)	23
Figura 3. Calificación difusa de los criterios de calificación AHP (relación inversa)	23
Figura 4. Diagrama de flujo para la calificación de la susceptibilidad utilizado los métodos WLC y OWA (adaptado de Malczewski, 2006)	26
Figura 5 (a) Gráfica que muestra la perfecta separación de los datos siendo ajustados a una función logística (b) Gráfica de las iteraciones del estimador de máxima verosimilitud para unos datos que presentan una separación completa donde el estimador no converge al no presentar un pico es su curva.....	31
Figura 6. Estimador de Máxima verosimilitud calculado con la regresión logística de Firth	31
Figura 7. Temas para generación del mapa de Susceptibilidad a movimientos en masa	36
Figura 8. Modelo de datos del proyecto	37
Figura 9. Capas y variables del Tema Geomorfología	42
Figura 10. Variables del subtema morfometría.....	43
Figura 11. Celdas para cálculo de pendiente	45
Figura 12 Esquema y expresiones para el cálculo de la curvatura	48
Figura 13. Capa del Tema Geología	69
Figura 14. Capa del Tema Cobertura del Suelo	74
Figura 15. Análisis de la bondad de ajuste del mapa de susceptibilidad. En el eje x se presenta el porcentaje acumulado del área de estudio clasificado en las categoría de ocurrencia de los procesos de remoción en masa, la susceptibilidad disminuye de izquierda (susceptibilidad casi segura-rojo oscuro) a derecha (improbable – verde). En el eje y se encuentra el porcentaje acumulado del área de los procesos clasificados en las categorías de ocurrencia de los procesos de remoción en masa.....	89
Figura 16. Análisis de la capacidad de predicción del mapa de susceptibilidad. En el eje x se presenta el porcentaje acumulado del área de estudio clasificado las categoría de ocurrencia de los deslizamientos, la susceptibilidad disminuye de izquierda (susceptibilidad casi seguro-rojo oscuro) a derecha (improbable – verde). En el eje y se encuentra el porcentaje acumulado del área de los procesos	

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISÓ HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 11
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

clasificados en las categorías de ocurrencia de los procesos de remoción en masa. La línea punteada indica los procesos del Inventario 2. La línea continua muestra la bondad de ajuste del modelo (Figura 15). 92

Figura 17. Diagrama de flujo para la evaluación de riesgos por deslizamientos... 97

Figura 18. Talud Infinito, donde z = altura de la masa deslizante (m) , h = altura del agua subterránea durante el movimiento (m), β = ángulo de inclinación con la horizontal (grados) , γ = peso suelo específico del suelo (KN/m³), Φ = ángulo de fricción (grados), C = cohesión (KN/m²), Q = sobrecarga (KN/m²). N.R= Nivel de Referencia. Tomado de (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b)..... 99

Figura 19. Histograma del Factor de Seguridad. La zona en rojo indica los análisis que obtuvieron un factor de seguridad igual o menor que 1. 113

Figura 20. Distribución del factor de seguridad, probabilidad de falla, definición del factor seguridad e índice de confiabilidad. 114

Figura 21. A. Proceso identificado en la vereda Argentina municipio de Medina. B. Ubicación del proceso A en el mapa de amenaza regional C. Proceso identificado cerca de la cabecera de Palomas en el municipio de Gachalá B. Ubicación del proceso C en el mapa de amenaza regional 120

Figura 22 Curvas de flujo para un líquido idealizado y cuerpos reológicos plásticos, con los nombres de los modelos de flujo indicados. Los líquidos no exhiben resistencia al corte. Los cuerpos plásticos comienzan a deformarse solo después de que un esfuerzo de cedencia, s , es alcanzado (Pierson & Costa, 1987). 175

Figura 23 Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua. Las fronteras verticales A, B, y C son umbrales reológicos y son función de la distribución granulométrica y de la concentración de sedimentos (Pierson & Costa, 1987). . 178

Figura 24 Resistencia a la cedencia de varias mezclas de sedimentos – agua (tamaño promedio de granos indicado) graficado contra concentración de sedimentos (Pierson & Scott, 1985), la intersección de cada curva con las abscisas marca la transición de flujo normal a flujo hiperconcentrado (frontera A de la Figura 23). El incremento abrupto de la pendiente en cada curva, marca aproximadamente la transición de flujo hiperconcentrado a flujo barroso (frontera B de la Figura 23) 178

Figura 25 Nomenclatura apropiada para la clasificación reológica propuesta en la Figura 24 (Pierson & Costa, 1987) 179

Figura 26 Clasificación de movimientos en masa sobre taludes como una función de la fracción sólida y el tipo de material (Coussot & Meunier, 1996) 180

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	12

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Figura 27. Nomograma de Weschmeier	188
Figura 28 Variación del Coeficiente de Producción de Sedimentos en función del área. Fuente: (Díaz-Granados, Ordoñez, & Deeb, 1986)	194
Figura 29 Proceso para cargar el módulo Mapper++	198
Figura 30 Proceso de carga modelo generado en FLO-2D.....	199
Figura 31 Velocidad generada en FLO-2D (de referencia)	199
Figura 32 Solicitación (Profundidad de flujo) Simulada en FLO-2D (de referencia)	200

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	13

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de Susceptibilidad Regional de Corpoguavio.....	85
Ilustración 2. Mapas de diferentes escenarios de amenaza regional de Corpoguavio. A. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Seco. B. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Bajo. C. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Medio. D. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Alto. E. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Saturado.	123
Ilustración 3. Mapa de Amenaza Regional por fenómenos de remoción en masa de Corpoguavio.....	125
Ilustración 4. Mapa General Área de estudio	146
Ilustración 5 Archivo tipo shapefile cargado en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	150
Ilustración 6 Malla generada para un valor de 10m (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	151
Ilustración 7 Definición Área de Trabajo Cuenca Río Miraflores (se resaltan sólo límites) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014.....	152
Ilustración 8 Acercamiento valores de Elevación interpolados en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores).....	152
Ilustración 9 Hidrograma Ingresado para el Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	153
Ilustración 10 Acercamiento celda que contiene el hidrograma del Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	154
Ilustración 11 Ventana de Simulación Modelo FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	155
Ilustración 12 Tabla de Simulación FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014..	155
Ilustración 13 Proceso para cargar el módulo Mapper++ Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	156
Ilustración 14 Proceso de carga modelo generado en FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	156
Ilustración 15 Velocidad generada en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	157
Ilustración 16 Solicitación (Profundidad de flujo) simulada en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	157
Ilustración 17 Acercamiento indicando proceso para convertir a shapefile. Fuente: CONSORCIO J&G, 2014	158

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	14

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Ilustración 18 Mancha de Inundación obtenida en FLO-2D y presentada en ArcGIS (de fondo el Modelo de Elevación Digital) – Cuenca Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014 158

Ilustración 19. Mapa general de solicitación por inundación – PR_2 años..... 159

Ilustración 20. Mapa general de solicitación por inundación – PR_20 años..... 161

Ilustración 21. Mapa general de solicitación por inundación – PR_100 años..... 162

Ilustración 22 Evaluación de Amenaza (Extraída de la Agencia Catalana del Agua) 163

Ilustración 23. Mapa general de Amenaza por Inundación total..... 165

Ilustración 24. Mapa general de solicitación por avenidas torrenciales – PR_2 años. 201

Ilustración 25 Mapa general de solicitación por avenidas torrenciales – PR_5 años. 202

Ilustración 26. Mapa general de solicitación por avenidas torrenciales – PR_20 años. 202

Ilustración 27 Mapa general de Amenaza por Avenidas Torrenciales Total..... 204

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 PLANOS

ANEXO 2 SIMULACION FLO-2D

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	15

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe presenta la definición de la Amenaza Regional para los municipios de Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachalá, los cuales corresponden a los municipios zona de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Guavio - CORPOGUAVIO.

La evaluación de amenaza se desarrolló dentro del marco del contrato No 200-12-3-391, cuyo objetivo es le realizar los estudios de delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y con condiciones de riesgo, determinando las medidas específicas para su mitigación en los municipios de Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachalá.

El informe de la evaluación correspondiente a la Amenaza Regional, presenta la siguiente división por capítulos:

1. INTRODUCCIÓN
2. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD
3. MAPA DE AMENAZA REGIONAL POR FÉNOMENOS DE REMOCIÓN EN MASA
4. AMENAZA REGIONAL POR INUNDACION
5. AMENAZA REGIONAL POR AVENIDAS TORRENCIALES

En el capítulo 2, se muestra la metodología y desarrollo para la generación del mapa de Susceptibilidad ante eventos de remoción en masa, el cual se presenta en el Anexo 1 Mapa de Susceptibilidad y el cual está en una escala de trabajo de 1:150.000. Este mapa es de vital importancia para la identificación de las zonas geotécnicas inestables actuales, las cuales permitieron reconocer las áreas con mayor probabilidad para la ocurrencia de futuros movimientos en masa.

En el capítulo 3, se presenta el desarrollo metodológico realizado para la obtención del mapa final de amenaza por fenómenos de remoción en masa, el cual involucró el análisis por talud infinito y las simulaciones de Montecarlo. Así mismo, se presentan los análisis y resultados realizados para la obtención de la amenaza regional por fenómenos en remoción masa para los municipios de Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachalá.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	16

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Como resultado de los análisis de estabilidad mediante el método de talud infinito, se generó un plano de Amenaza por fenómenos de Remoción en masa, además de la generación de los mapas correspondientes a la evaluación de la susceptibilidad, el cual permitió la verificación y congruencia de la información obtenida del plano final de Amenaza por fenómenos de remoción en masa; los mapas finales correspondientes a los ítems antes descritos se presentan en: Anexo 1 Mapa Pendiente, Mapa de Concavidad, Mapa de Longitud de Flujo, Mapa de Forma del área de captación, Mapa de índice de relieve relativo, Mapa de Densidad de Drenaje y Mapa de Susceptibilidad.

El capítulo 4 corresponde específicamente al desarrollo del estudio de la amenaza por inundaciones en la región del Guavio, en este se generó un modelo hidráulico mediante el uso del software FLO-2D, cuyos resultados muestran los niveles de agua, solicitaciones, velocidades y zonas de influencia correspondientes a las cuencas analizadas para los periodos de retorno de 2, 20 y 100 años. Se obtuvo así un mapeo de zonas de posible inundación analizando la amenaza latente, aplicando los procedimientos indicados en la metodología establecida, y que puede observarse en el Anexo 1 Mapa general de amenaza por inundación.

En el capítulo 5 se muestra la metodología y los resultados obtenidos de la simulación del modelo de avenidas torrenciales en FLO-2D, permitió la generación de los mapas de solicitación por avenidas torrenciales para los periodos de retorno de 20, 5 y 2 años, en los cuales la topografía, el volumen de flujo y los porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes corrientes influyen en los resultados obtenidos, debido a que si se combinan estos parámetros se puede intuir comportamientos diferentes en las corrientes y determinando los niveles de amenaza y zonas de posible afectación por eventos de avenidas torrenciales como se evidencia en el anexo 1 Mapa general de amenaza por avenidas torrenciales.

En términos generales el presente documento busca explicar las metodologías, procedimientos y resultados de estos, que permitió determinar la amenaza regional a la que está expuesta la zona de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Guavio – CORPOGUAVIO.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	17

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2. SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

La susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa es la probabilidad de que un evento ocurra en cierta área dependiendo de las condiciones del terreno. La susceptibilidad es de gran importancia ya que indica la medida en que un terreno puede verse afectado por los movimientos en masa (Guzzetti, 2005). En este orden de ideas, la susceptibilidad actúa como el componente espacial de la amenaza, ya que la evaluación de la amenaza consiste en la predicción de lo que podrá ocurrir en el futuro.

2.1 MARCO DE REFERENCIA SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL

2.1.1 Análisis de procesos Jerárquicos AHP

Se propone calificar las variables empleando el método de estimación por el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés), que consiste en utilizar el juicio de expertos, para ayuda en la toma de decisiones debido a que se basa en múltiples criterios de decisión; este método fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un Modelo Jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones por pares entredichos elementos (criterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. A continuación se presenta la descripción de los procesos AHP.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	18

2.1.1.1 Objetivo de AHP

Determinar los pesos ponderados entre “ n ” variables ($n \geq 2$), que influyen relativamente en la obtención o calificación de un objetivo o meta, para lo cual se debe llevar a cabo el proceso presentado en la Figura 1.

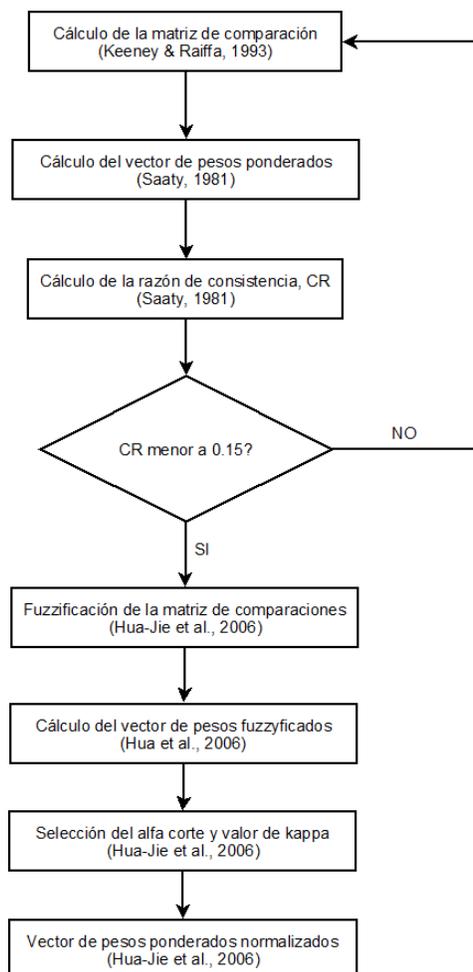


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso propuesto para la evaluación de los pesos ponderados normalizados utilizando metodología AHP-difusa

2.1.1.2 Obtención de los pesos ponderados

Matriz de comparación

El primer paso para obtener los pesos ponderados es determinar la matriz de comparación, de orden $n \times n$:

$$\{A\} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Dónde:

$$a_{ii} = 1, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

La comparación se hace por pares, obteniendo $\frac{n(n-1)}{2}$ comparaciones, siguiendo los siguientes criterios de calificación:

Tabla 1. Escala numérica para comparación entre pares

1	3	5	7	9
Los elementos C y R tienen la misma importancia	El elemento C es ligeramente más importante que el elemento R.	El elemento C es más importante que el elemento R.	El elemento C es fuertemente más importante que el elemento R.	El elemento C es muy fuertemente más importante que el elemento R.

El valor es el inverso en el caso que la relación sea inversa.

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.1.1.3 Cálculo del vector de pesos

Se calcula el vector de pesos, el cual puede ser obtenido como promedio aritmético o geométrico, según las siguientes ecuaciones (Saaty, 1981), respectivamente:

$$\{w_i\} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \right] \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(a) Promedio aritmético

$$\{w_i\} = \left\{ \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{kj}}} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(b) Promedio geométrico

2.1.1.4 Cálculo de la razón de consistencia

Se estima la consistencia o coherencia de la evaluación llevada a cabo en la estimación de los coeficientes de la matriz de comparaciones, mediante la adaptación de la razón de consistencia (RC) propuesta por Saaty (1981), según la siguiente expresión:

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde, **IC** es el “Índice de Consistencia” de la evaluación, definido como (Ormazábal, 2002):

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \cdot w_i$$

O, alternativamente como (López & Donado, 2007):

$$IC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \left(\ln a_{ij} - \ln \frac{v_i}{v_j} \right)^2}{2(n-2)(n-2)}, \quad v_{r=i \text{ ó } j} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{rk}}$$

De otra parte, el término **IA** es el “Índice de Aleatoriedad”, cuyos valores son los presentados en la Tabla 2.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	21
Fecha: 01/04/2015					

Tabla 2. Índices de aleatoriedad (IA) de las matrices de comparaciones por pares, según su orden (Ormazábal, 2002)

Tamaño de la matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Aleatoriedad, IA	0.01	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

El coeficiente RC expresa un valor relativo de la inconsistencia, de manera que si su valor es 1 indica que su inconsistencia es del 100%, y si es 0, el juicio emitido es totalmente coherente. Teniendo en cuenta lo recomendado por Saaty (1981), se acepta una tolerancia del RC del 10% (o un valor de RC de 0.1) para calificar de buena una ponderación, siendo aceptables resultados hasta del 15%. Si el resultado no es suficientemente coherente (RC>15%) deberá volverse a realizar la valoración por pares, repitiéndose de forma iterativa hasta que el RC sea menor a 0.15.

2.1.2 Lógica Difusa

2.1.2.1 Fuzzificación de la matriz de comparaciones

Para tener en cuenta la variabilidad en la de la valoración de la matriz de comparaciones, se utilizará un número borroso de tipo triangular (Morillas, 2002; Tae-Heon & Woo-Bae, 1999; Zadeh, 1978), que se puede describir con la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \leq x \leq m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x < l, x > u \end{cases}$$

Para los valores AHP, se seleccionaron los siguientes números difusos triangulares (adaptados de Morilla, 2002), según la relación sea directa (Figura 2) o inversa (Figura 3), y cuyos valores se presentan en la Tabla 3.

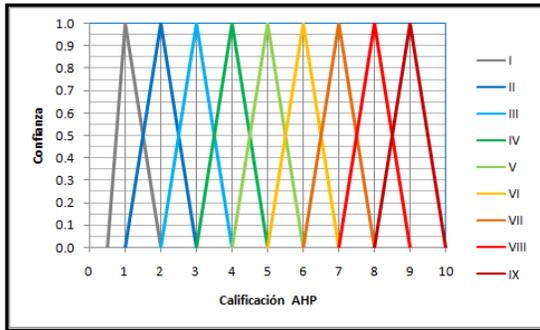


Figura 2. Calificación difusa de los criterios de calificación AHP (relación directa)

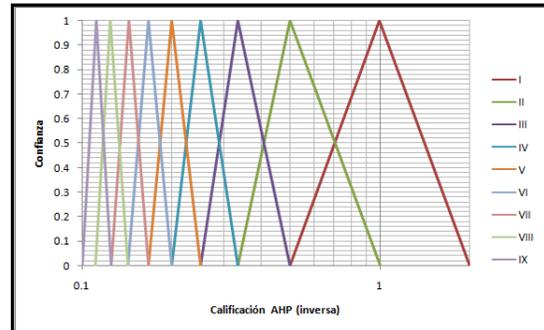


Figura 3. Calificación difusa de los criterios de calificación AHP (relación inversa)

Tabla 3. Valores del número difuso triangular para las diferentes categorías borrosas

CATEGORIA BORROSA	RELACIÓN DIRECTA			RELACIÓN INVERSA		
	V. mínimo	V. Medio	V. máximo	V. mínimo	V. Medio	V. máximo
I	1/2	1	2	1/2	1	2
II	1	2	3	1/3	1/2	1
III	2	3	4	1/4	1/3	1/2
IV	3	4	5	1/5	1/4	1/3
V	4	5	6	1/6	1/3	1/4
VI	5	6	7	1/7	1/4	1/5
VII	6	7	8	1/8	1/7	1/6
VIII	7	8	9	1/9	1/8	1/7
IX	8	9	10	1/10	1/9	1/8

De esta forma, y con base en la matriz de comparaciones obtenida anteriormente, se puede obtener la matriz de comparaciones borrosa, teniendo en cuenta los números difusos o borrosos triangulares definidos anteriormente, según la categoría difusa, obteniendo la matriz difuzza o borrosa de comparaciones (Hua-Jie et al., 2006):

$$[A] = \begin{pmatrix} (1,1,1) & \dots & (a_{1n_l}, a_{1n_m}, a_{1n_u}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n_l}, a_{n_l_m}, a_{n_l_u}) & \dots & (1,1,1) \end{pmatrix}$$

2.1.2.2 Cálculo del vector de pesos fuzzyficados

Con base en la matriz de comparaciones borrosa, se obtiene el vector de pesos borrosos o fuzzyficados (Huan-Jie et al., 2006), bien sea por el promedio aritmético o geométrico (ver numeral 2.1.1.3) para cada uno de los valores de la

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

terna de cada calificación (l, m y u), ordenando la terna obtenida de menor a mayor, definiendo el vector de pesos borroso o fuzzificado como:

$$\{w_{i_l}, w_{i_m}, w_{i_u}\} = \left\{ \begin{array}{c} w_{1_l}, w_{1_m}, w_{1_u} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ w_{n_l}, w_{n_m}, w_{n_u} \end{array} \right\}$$

2.1.2.3 Selección del alfa-corte y el valor de kappa para determinar el valor de pesos normalizados

Con el fin de realizar la desfuzzificación o desborrificación del vector de pesos borroso, se utilizará el proceso sugerido por Hua-Jie et al. (2006), en el cual se selecciona el alfa corte (valor de α entre 0 y 1) según la certeza en el rango borroso seleccionado, encontrándose un rango para cada uno de los pesos determinados (para una confianza del 100%, el rango se reduce a un solo número, correspondiente al valor de la calificación AHP normal), según las siguientes ecuaciones:

$$P_{i\alpha_l} = [\alpha \cdot (w_{i_m} - w_{i_l})] + w_{i_l}$$

$$P_{i\alpha_r} = w_{i_u} - [\alpha \cdot (w_{i_u} - w_{i_m})]$$

$$P_{i\alpha} = \begin{pmatrix} [P_{1\alpha_l}, P_{1\alpha_r}] \\ \vdots \\ [P_{n\alpha_l}, P_{n\alpha_r}] \end{pmatrix}$$

Donde los valores l y r representan el valor izquierdo y derecho del conjunto de intervalos.

Posteriormente se selecciona el valor kappa (valor de κ entre 0 y 1), según el optimismo de la calificación (uno para valoración optimista, tomando el mayor valor del rango, y de 0 para valoración pesimista, tomando el valor menor del rango), normalizando la calificación, obteniendo de esta forma el vector de pesos normalizados, según la siguiente ecuación (Hua-Jie et al, 2006):

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	24

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$$\{C_{i\alpha}\} = \left\{ \frac{\kappa \cdot P_{i\alpha_r} + (1 - \kappa) \cdot P_{i\alpha_l}}{\sum_{j=1}^n (\kappa \cdot P_{j\alpha_r} + (1 - \kappa) \cdot P_{j\alpha_l})} \right\}, i = 1, 2, \dots, n$$

2.1.2.4 Método de calificación

En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo para determinar la calificación de susceptibilidad a deslizamientos utilizando los métodos de calificación WLC y OWA explicados a continuación.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 25
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

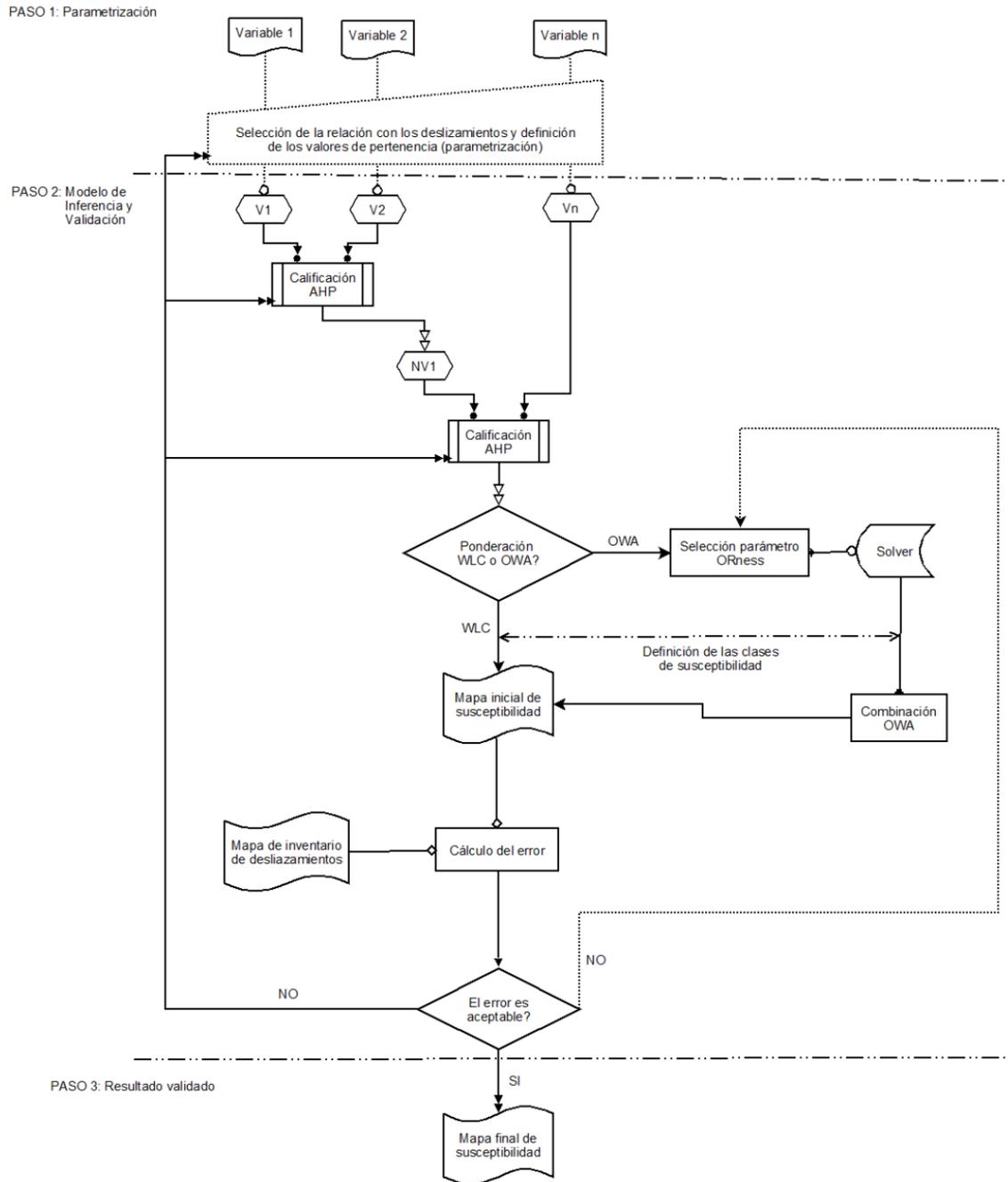


Figura 4. Diagrama de flujo para la calificación de la susceptibilidad utilizado los métodos WLC y OWA (adaptado de Malczewski, 2006)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	26

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Combinación lineal ponderada (WLC)

Una vez los criterios o variables de calificación han sido estandarizados o parametrizados y sus respectivos pesos han sido establecidos, el método de la combinación lineal ponderada o WLC por sus siglas en inglés (Voogd, 1983), es el más simple método para la agregación de los criterios de evaluación en un criterio de calificación. Así, según el método WLC, el índice de susceptibilidad a deslizamientos (ISD) se obtiene de la suma de cada criterio de evaluación multiplicado por su respectivo peso (obtenido de la calificación AHP), es decir:

$$IS = \sum_{i=1}^n c_i \cdot v_i$$

Ponderación promedio ordenada (OWA)

Yager (1988) introdujo el método de ponderación promedio ordenada (OWA, por sus siglas en inglés), en donde para un número “*n*” de criterios (o atributos) el parámetro OWA es definido como:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n u_j \cdot z_{ij}$$

Donde,

$$u_j = \frac{v_j \cdot w_j^*}{\sum_{j=1}^n v_j \cdot w_j^*}$$

Siendo,

$z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$ Valores ordenados de las calificaciones $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$

w_j^* Valores iniciales ordenados de los pesos entre variables.

v_j Valores de los pesos ponderados ordenados según el criterio OWA.

Se define el operador ORness (Yager, 1993; Yager, 1998; Carlsson & Fuller, 1997) como:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	27

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$$ORness = \eta = \sum_{j=1}^n \frac{n-j}{n-1} \cdot v_j$$

El parámetro OWA puede ser caracterizado por la medida de su dispersión, usando la medida de la entropía de Shannon, donde la dispersión normalizada es definida como (Malczewski, 2006):

$$\chi = \sum_{j=1}^n \frac{v_j \cdot \ln v_j}{\ln n}$$

O'Hagan (1990)¹, sugiere que para determinar los valores de los pesos ponderados ordenados se debe relacionar del grado ORness (η) y la medida de la dispersión (entropía, χ), resolviendo para ello el siguiente problema matemático no lineal:

$$\max(\chi)$$

$$\text{Sujeto a: } \eta = \sum_{j=1}^n \frac{n-j}{n-1} \cdot v_j, \sum_{j=1}^n v_j = 1, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n$$

La solución de las dos ecuaciones anteriores determina el máximo grado de dispersión para un grado dado de ORness.

2.1.3 Método Estadístico

Este método permite evaluar la dependencia de una variable (movimientos en masa) dicotómica (con dos categorías) respecto a un conjunto de variables independientes (explicativas) que pueden ser tanto discretas (categóricas: geología, geomorfología y cobertura) como continuas (cuantitativas: pendiente, índice topográfico, dirección de flujo, concavidad, índice de relieve relativo, forma del área de captación y densidad de drenaje) (Salazar, 2012-2013).

Normalmente, cuando se trabaja con una variable dicotómica, la variable se ajusta a modelos de respuesta binaria debido a que sólo tiene dos posibles resultados: éxito o fracaso. En el presente estudio, el resultado éxito se refiere a que sí se

¹ Tal como se describe en Malczewski (2006).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	28

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

presentan movimientos en masa, mientras fracaso indica que no se presentan movimientos en masa.

En otras palabras, el objetivo de la regresión logística es predecir la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa para los datos ajustados a una curva logística por medio de los coeficientes de las variables estimados. En este estudio se utilizará el programa “*The R Project for Statistical Computing*” para desarrollar el análisis estadístico llevado a cabo en esta sección.

2.1.3.1 Modelo De Regresión Logística

Se parte inicialmente del modelo lineal, donde la probabilidad está descrita por la siguiente fórmula:

$$p = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_nx_n$$

Donde

P= probabilidad

β = coeficientes del modelo

x= variable independiente (explicativa)

Como el valor de la probabilidad del modelo se encuentra condicionado entre 0-1, se debe realizar un ajuste a la fórmula anterior para evitar que algunas de las variables explicativas tomen valores de rango amplio. Esto dificulta el cálculo de los coeficientes del modelo de debido a que la probabilidad no puede exceder el rango anteriormente mencionado.

Para contrarrestar este problema, la variable probabilidad se deja de utilizar como p , y se introduce la función logit p . Esta función es igual a la función logaritmo de o , donde el término o representa los odds (posibilidades) y es igual a $\frac{p}{1-p}$. Ya que los odds varían de 0 a ∞ , su logaritmo garantiza que se puedan tomar todos los valores en el modelo lineal $(-\infty, \infty)$, lo que da como resultado la siguiente fórmula:

$$\text{logit } p = \log o = \log \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_nx_n$$

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 29
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

La anterior ecuación es equivalente a la siguiente expresión, debido a que la inversa de la función logit es la función logística:

$$p = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}}$$

Para la estimación de los coeficientes, se escogió el método de “máxima verosimilitud”. Este método consiste en realizar estimaciones que hagan máxima la probabilidad de obtener los coeficientes de las variables dependientes a partir de los datos que componen la muestra.

Regresión Logística De Firth

En el estudio se trabaja con una serie de datos históricos de procesos morfodinámicos (éxitos) que se han presentado en la zona de estudio, y una serie de datos de las zonas con baja probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (fracasos). Las zonas que fueron asignadas como fracasos son muy pocas debido a que se incurriría en un error al suponer que en un área no se van a presentar movimientos en masa. Por otro lado, si no se asignan zonas como fracasos, el modelo no converge cuando se ajusta al método de la regresión logística.

Como consecuencia de esta asignación, el método de máxima verosimilitud del modelo logístico se encuentra sesgado. En este caso, el método converge a un valor finito del indicador de máxima verosimilitud mientras uno de los parámetros de las de las variables diverge al infinito (Firth, 1993)(Figura 5b). Adicionalmente, las variables continuas predicen el resultado (variable dependiente) de manera muy perfecta. Este fenómeno se conoce como “separación” y causa que se presenten valores grandes del error estándar (Rodríguez, Godínez, Ariza, & Reyes, 2010).

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 30
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

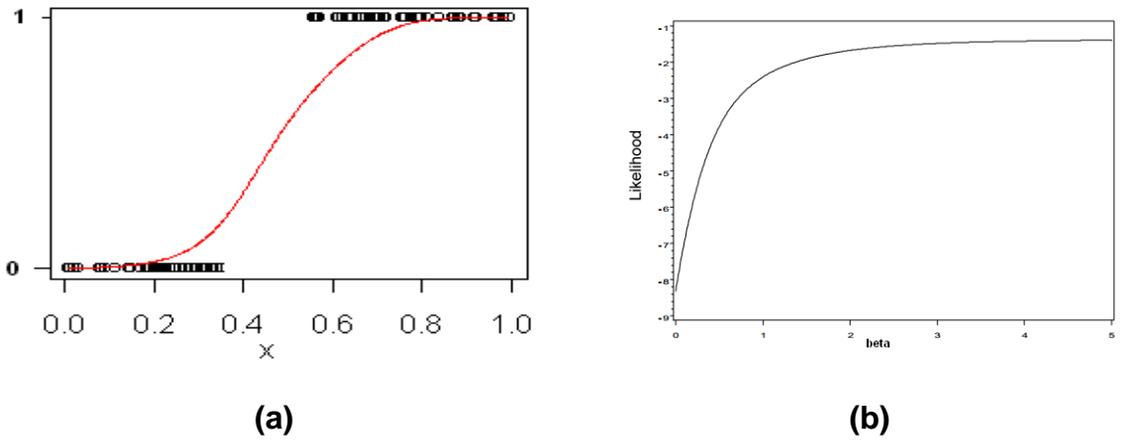


Figura 5 (a) Gráfica que muestra la perfecta separación de los datos siendo ajustados a una función logística (b) Gráfica de las iteraciones del estimador de máxima verosimilitud para unos datos que presentan una separación completa donde el estimador no converge al no presentar un pico es su curva

El método de verosimilitud penalizada o Regresión logística de Firth, se encarga de resolver este problema al estimar parámetros finitos y consistentes (Firth, 1993). Este método penaliza la función de verosimilitud con la apriori invariante de Jeffreys que existe cuando hay separación en los datos (Ver Figura 6 (Rodríguez, Godínez, Ariza, & Reyes, 2010):

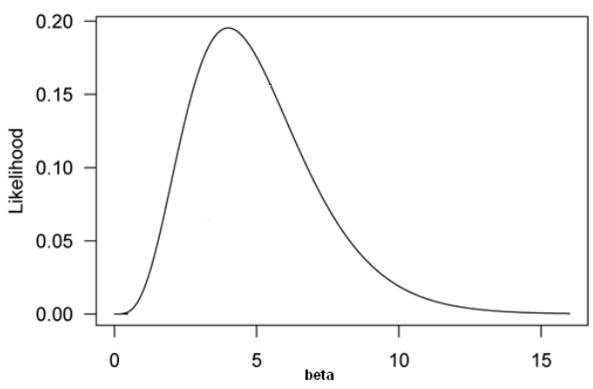


Figura 6. Estimador de Máxima verosimilitud calculado con la regresión logística de Firth

La función penalizada es la siguiente:

$$\log L(\beta)^* = \log L(\beta) + \frac{1}{2} \log |I(\beta)|$$

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

El estimador penalizado de máxima verosimilitud de β se obtiene al maximizar $\log L(\beta)$ usando el método iterativo de Newton Raphson con $U(\beta^s)^*$ (Heinze, 2014):

$$\beta^{s+1} = \beta^s + I(\beta^s)^{-1}U(\beta^s)^*$$

Donde

$$U(\beta^s)^* = \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \hat{y}_i - \sum_i h_i x_i (0.5 - \hat{y}_i)$$

El término señalado en rojo es el que se encarga de que la expresión se encuentre penalizada.

Formulación Del Modelo

En el proceso de la formulación de modelo, las 3 variables categóricas (geología, geomorfología y cobertura de la tierra) se transforman a variables continuas con el método de AHP con lógica difusa. Este método asigna un peso a cada categoría dependiendo de su relación con la Susceptibilidad. De esta manera, todas las variables que entran inicialmente al modelo son de naturaleza continua. Los pesos asignados a cada una de las categorías se enseñan en las secciones 2.2.4, 2.2.5 y 2.2.6.

Se utilizan las técnicas automáticas “forward” y “backward”, donde se escoge paso por paso las variables que se consideran que deben pertenecer al modelo (Salazar, 2012-2013). Al utilizar R , cada ajuste de los modelos se realiza mediante la función *logistf* (Heinze, 2014).

Modelo Forward

Se inicia con el ajuste del modelo sin variables. Seguido se ajusta el modelo con una de las variables y se compara el estimador de máxima verosimilitud del modelo vacío con el modelo que incluye una variable mediante una prueba de hipótesis. Se escoge el modelo que mejor se ajusta al método y cuyas variables son significativas. Este procedimiento se realiza sucesivamente de manera automática hasta que se incluyan todas las variables significativas en la muestra.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 32
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Modelo Backward

Se inicia con un modelo que incluya todas las variables (saturado). Seguido se ajusta el modelo al eliminar una de las variables. Después se compara el estimador de máxima verosimilitud del modelo saturado con el modelo sin una de las variables mediante una prueba de hipótesis. Se escoge el modelo que mejor se ajuste al método.

Este procedimiento se realiza sucesivamente de manera automática hasta que todas las variables que se incluyan sean significativas y sin que se pueda eliminar ninguna de ellas sin que se pierda el ajuste.

2.1.4 Método De Validación Del Mapa De Susceptibilidad

El mapa de Susceptibilidad es un modelo que sirve para predecir la probabilidad de ocurrencia espacial de fenómenos de remoción en masa, por esta razón, su capacidad para hacer pronósticos debe ser verificada. Inicialmente, la evaluación de la Susceptibilidad se debe evaluar en contra de la información utilizada para generarlo y en contra de los eventos que se presenten en el futuro, tal como lo describe la metodología de Guzzetti (2005) la cual se explicará a continuación.

La primera evaluación se utiliza para investigar la bondad de ajuste que tiene el modelo creado mientras que el objetivo de la segunda, es el de evaluar la habilidad del modelo para en realidad predecir movimientos de masa futuros.

La bondad de ajuste del modelo se comprueba al contar y comparar el porcentaje del área perteneciente a las zonas en donde se presentaron los movimientos en masa para cada clase de Susceptibilidad. Los casos en que los eventos no coinciden con las categorías de Susceptibilidad mostradas en el mapa se pueden dividir en dos tipos. En el primer tipo, se le asigna una categoría de estable o no susceptible a una zona en el mapa en donde se había presentado un movimiento por remoción en masa, lo cual es un error del modelo. Para el segundo tipo, el mapa muestra zonas de alta Susceptibilidad a zonas en las que nunca se habían presentado eventos de este tipo. Este segundo caso no se puede considerar como un error ya que en estas áreas se necesita realizar estudios adicionales que ayuden a establecer su nivel de Susceptibilidad. Por otro lado, la presencia de los

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	33

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

movimientos en masa es producto de factores que no se hayan considerado en el modelo o errores que se encuentren en las variables de entrada del modelo.

La evaluación de la predicción del modelo es un tema más complicado debido a que no se puede esperar a que los eventos se presenten para validarlo. Para este caso el autor propone la comparación de las áreas del modelo actual con las áreas de un inventario de procesos morfodinámicos alterno (inventario de validación) al que se utilizó para la generación del modelo en primer lugar.

Según Guzzetti (2005), un método alternativo que se utiliza para medir la confiabilidad del modelo en términos de su clasificación de los eventos conocidos es el de utilizar el índice Kappa de Cohen. El índice de kappa refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión (concordancia) (Ver Tabla 4), siempre y cuando sean de contraste entre dos observadores. Para este estudio los observadores serán Procesos Morfodinámicos Existentes y Procesos Morfodinámicos Pronosticados. El coeficiente de kappa puede tomar valores entre -1 y +1, siendo 1 el grado mayor de concordancia inter-observador. Por el contrario, -1 es el grado de divergencia inter-observador y 0 representa la concordancia esperada exclusivamente del azar (Cerdeja y Villarroel, 2008).

Tabla 4. Formato tabla de concordancia para eventos de movimientos en masa existentes y pronosticados

		Procesos Pronosticados	
		Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)
Procesos Existentes	Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	x	-
	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)	-	y

La expresión del índice de kappa es el siguiente:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	34

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$$\kappa = \frac{P_C - P_E}{1 - P_C}$$

Dónde:

P_C = proporción de unidades que fueron correctamente clasificadas como estables o inestables en la tabla de concordancia (ver Tabla 4 - diagonal x-y)

P_E = proporción de unidades clasificadas al azar

La Tabla 5 muestra la escala utilizada para clasificación cualitativa de la concordancia.

Tabla 5. Valoración del Coeficiente Kappa (tomado de Cerda y Villarroel (2008)).

Coeficiente κ	Clasificación
0	Pobre
0.01 – 0.02	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi Perfecta

Para la evaluación del comportamiento del modelo para cada una de las categorías de Susceptibilidad, la metodología de Guzzetti (2005) recomienda realizar la comparación del área total de cada categoría de Susceptibilidad de los procesos de remoción en masa con el porcentaje del área de las categorías de Susceptibilidad.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	35

2.2 MAPA SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL

Para la generación del mapa de Susceptibilidad regional del terreno a los movimientos en masa a escala 1:150000, se contempló emplear los siguientes 3 temas: Geomorfología, Geología y Cobertura del suelo, de acuerdo con la Figura 7.

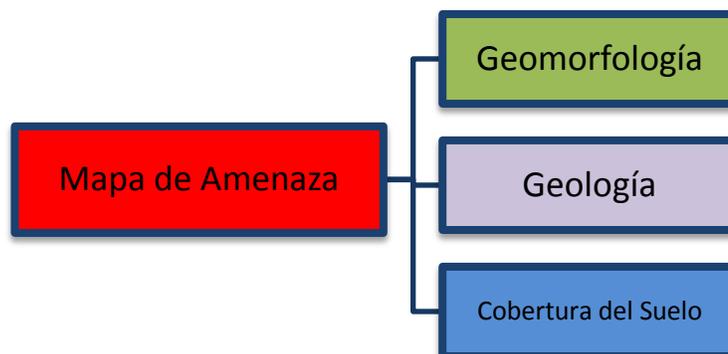


Figura 7. Temas para generación del mapa de Susceptibilidad a movimientos en masa

En este documento se presenta la definición, importancia, forma de obtención y la manera que se empleará cada una de las variables para generar el mapa de Susceptibilidad del terreno; en el Anexo se presenta el resultado de la evaluación final, denominado “mapa de Susceptibilidad de remoción en masa regional del terreno” para los municipios de Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachalá.

2.2.1 MODELO DE DATOS

En la Figura 8 se presenta el modelo de datos con los nombres asignados para cada variable que se tiene en consideración.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	36

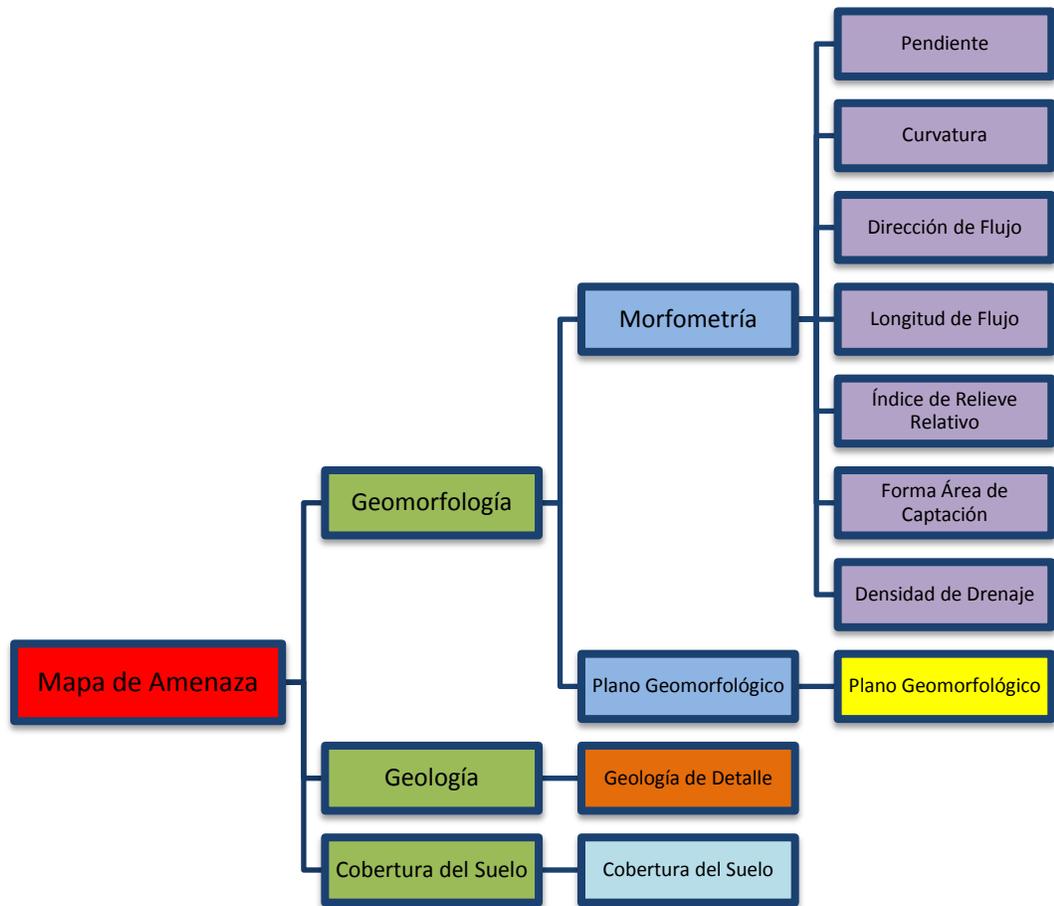


Figura 8. Modelo de datos del proyecto

2.2.2 CALIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

La calificación de las variables se realizó con diferentes profesionales entre los que se encuentran geólogos, hidrólogos, agrólogos, geógrafos e ingenieros civiles, agrícolas, forestales y catastrales del consorcio J & G; quienes a partir de su experiencia y conocimiento, asignaron el grado de Susceptibilidad teniendo en cuenta las categorías presentadas en la Tabla 6.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	37

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.2.2.1 Parametrización Semicuantitativa

Para realizar este trabajo se empleó la información del inventario de procesos creados por el consorcio a partir del mapa de procesos morfodinámicos y el inventario de procesos producto de diferentes visitas de campo que se realizaron en todos los municipios.

Para las variables que se enumeran a continuación, se empleó un método semi-cuantitativo para seleccionar rangos de valores y determinar la categoría de Susceptibilidad (ver Tabla 6) el cual se explica más adelante en esta sección.

1. Pendiente
2. Curvatura longitudinal
3. Longitud de flujo
4. Índice de relieve relativo
5. Forma de área de captación
6. Densidad de drenaje

Tabla 6. Grados de Susceptibilidad

CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
1	Muy baja Susceptibilidad
2	Baja Susceptibilidad
3	Moderada Susceptibilidad
4	Alta Susceptibilidad
5	Muy alta Susceptibilidad

2.2.2.2 Métodos De Clasificación De Las Variables

Para realizar los rangos de clasificación de las variables morfométricas, se emplearon los métodos Natural breaks, cuantiles, geometrical interval y equal

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	38

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

interval con que cuenta el programa ArcGIS, los cuales se describen a continuación:

Natural Breaks

Las clases se basan en agrupaciones naturales inherentes a los datos. El ArcMap identifica puntos de quiebre al escoger la clase que mejor se divide de acuerdo con el grupo de valores similares. Las funciones se dividen en clases cuyos límites se fijan en que hay relativamente grandes saltos en los valores de los datos. Las divisiones se forman donde hay grandes saltos en el histograma de frecuencias.

Cuantiles

Los cuantiles son valores de la distribución que la dividen en partes iguales, es decir, en intervalos, que comprenden el mismo número de valores. Cada clase contiene un número igual de datos. Una clasificación cuantil se adecua perfectamente a los datos distribuidos linealmente.

Para evitar que características similares se ubiquen en diferentes clases, o que características muy diferentes queden en la misma clase, se puede minimizar esta distorsión aumentando el número de clases.

Geometrical interval

Se trata de un esquema de clasificación donde se divide la clase, en intervalos y tienen una serie geométrica. La media geométrica del coeficiente de este clasificador puede cambiar una vez (a su inverso) para optimizar los rangos de clase (rangos de igual tamaño). El algoritmo crea estos intervalos geométricos, minimizando la suma de cuadrados de elementos por clase. Esto asegura que cada intervalo de clase tiene aproximadamente el mismo número de valores con cada clase y que el cambio entre intervalos es bastante coherente.

Equal interval

Se trata de un esquema de clasificación que divide el rango de valores de atributos en igual tamaño (Subrangos), lo que le permite especificar el número de intervalos, el ArcMap determina donde debe ser el cambio. Por ejemplo, si las características de los valores de los atributos van de 0 hasta 300 y tiene tres clases, cada clase representa un rango de 100, con intervalos de clase de 0 a 100,

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	39
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

de 101 a 200 y de 201 a 300 este método hace hincapié en la cantidad de un valor de atributo con relación a otros valores.

Dentro de la descripción de cada variable se presenta cual fue el procedimiento de calificación.

2.2.2.3 Variables de Geomorfología-Geología-Cobertura del suelo

Se calificaron las variables de estas categorías empleando el método de estimación por el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés) con lógica difusa. El método AHP consiste en utilizar el juicio de expertos, para ayuda en la toma de decisiones debido a que se basa en múltiples criterios de decisión. Para más información ir a la sección 2.1 de este documento. Adicionalmente, la lógica difusa es un método que permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales y que en muchos casos incluye juicios subjetivos. Se le llama difusa a este tipo de información porque presenta un tipo de incertidumbre la cual no es del tipo de medición (Lee Hua, Mak Chee, & Chin Wen, 2006). Para tener en cuenta la variabilidad en la de la valoración de la matriz de comparaciones, se utilizó un número borroso de tipo triangular. (Para más información de la lógica ver 2.1.2 de este documento).

2.2.3 CATEGORIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La caracterización de la susceptibilidad se realizó desde el punto de vista de la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa. La Tabla 7 enseña la categorización empleada para la zona de estudio.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	40

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 7. Categorización adoptada para la Susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa

CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN
III Muy Alta	0.90 a 1.00	Es muy alta la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa.
Alta	0.40 a 0.90	Es alta la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa.
II Media	0.20 a 0.40	Es media la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa.
Baja	0.10 a 0.20	Es baja la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa.
I Muy Baja	0.00 a 0.10	Es muy baja la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	41

2.2.4 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología incluye las capas de morfometría y plano geomorfológico, las cuales se dividen en variables como se presenta en la Figura 9.

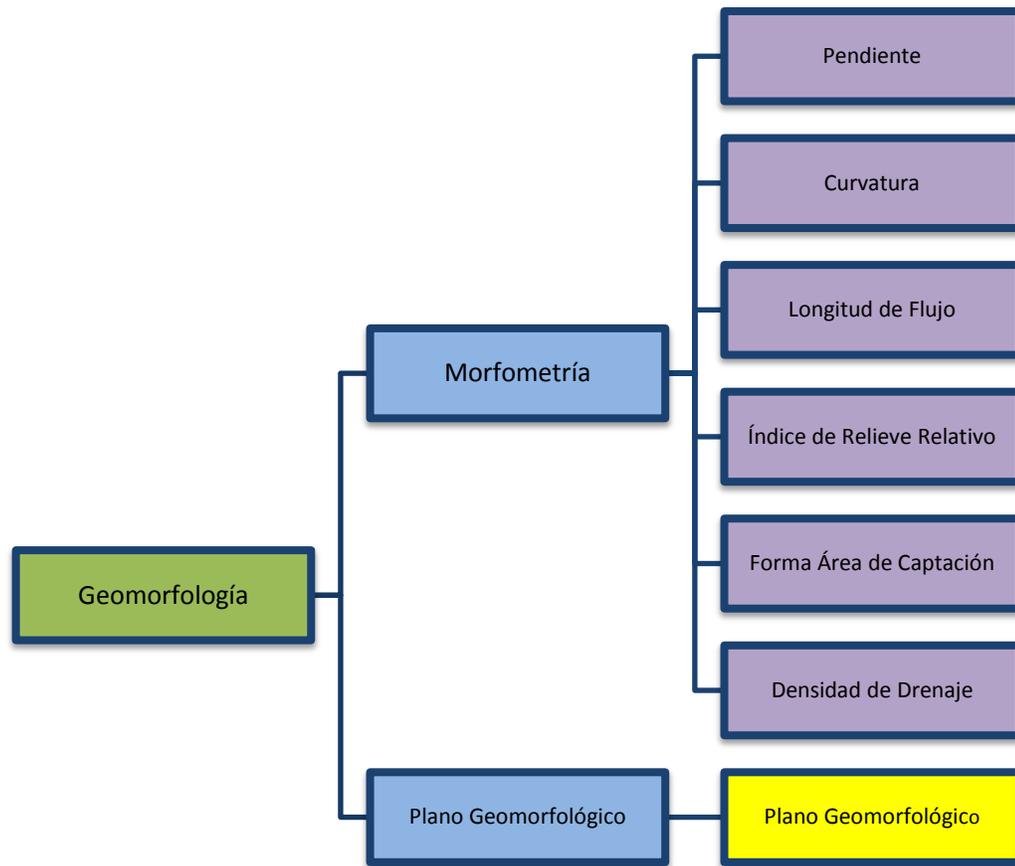


Figura 9. Capas y variables del Tema Geomorfología

2.2.4.1 Morfometría

Para las variables de morfometría se emplearon dos fuentes de información, en un caso se trabajó con el modelo digital de elevaciones (DEM), del cual se derivaran las variables pendiente, curvatura longitudinal y longitud de flujo y en el segundo caso se empleó el programa Global Mapper para derivar del (DEM) las variables de área de captación, índice de relieve relativo y densidad de drenaje (ver Figura 10).

Para realizar la calificación de las variables de morfometría, se realizó por expertos del consorcio, así mismo como la estructuración de los mapas que se emplearan para realizar el modelo de Susceptibilidad a los movimientos en masa, este se encuentra en los anexos que incluyen los mapas.

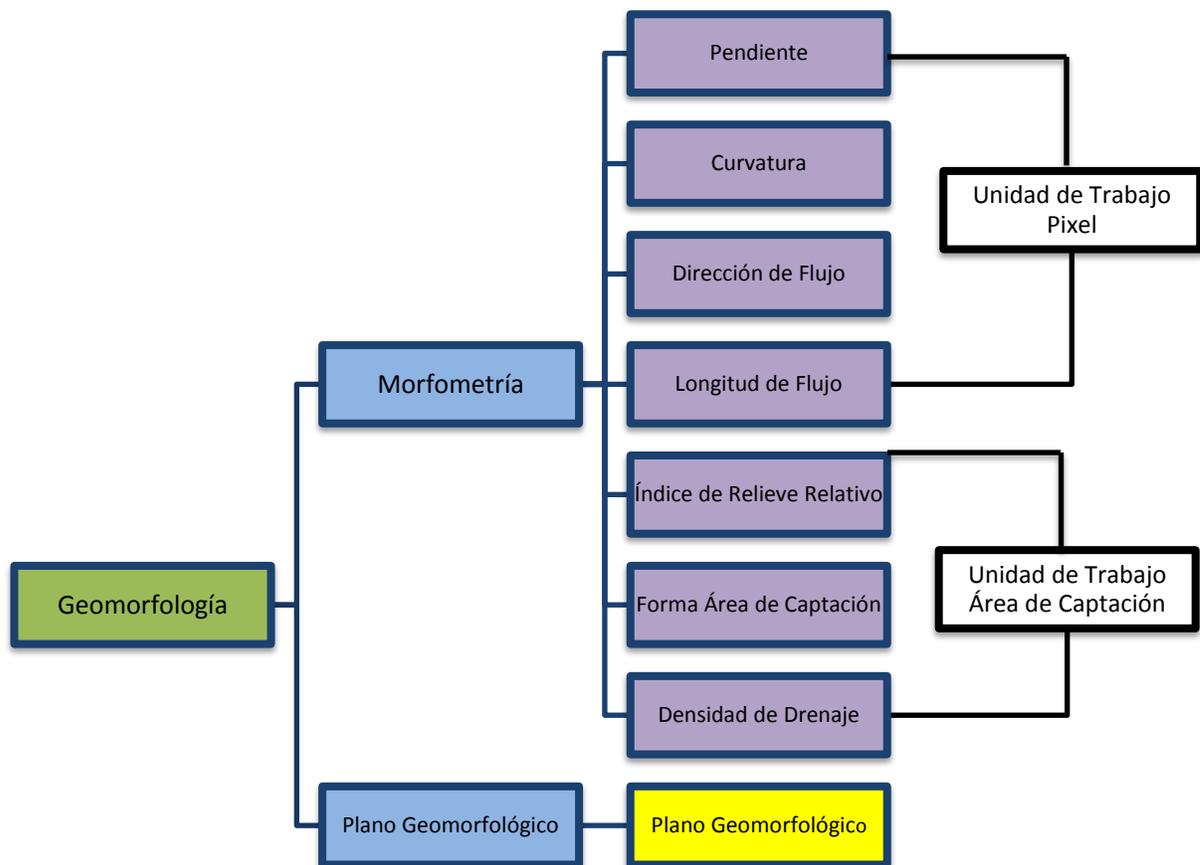


Figura 10. Variables del subtema morfometría.

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Pendiente

Definición

Se trata de la pendiente de la ladera definida como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje. Para este caso en particular se empleara la pendiente medida en grados. La pendiente es una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

Adicional a la pendiente, existe la pendiente senoidal de la ladera, definida como el seno del producto de la pendiente por el valor constante 2. Es una variable cuantitativa y continua derivada del DEM. Esta variable es una transformación matemática senoidal de la anterior, la pendiente senoidal se ajusta mejor al comportamiento de la pendiente respecto a las zonas de rotura de los movimientos en masa superficiales (Baeza, 1994).

Importancia del tema

La pendiente está muy relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad y es una de las principales condiciones para que ocurra un movimiento en masa. La variable se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Jones et al., 1961; Moser et al., 1983; Oyagi, 1984; Mulder, 1991).

Forma de Obtención

Es una variable derivada del DEM, generada en ArcGIS en RASTER mediante una función directa del mismo. Para cada celda, la pendiente calcula la tasa máxima de cambio en el valor de esa celda con sus 8 vecinos. Básicamente, el cambio máximo en la elevación más la distancia entre la celda y sus ocho vecinos identifica la pendiente cuesta abajo de la celda.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	44

Cuanto más bajo sea el valor de la pendiente, es más plano el terreno, mientras que el valor más alto de la pendiente, indica que el terreno es más escarpado.

Para la generación del mapa de Susceptibilidad, la pendiente se calculó en grados y se utilizó el siguiente algoritmo:

$$slope_degrees = a \tan \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right) * 57.29578$$

El valor de la grilla del centro y las de sus ocho vecinos determinar el carácter horizontal y vertical de los deltas. Los vecinos se identifican con letras (a a i) como se presentan en la Figura 11.

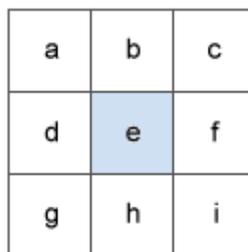


Figura 11. Celdas para cálculo de pendiente

(Tomado de: ArcGIS 9.2 Desktop Help)

La tasa de cambio en la dirección de la celda x "e" se calcula con el algoritmo:

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| = \left(\frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 \cdot x} \right)$$

La tasa de cambio en la dirección y de la celda "e" se calcula con el siguiente algoritmo:

$$\left| \frac{dz}{dy} \right| = \left(\frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 \cdot y} \right)$$

Para la realización del mapa de susceptibilidad por pendiente (Ver Anexo, Mapa de susceptibilidad por Pendientes) se realizó un diagrama de flujo donde se explica detalladamente los pasos a seguir tal como se muestra en el Diagrama 1.

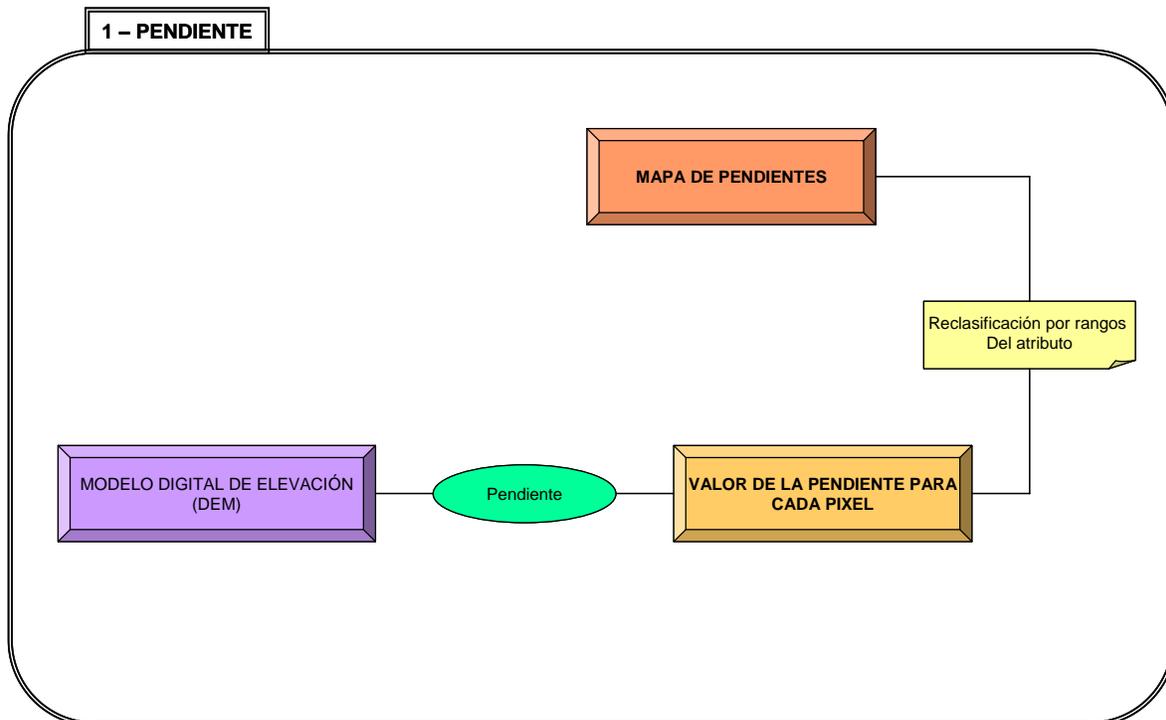


Diagrama 1 Proceso cartográfico para obtener el Mapa de susceptibilidad por pendientes

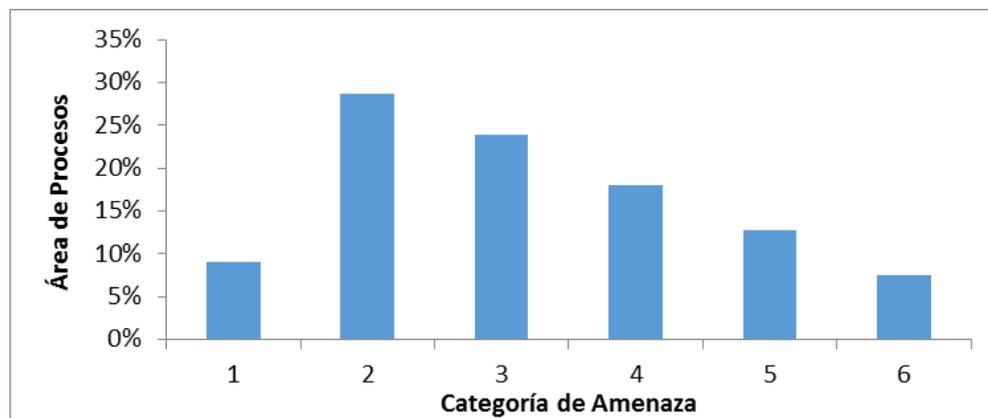
Forma de empleo

Para determinar los rangos que se emplean en esta variable, se realizó el cruce con el inventario de procesos, con el fin de determinar en qué grado de pendiente se encuentra cada movimiento en masa, con esta información se determinó que los rangos que se ajustan mejor al comportamiento de los movimientos en masa son los que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Rangos de pendientes

CATEGORÍA	PENDIENTE (°)	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
1	0 – 5	9.06%
2	5 – 15	28.69%
3	15 – 25	23.93%
4	25 – 35	18.01%
5	35 – 45	12.71%
6	> 45	7.59%

En la Gráfica 1, se presenta el histograma de cada rango (categoría) comparado con el área de los movimientos en masa y en la Tabla 9, se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada rango.



Gráfica 1. Categoría de pendientes vs cantidad de movimientos en masa

Tabla 9. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de pendientes

CATEGORÍA	PENDIENTE (°)	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
1	0 – 5	Muy Baja
2	5 – 15	Baja
3	15 – 25	Media
4	25 – 35	Alta
5	35 – 45	Muy alta

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORÍA	PENDIENTE (°)	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
6	> 45	Muy Baja

Concavidad

Definición

La curvatura indica el grado de convexidad/concavidad del terreno. Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud (Figura 12).

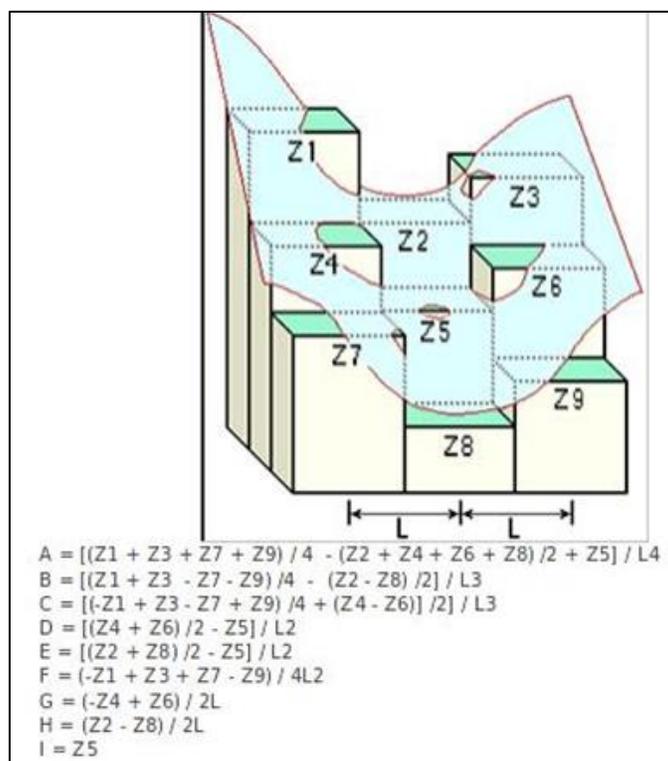


Figura 12 Esquema y expresiones para el cálculo de la curvatura

Determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Se deriva del DEM y adquiere un rango de valores según la zona, que oscila entre - 189 y 208, siendo por tanto, una variable cuantitativa y continua. El valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	48

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Adicional a la curvatura longitudinal (Ver Anexo Mapa de susceptibilidad por Curvatura), como ejercicio dentro del proyecto también se generó el mapa de susceptibilidad por curvatura transversal y el mapa de susceptibilidad por curvatura perpendicular, pero al revisar los resultados obtenidos la curvatura longitudinal, es la que más representa la realidad de las laderas y la que determina propiamente en cuál curvatura es más o menos susceptible que se presente un movimiento en masa.

Importancia del tema

La variable curvatura longitudinal, indica la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración y la escorrentía y a la aceleración y deceleración del flujo, y por tanto influye en la erosión y deposición.

Forma de obtención

La variable se deriva del DEM, generada por ArcGIS en RASTER mediante una función directa de este subprograma. Se utiliza la función CURVATURE que calcula la curvatura de la superficie en cada celda. Para cada celda interior de una ventana de análisis de 3 * 3 el programa calcula la curvatura mediante un polinomio de cuarto orden. La curvatura es la segunda derivada de la superficie.

El procedimiento de obtención se presenta en un diagrama de flujo que explica paso a paso la obtención de la cartografía para el mapa susceptibilidad por Curvatura-Concavidad Longitudinal (Diagrama 2).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	49

15 – CURVATURA – CONCAVIDAD LONGITUDINAL

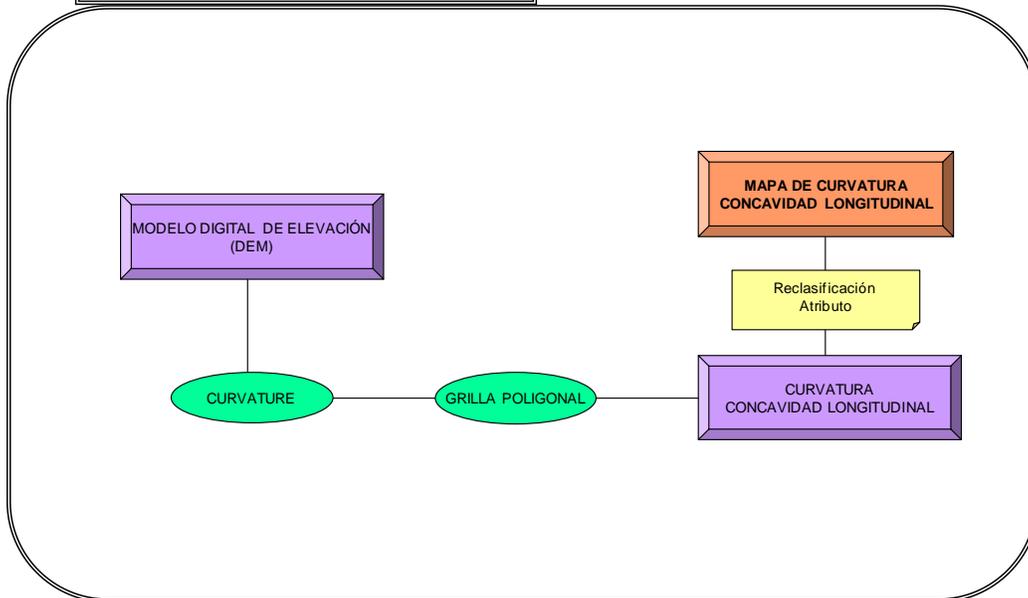


Diagrama 2. Procedimiento cartográfico del mapa de susceptibilidad por curvatura longitudinal

Forma de empleo

El rango de datos obtenidos a partir del procedimiento descrito, está dado por valores que van de -189 a 208, se realizó el cruce con el inventario de procesos para poder determinar el comportamiento de los mismos para diferentes valores de curvatura, encontrando que los movimientos en masa se concentran en el rango -2 a 0, en la Tabla 10 se presentan los rangos para 7 categorías propuestas inicialmente, las cuales se reagruparon en 5 categorías como se presenta en la Tabla 11 en la que aparece la cantidad de movimientos en masa para cada categoría.

Tabla 10. Rangos de Curvatura longitudinal propuestos inicialmente

CATEGORIA INICIAL	RANGOS DE CURVATURA
1	-189 - -24
2	-24 - -8
3	-8 - -2
4	-2 - 0
5	0 - 5
6	5 - 27

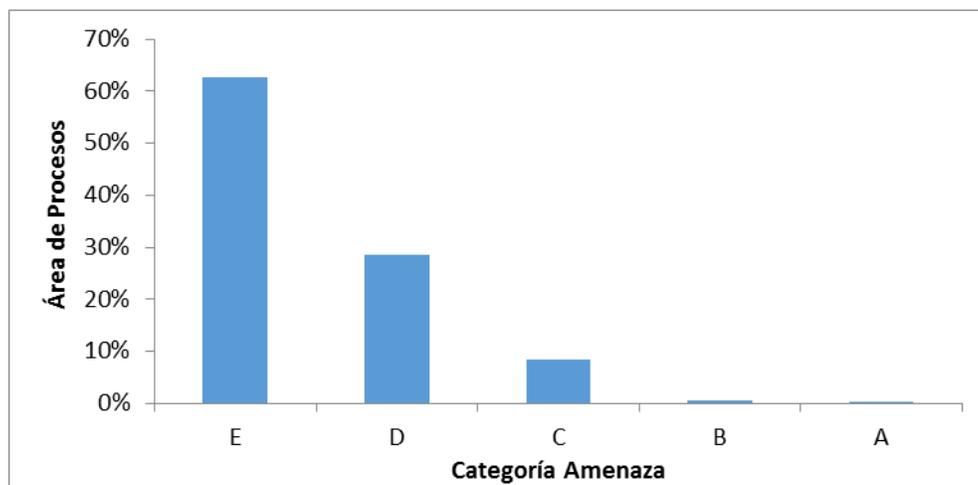
	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORIA INICIAL	RANGOS DE CURVATURA
7	27 - 208

Tabla 11. Agrupación de Rangos de Curvatura longitudinal y área de movimientos en masa

CATEGORIA INICIAL	CATEGORIA DE AGRUPACION	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
1	A	0.03%
7		
2	B	0.46%
6		
3	C	8.44%
5	D	28.52%
4	E	62.56%

En la Gráfica 2, se presenta el histograma de cada rango (categoría) comparado con el área (%) de movimientos en masa y en la Tabla 12, se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada categoría.



Gráfica 2. Categoría de curvatura vs cantidad de movimientos en masa

Tabla 12. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de curvatura

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	51
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
A	Muy alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja

Longitud de Flujo

Definición

Se trata de la longitud de flujo acumulado que contribuye a la escorrentía de un área. En este caso se está empleando formato RASTER lo que significa que el cálculo de la longitud de flujo se hará para cada pixel, teniendo en cuenta la longitud existente aguas arriba de la celda. La longitud de flujo es una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

Importancia del tema

La importancia de esta variable radica en el hecho de que a mayor longitud de flujo la Susceptibilidad será menor, ya que el agua de escorrentía tiene mayor facilidad para desplazarse por el cauce lo que va disipando la velocidad y va perdiendo la capacidad para generar movimientos en masa.

Forma de obtención

Es una variable derivada del DEM, generada en ArcGIS en RASTER mediante una función directa del mismo, que crea una red, llamada Grid de longitud de flujo, que indica la longitud, en unidades de distancia, desde cada celda de la cuadrícula a la salida (que puede ser el borde de la red), siguiendo el camino que el agua podría tomar.

Para la realización del mapa de susceptibilidad por longitud de flujo o drenaje (Ver Anexo Mapa de susceptibilidad por Longitud de Drenaje), se realizó un diagrama de flujo donde se explica detalladamente los pasos a seguir tal como se muestra en el Diagrama 3. Procedimiento cartográfico del mapa de susceptibilidad por longitud de flujo

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	52

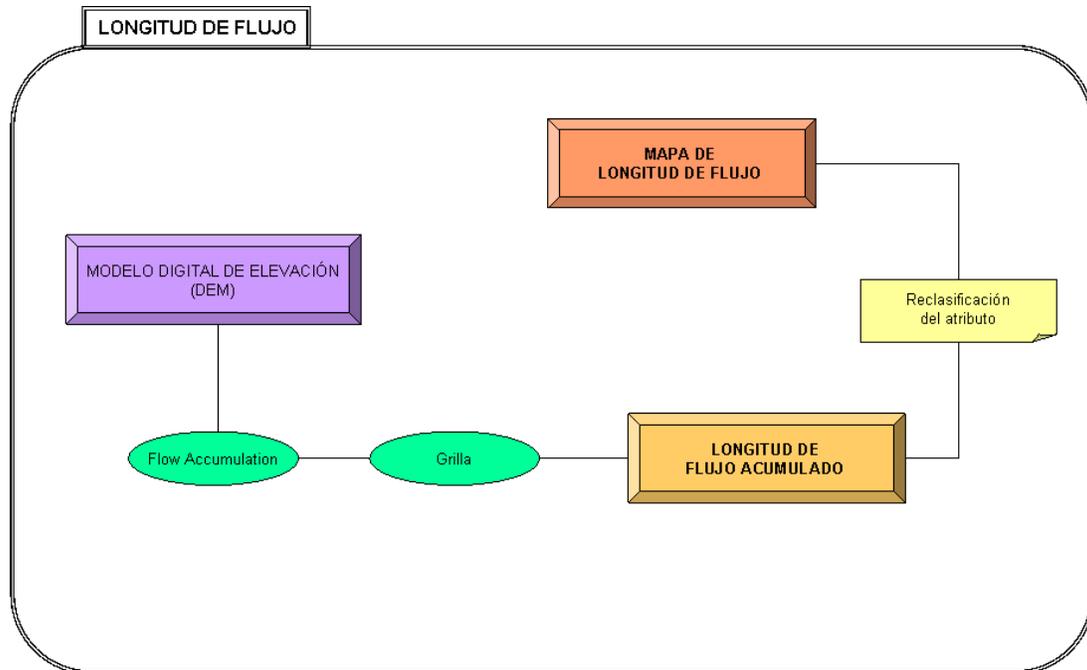


Diagrama 3. Procedimiento cartográfico del mapa de susceptibilidad por longitud de flujo

Forma de empleo

A partir del procedimiento descrito, se obtuvo el mapa de susceptibilidad por longitud de flujo, que como se indicó, es una variable continua, con dominio entre 4.90 y 1297.19, con el fin de facilitar la parametrización de la variable y definir el rango para cada categoría, se realizó el cruce con el inventario de procesos y mediante la herramienta de ArcGIS, se determinaron los rangos por diferentes métodos de clasificación estadística, como natural breaks, cuantiles, geometrical y equal interval.

Para esta variable la distribución que presentó mejores resultados es natural breaks, donde inicialmente se dividió la longitud de flujo en 9 categorías (ver Tabla 13), que luego se reagruparon en 5 categorías como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 13. Rangos de Longitud de flujos (LF) propuestos inicialmente

CATEGORIA	RANGOS DE LF
1	4.9056 -20.1089
2	20.1089 -30.2445
3	30.2445 -55.5835

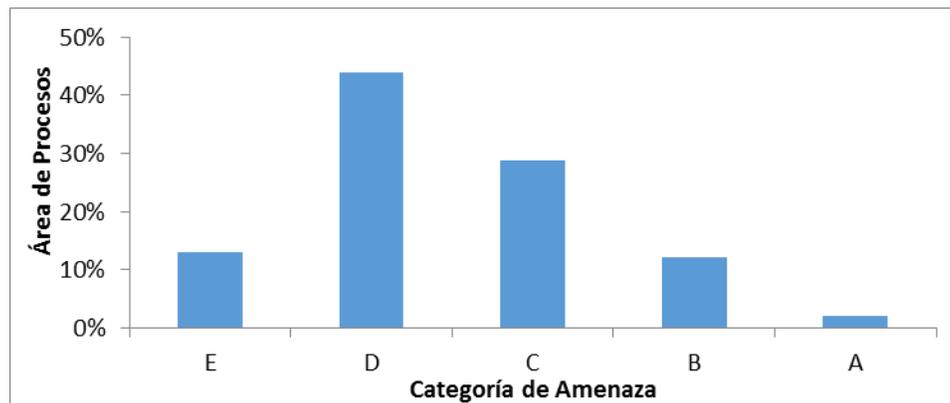
	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORIA	RANGOS DE LF
4	55.5835 -70.7869
5	70.7869 -106.2614
6	106.2614 -212.6851
7	212.6851 -319.1088
8	319.1088 -542.0917
9	542.0917 -1297.1929

Tabla 14. Reagrupación de Rangos de longitud de flujos (LF) y área de movimientos en masa

CATEGORIA FINAL	RANGOS DE LF	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
A	4.9056 - 30.2445	2.05%
B	30.2445 - 55.5835	12.24%
C	55.5835 - 106.2614	28.71%
D	106.2614 - 319.1088	43.94%
E	319.1088 - 1297.1929	13.06%

En la Gráfica 3, se presenta el histograma de los rango (categoría) comparado con el área (%) de movimientos en masa y en la Tabla 15 se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada categoría.



Gráfica 3. Categoría de Longitud de flujo (LF) vs cantidad de movimientos en masa

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	54
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 15. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de Longitud de flujo

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
A	Muy alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja

Índice de Relieve Relativo (IRR)

Definición

Este indicador representa la rugosidad del relieve natural del terreno. Se define como la relación de la mayor diferencia de altura sobre el área de captación determinada.

Importancia del tema

Se emplea para calcular la rugosidad del relieve natural del terreno, indica las características morfométricas del área de captación como el relieve o la topografía del terreno.

Forma de obtención

El cálculo del índice de relieve relativo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$IRR = \frac{ELMAX - ELMIN}{ACAPTACION} \left(\frac{m}{km^2} \right)$$

Dónde:

ELMAX = elevación máxima del área de estudio,

ELMIN = elevación mínima del área de estudio

ACAPTACION= área que se está analizando (en este caso son las áreas de captación).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	55

IRR= índice relativo de relieve (Fundación Colombia Mejor, 2007)²

El anterior procedimiento cartográfico se presenta en el (Diagrama 4).

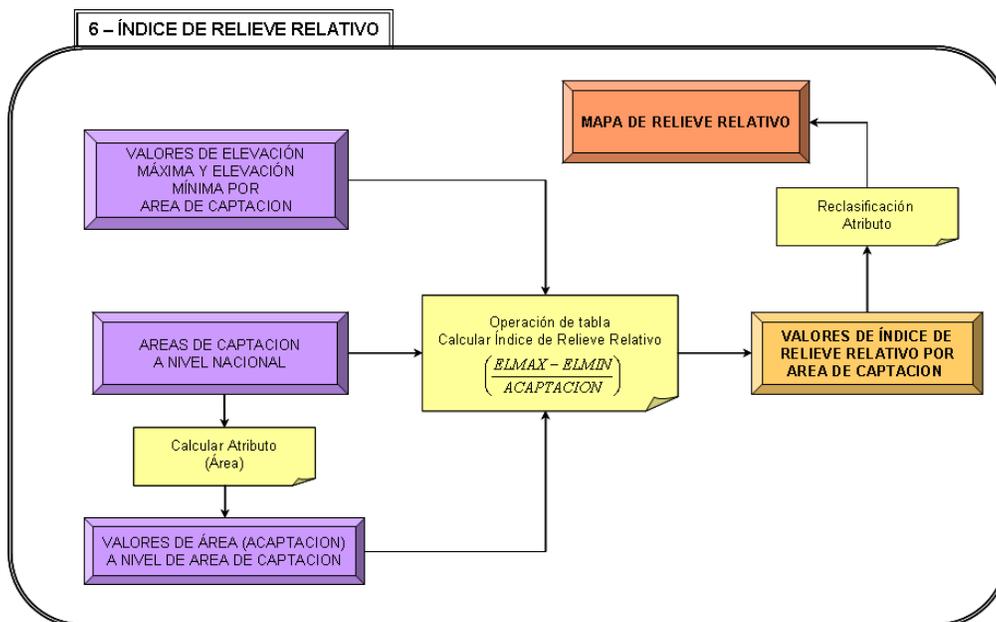


Diagrama 4. Procedimiento cartográfico para obtener el índice relativo del relieve por área de captación

Forma de empleo

A partir del procedimiento descrito, se obtuvo el mapa de susceptibilidad por índice de relieve relativo (Ver Anexo, Mapa de susceptibilidad por índice de relieve relativo), que como se indicó, es una variable continua, con dominio entre 1.67 y 89.93, con el fin de facilitar la parametrización de la variable y definir el rango para cada categoría, se realizó el cruce con el inventario de procesos y mediante la herramienta de ArcGIS, se determinaron los rangos por diferentes métodos de clasificación estadística, como natural breaks, cuantiles, geometrical y equal interval.

² Fundación Colombia mejor, (2007). Memoria técnica, Modelo de susceptibilidad general del terreno a movimientos en masa, escala 1:100.000. Bogotá.

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Para esta variable la distribución que presentó mejores resultados es cuantiles, donde inicialmente se dividió el IRR en 9 categorías para la zona de estudio tal como se presenta en la Tabla 16, estos rangos se reagruparon en 5 categorías (ver Tabla 17).

Tabla 16. Rangos de IRR propuestos inicialmente

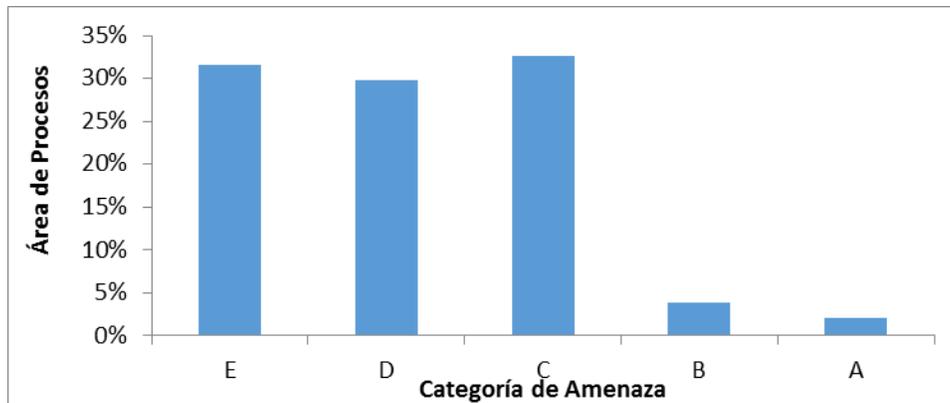
CATEGORIA	RANGOS DE IRR
1	1.6733 -3.4042
2	3.4042 -6.5192
3	6.5192 -12.4032
4	12.4032 -15.8643
5	15.8643 -24.171
6	24.171 -30.7855
7	30.7855 -43.2073
8	43.2073 -65.0124
9	65.0124 -89.9326

Tabla 17. Reagrupación de Rangos de IRR y área de movimientos en masa

CATEGORIA FINAL	RANGOS DE IRR	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
A	43.2073 - 89.9326	2.12%
B	30.7855 - 43.2073	3.89%
C	15.8643 - 30.7855	32.69%
D	6.5192 - 15.8643	29.75%
E	1.6733 - 6.5192	31.55%

En la Gráfica 4, se presenta el histograma de los rangos (categorías) comparados con el área de movimientos en masa y en la Tabla 18 se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada categoría para la zona de estudio.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	57



Gráfica 4. Categoría de IRR vs área de movimientos en masa

Tabla 18. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de IRR para la Zona 1

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
A	Muy alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja

Forma del área de captación (Kc)

Definición

La forma del área de captación es la configuración geométrica de la zona tal como está proyectada sobre el plano horizontal. La forma del área de captación se encuentra determinada por el índice o relación de forma, que radica en el área de captación sobre el cuadrado de la sumatoria de longitud de drenaje principal a nivel del área de captación.

Importancia del tema

Tradicionalmente se ha considerado que la forma del área de captación tiene influencia en el tiempo de concentración de las aguas al punto de salida, ya que modifica el hidrógrama y las tasas de flujo máximo, por lo que para una misma superficie y una misma tormenta, los factores mencionados se comportan de

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

forma diferente entre un área de forma redondeada y una alargada. Los volúmenes escurridos en zonas alargadas son más uniformes a lo largo del tiempo, en cambio, en zonas redondeadas el agua tarda menos en llegar a la salida, en donde se concentra en un tiempo relativamente corto. Siendo más susceptible a movimiento en masa las áreas de captación redondeadas por acumular de manera más rápida el agua lo cual puede generar inestabilidad de los taludes.

Forma de obtención

Para el caso particular del proyecto, se empleó el índice de Gravellius o el coeficiente compacidad, que corresponde al valor de dividir el perímetro del área de captación por la longitud de la circunferencia de un círculo que tiene como área la misma de área de captación. Para hallarlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{A^{\frac{1}{2}}}$$

Dónde:

P= Perímetro del área de captación (Km)

A=Área del área de captación (Km²)

Kc= Coeficiente de compacidad

Entre más irregular sea el área de captación mayor será su coeficiente de compacidad. Un área de captación circular posee el coeficiente mínimo, cercano a uno, o uno si es totalmente circular. Las crecientes serán más rápidas, con tiempos de concentración más cortos, cuando la forma del área de captación tiende a ser circular y su coeficiente de compacidad es cercano a uno. En el Diagrama 5, se presenta el procedimiento para obtener el mapa de susceptibilidad por forma del área de captación (Ver Anexo Mapa de susceptibilidad por Área de Captación).

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 59
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

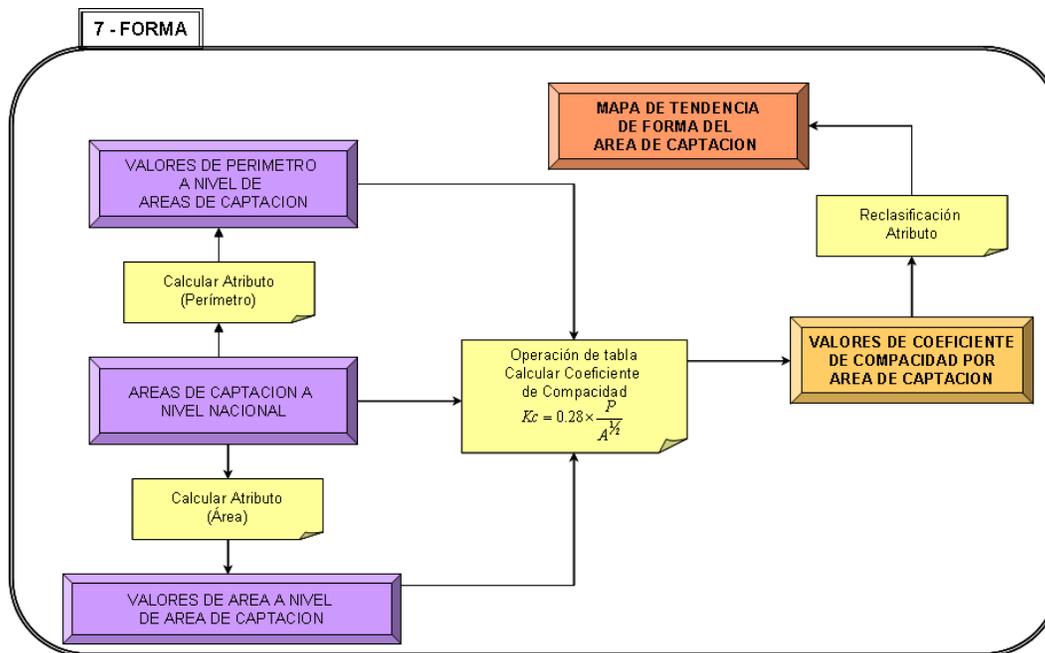


Diagrama 5. Procedimiento cartográfico para obtener mapa de susceptibilidad por forma de área de captación

Forma de empleo

A partir del procedimiento descrito, se obtuvo el mapa de susceptibilidad por forma del área de captación, que es una variable continua, con dominio entre 1.19 y 1.86, con el fin de facilitar la parametrización de la variable y definir el rango para cada categoría, se realizó el cruce con el inventario de procesos y mediante la herramienta de ArcGIS, se determinaron los rangos por diferentes métodos de clasificación estadística, como natural breaks, cuantiles, geometrical y equal interval.

La distribución que presentó mejores resultados es natural breaks, donde inicialmente se dividió el kc en 6 categorías (ver Tabla 19), estos rangos se reagruparon en 5 categorías a las que se les determinó el área de movimientos en masa (ver Tabla 20).

Tabla 19. Rangos de Kc propuestos inicialmente

CATEGORIA	RANGOS DE Kc
1	1.1914 -1.2679
2	1.2679 -1.347

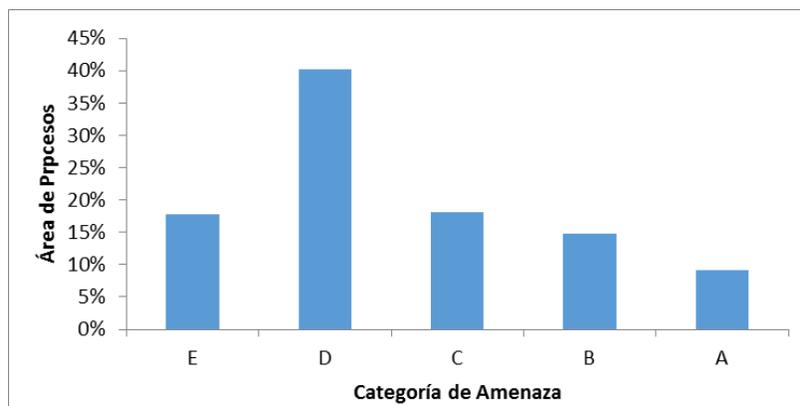
	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORIA	RANGOS DE Kc
3	1.347 -1.4261
4	1.4261 -1.5185
5	1.5185 -1.6873
6	1.6873 -1.8641

Tabla 20. Reagrupación de Rangos de Kc y área de movimientos en masa

CATEGORIA FINAL	CATEGORIA	RANGOS DE Kc	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
A	1 y 2	1.1914 - 1.347	9.17%
B	3	1.347 - 1.4261	14.75%
C	4	1.4261 - 1.5185	18.04%
D	5	1.5185 - 1.6873	40.26%
E	6	1.6873 - 1.8641	17.79%

En la Gráfica 5, se presenta el histograma de los rangos (categoría) comparado con el área de movimientos en masa y en la Tabla 21 se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada categoría.



Gráfica 5. Categoría de Kc vs área de movimientos en masa

Tabla 21. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de Kc

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
A	Muy alta
B	Alta

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	61

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja

Densidad de drenaje (DDr)

Definición

La densidad de drenaje está relacionada con las características geocológicas de la zona del área de captación. Los factores que controlan la densidad de drenaje son la litología, la permeabilidad del suelo, la capacidad de infiltración, la cobertura y tipo de la misma³. La densidad de drenaje constituye un indicador del potencial de erosividad intrínseco a la zona de estudio.

Corresponde la relación de la sumatoria de longitud de drenaje total por área de captación sobre el área de captación.

Generalmente toma valores entre 0.5 para áreas de captación con drenaje pobre y alcanza valores de hasta 3 para áreas de captación con redes de drenaje muy desarrolladas⁴.

Importancia del tema

La densidad de drenaje indica la producción de agua y sedimentos en el área de captación, lo cual señala que a mayor densidad de drenaje mayor es la posibilidad de evacuación de agua del área de captación, y menor es la Susceptibilidad a movimientos en masa.

Para el caso particular del proyecto, se encontró que los mayores movimientos en masa se presentan en las áreas de captación con densidad de drenaje en el rango de 0.67 y 0.75 y disminuyen los movimientos en masa para los rangos menores, como para los mayores.

³ UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA, 2009. Curso "Manejo integrado de cuencas hidrográficas". Departamento de geografía, Facultad de ciencias. Uruguay.

⁴ DAL-RE TENREIRO, R y otros. (2003). Pequeños embalses de uso agrícola. Mundi-pensa. Madrid.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	62

Forma de obtención

Para calcular la densidad de drenaje, se emplea la siguiente expresión:

$$DD = \frac{LD}{ACAPTACION} \left(\frac{km}{km^2} \right)$$

Dónde:

LD = Longitud total de las corrientes

ACAPTACION= Área del área de captación

DD = Densidad de drenaje

En el Diagrama 6, se presenta el procedimiento para obtener el mapa de susceptibilidad por densidad de drenaje (Ver Anexo, Mapa de susceptibilidad por Densidad de Drenajes).

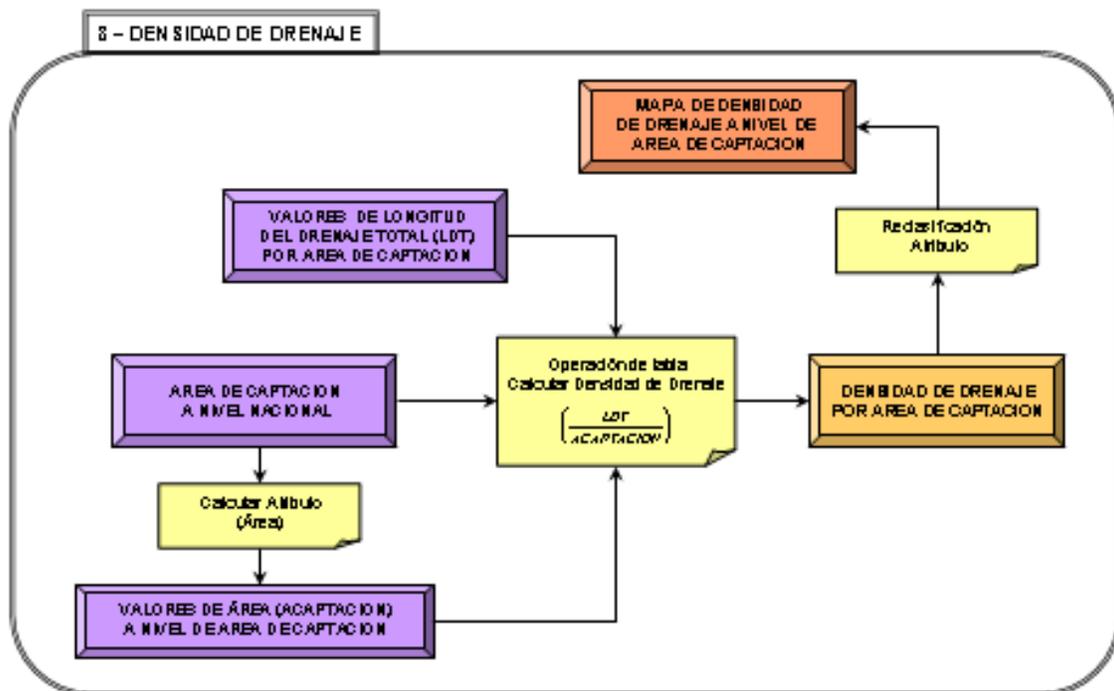


Diagrama 6. Procedimiento cartográfico para obtener mapa de susceptibilidad por densidad de drenaje

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Forma de empleo

A partir del procedimiento descrito, se obtuvo el mapa de susceptibilidad por densidad de drenaje, que es una variable continua, con dominio entre 0.186 y 1.304, con el fin de facilitar la parametrización de la variable y definir el rango para cada categoría, se realizó el cruce con el inventario de procesos y mediante la herramienta de ArcGIS, se determinaron los rangos por diferentes métodos de clasificación estadística, como natural breaks, cuantiles, geometrical y equal interval.

La distribución que presentó mejores resultados es cuantiles, donde inicialmente se dividió la densidad de drenajes en 9 categorías para la zona de estudio, estos rangos se reagruparon en 5 categorías a las que se les determinó la cantidad de movimientos en masa (ver Tabla 23).

Tabla 22. Rangos de DD propuestos inicialmente

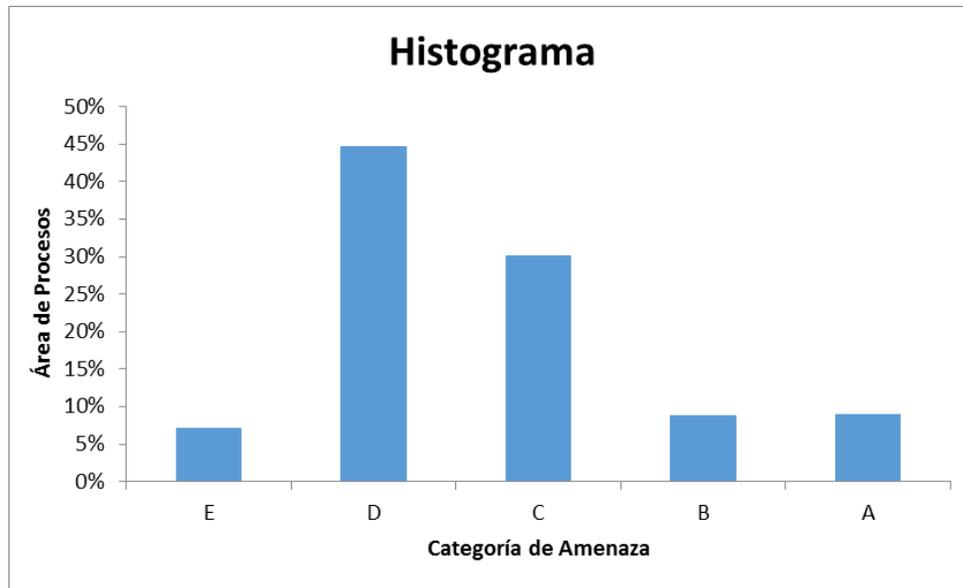
CATEGORIA	RANGOS DE DD
1	0.1852 -0.4186
2	0.4186 -0.5331
3	0.5331 -0.5947
4	0.5947 -0.6431
5	0.6431 -0.674
6	0.674 -0.7488
7	0.7488 -0.8677
8	0.8677 -1.0042
9	1.0042 -1.3035

Tabla 23. Reagrupación de Rangos de DD y área de movimientos en masa para la zona de estudio

CATEGORIA FINAL	CATEGORIA	RANGOS DE DD	ÁREA DE MOVIMIENTOS EN MASA
A	8 y 9	0.8677 - 1.3035	9.08%
B	7	0.7488 - 0.8677	8.83%
C	5 y 6	0.6431 - 0.7488	30.24%
D	3 y 4	0.5331 - 0.6431	44.74%
E	1 y 2	0.1852 - 0.5331	7.12%

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	64

En la Gráfica 6, se presenta el histograma de los rangos (categorías) comparado con el área de movimientos en masa y en la Tabla 24 se presenta la calificación en términos de susceptibilidad para cada categoría para la zona de estudio.



Gráfica 6. Categoría de DD vs área de movimientos en masa

Tabla 24. Calificación de susceptibilidad para cada categoría de DD

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
A	Muy alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja

GEOMORFOLOGÍA

Definición

El relieve terrestre va evolucionando en la dinámica del ciclo geográfico mediante una serie de procesos constructivos y destructivos que se ven permanentemente afectados por la fuerza de gravedad que actúa como equilibradora de los

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

desniveles; es decir, hace que las zonas elevadas tiendan a caer y colmar las zonas deprimidas. Estos procesos hacen que el relieve transite por diferentes etapas. Los desencadenantes de los procesos pueden categorizarse en cuatro grandes grupos:

- Factores geográficos: El relieve se ve afectado tanto por factores bióticos como abióticos, de los cuales se consideran propiamente geográficos aquellos abióticos de origen exógeno, tales como el relieve, el suelo, el clima y los cuerpos de agua. El clima con sus elementos tales como la presión, la temperatura, los vientos. El agua superficial con la acción de la escorrentía, la acción fluvial y marina. Los hielos con el modelado glacial, entre otros. Son factores que ayudan al modelado, favoreciendo los procesos erosivos.
- Factores bióticos: El efecto de los factores bióticos sobre el relieve suele oponerse a los procesos del modelado, especialmente considerando la vegetación.
- Factores geológicos: tales como la tectónica, el diastrofismo, la orogénesis y el vulcanismo, son procesos constructivos y de origen endógeno que se oponen al modelado e interrumpen el ciclo geográfico.
- Factores antrópicos: La acción del hombre sobre el relieve es muy variable, dependiendo de la actividad que se realice, en este sentido y como comúnmente pasa con el hombre es muy difícil generalizar, pudiendo incidir a favor o en contra de los procesos erosivos.

Importancia del tema

La importancia de los procesos, radica en que son los encargados del modelado del relieve y adicionalmente se puede inferir que a mayor presencia de procesos la zona tiene mayor Susceptibilidad a presentar fenómenos de remoción de masa.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 66
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	-------------------

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Forma de obtención

Esta variable deriva de las características geológicas, morfológicas y la información obtenida en los reconocimientos de campo.

Al igual que morfogénesis, esta variable se deriva del mapa de sistemas morfogénicos, pero en este caso se tuvo en cuenta la presencia o no de procesos morfodinámicos que desencadenen procesos de remoción en masa y aumentan la Susceptibilidad potencial por movimientos en masa.

Forma de empleo

En los Mapas de unidades Geomorfológicas Regionales a escala 1:25000 se delimitan las unidades y elementos geomorfológicos del área regional de estudio, cuya descripción puede observarse en la Tabla 25.

Tabla 25 Unidades y Ambientes Geomorfológicos.

AMBIENTE	UNIDADES
Denudacional	Planicie (Dp):
	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción (Dco):
	Lomo denudado alto de longitud larga (Dideal):
	Sierra denudada(Dsd)
Fluvial y Lagunar	Lomo residual (DIres):
	Cono de deyección (Fcdy)
	<u>Cauce aluvial (Fca):</u>
	Terraza de acumulación Antigua (Ftas).
Estructural	Terraza de acumulación sub-reciente (Ftas).
	Sierra sinclinal (Sss).
	Sierra anticlinal (Ssan):
	Sierra homoclinal (Ssh):
	Escarpe de línea de falla (Slfe)
Glacial y Peligral	Plancha (Sp) :
	Sierra anticlinal glaciada (Gsag):
	Sierra sinclinal glaciada (Gssg):
	Sierra homoclinal glaciada (Gshg):
	Sierra Glaciada (Gsg):
	Laguna Glacial (Glg):
Antropogénico	Plano Glaciolacustrino (Gpgl):
	Explotación minera (Aemc):

En la Tabla 26, se presentan los pesos empleados para calificar la susceptibilidad a los movimientos en masa de los sistemas geomorfológicos. Esta calificación fue asignada utilizando el método por el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP) y

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	67

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

lógica difusa. Según esta calificación, el valor más cercano a 1 es el más susceptible a movimientos en masa, mientras los más cercanos a cero son lo opuesto. Para este estudio, los dos elementos con mayor Susceptibilidad son los de exploración minera y el escarpe de línea de falla.

Tabla 26 Calificación de Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas de la zona de Estudio

Elemento/Geoforma	Peso
Exploración Minera	0.142
Escarpe de Línea de Falla	0.110
Lomo Denudado Alto longitud larga	0.071
Sierra Glacial	0.070
Sierra Denudada	0.065
Plancha	0.060
Sierra Sinclinal	0.059
Sierra Anticlinal	0.053
Sierra Homoclinal	0.053
Prominencia de Morfología Colinada	0.045
Sierra Anticlinal Glaciada	0.043
Lomo Residual	0.042
Sierra Simétrica	0.041
Cauce Aluvial	0.025
Conos y Lubulos Coluviales	0.022
Terraza de Acumulación Antigua	0.022
Terraza de Acumulación	0.021
Cono de Deyección	0.018
Plano Glacial Lacustino	0.015
Lagunas Glaciales	0.012
Planicie	0.010

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	68

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

2.2.5 GEOLOGÍA



Figura 13. Capa del Tema Geología

2.2.5.1 Definición

La geología se basa en el mapa de geología de detalle de la zona regional de los municipios de Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachetá, el cual contiene de manera integral la información sobre las capas de formaciones superficiales, Unidades Geomorfológicas, Procesos Morfodinámicos (donde se incluyen los procesos antiguos, recientes y activos), procesos erosivos y zonas homogéneas.

2.2.5.2 Importancia del tema

Quizás es la base más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo de la zona de estudio. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la Susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzcan o no fenómenos de remoción en masa.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	69

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

2.2.5.3 Forma de obtención

El mapa geológico fue construido a partir del análisis de la información preliminar, el cual fue afinado a la escala de trabajo, mediante reconocimiento de campo e interpretación de sensores remotos.

Durante el estudio, se llevó a cabo el levantamiento cartográfico regional de las unidades rocosas aflorantes en el área de la presente investigación, al igual que los elementos geomorfológicos, a escala de detalle (1:25000) y su caracterización correspondiente.

Desde el punto de vista metodológico, para la caracterización de los materiales geológicos, se efectuó un reconocimiento al área de estudio, mediante la realización de controles de campo en diferentes puntos o afloramientos de los materiales rocosos, para su correspondiente observación y/o descripción de las características litológicas, estructurales y demás aspectos correspondientes a la investigación temática.

Con el fin de obtener la mayor información sobre las características geológico-geotécnicas de los materiales rocosos del área de estudio como son, características litológicas, distribución de los niveles rocosos y suelos, espesores de los diferentes niveles, etc., se realizaron investigaciones del subsuelo entre los cuales se tienen entre otros, sondeos manuales, sondeos mecánicos, apiques y líneas de refracción sísmica, distribuidas en diferentes puntos del área de investigación.

En la zona de estudio se distinguen materiales rocosos los cuales se clasificaron en unidad de suelo y unidad de roca. Los materiales clasificados como suelos, se dividen según su origen en: depósitos de origen aluvial (aluviales recientes y antiguos, conos de deyección y depósitos fluvio-torrenciales; de origen coluvial (depósitos de movimientos de remoción en masa antiguos y recientes, y flujos de detritos); de origen antrópico (rellenos ingenieriles), y suelos residuales y saprolitos.

Las unidades de roca, de acuerdo con sus características litológicas, de dureza o resistencia, condición de fracturamiento y grado de meteorización, se clasificaron en: rocas meteorizadas y rocas moderadamente meteorizadas.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	70

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

En la Tabla 27 se describen las unidades geológicas superficiales para la zona de estudio.

Tabla 27 Unidades geológicas superficiales.

Municipio	Edad	Unidad Geológica
Fómeque	Paleozoico	Capas Rojas de Chingaza
Medina, Fómeque	Paleozoico	Macizo de Quetame
Medina, Gama, Gachalá, Ubalá	Paleozoico	Grupo Farallones
Gachalá, Ubalá	Mesozoico	Grupo Batá
Junín, Gachetá, Fómeque y Medina	Mesozoico	Formación Chipaque
Gachetá, Ubalá, Medina	Mesozoico	Formación arenisca de las Juntas
Gachalá, Ubalá	Mesozoico	Calizas del Guavio
Junín, Gachetá, Gama, Ubalá, Fómeque, Medina	Mesozoico	Formación Fómeque
Gama, Gachalá, Ubalá, Medina	Mesozoico	Formación Lutitas de Macanal
Junín, Gachetá, Ubalá, Fómeque, Medina	Mesozoico	Formación Une
Junín, Gachetá, Gama, Gachalá, Ubalá, Medina	Mesozoico	Formación Caqueza
Fómeque	Mesozoico	Formación Caqueza
Guasca, Junín, Gachetá, Fómeque	Mesozoico	Formación Guadalupe inferior
Guasca, Junín, Gachetá	Mesozoico	Formación Guadalupe Superior
Guasca	Cenozoico	Depósitos antrópicos
Guasca, Gachetá, Gachalá, Fómeque, Medina	Cenozoico	Depósitos aluviales
Guasca, Junín, Gachetá, Gama, Gachalá, Ubalá	Cenozoico	Depósitos coluviales
Guasca	Cenozoico	Depósitos glaciales
Medina, Ubalá	Cenozoico	Terrazas aluviales
Medina, Ubalá	Cenozoico	Terrazas aluviales
Medina, Ubalá	Cenozoico	Terrazas aluviales
Medina, Ubalá	Cenozoico	Formación Corneta
Ubalá, Medina	Cenozoico	Formación areniscas del Limbo
Medina, Ubalá	Cenozoico	Formación caja
Guasca	Cenozoico	Formación Bogotá
Medina	Cenozoico	Grupo Humea
Guasca, Junín, Gachetá	Mesozoico	Formación Guaduas
Medina	Mesozoico	Grupo Palmichal
Ubalá, Medina	Cenozoico	Grupo Medina
Medina	Cenozoico	Formación Choopal
Guasca	Cenozoico	Formación Cacho
Medina	Cenozoico	Formación San Fernando

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	71

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Municipio	Edad	Unidad Geológica
Medina	Cenozoico	Formación Regadera

2.2.5.4 Forma de empleo

Este mapa se empleara como ejercicio propio para la elaboración del mapa de Susceptibilidad a los movimientos en masa, en la

Tabla 29 se presentan las calificaciones asignadas utilizando el método AHP, el cual utilizó el juicio de los expertos para asignar los diferentes pesos de importancia a cada unidad geológica dependiendo de su Susceptibilidad a los movimientos en masa. Las unidades que presentan mayor Susceptibilidad tienen un peso cercano a 1, mientras que las menos susceptibles y con mayor resistencia tienen un peso cercano a cero.

Tabla 28. Calificación de las unidades geológicas superficiales

Unidad Geológica Superficial	Pesos
Depósitos Coluviales	0.092
Depósitos Antrópicos	0.086
Depósitos Aluviales	0.080
Depósitos Glaciales	0.079
Terrazas Aluviales 1	0.060
Terrazas Aluviales 2	0.059
Terrazas Aluviales 3	0.059
Formación Corneta	0.041
Formación Bogotá	0.030
Formación Lutitas de Macanal	0.028
Formación Choopal	0.027
Formación Caja	0.025
Grupo Medina	0.024
Formación Chipaque	0.024
Formación Fómeque	0.024
Formación Guaduas	0.021
Grupo Humea	0.019
Formación Regadera	0.018
Formación San Fernando	0.018
Formación Areniscas del Limbo	0.017

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	72

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Unidad Geológica Superficial	Pesos
Formación Cacho	0.017
Grupo Palmichal	0.016
Grupo Farallones	0.016
Formación Guadalupe Inferior	0.016
Formación Une	0.015
Grupo Batá	0.013
Formación Caqueza 2	0.013
Capas Rojas de Chingaza	0.013
Formación Caqueza 1	0.012
Calizas del Guavio	0.012
Formación Guadalupe Superior	0.011
Formación Arenisca de las Juntas	0.010
Macizo de Quetame	0.006

La siguiente tabla muestra un resumen de las características de Susceptibilidad que presentan los diferentes depósitos en Colombia. Información que sirvió como apoyo para la asignación de los pesos de las unidades geológicas.

Tabla 29. Características de Susceptibilidad a movimientos en masa de los depósitos

Origen Mecanismo	Nombre de Depósito	Susceptibilidad
Aluvial	Depósito del cauce y llanuras aluviales	No se involucran en problemas de estabilidad de taludes y laderas
	Depósito de terrazas aluviales	De estos tipos de depósitos las terrazas sobre-elevadas se involucran con frecuencia en movimientos en masa.
	Depósitos de abanicos aluviales	Presentes en el fondo de muchos ríos; por lo general son depósitos retrabajados y muy susceptibles a inestabilidad en general y a socavación lateral.
Gravitacional	Depósitos coluviales	Se les considera los tipos de depósitos más inestables en taludes y laderas
Lacustre	Depósitos paludales	No se involucran en problemas de estabilidad de taludes y laderas
Glacial	Depósitos glaciales y glacio-fluviales	Estos tipos de depósito se involucran con frecuencia en movimientos en masa en las partes altas de las cordilleras.
Volcánico	Depósito de cenizas y lapilli	Cubren extensas zonas de la región cafetera y en muchos lugares están sobre-elevados. Son muy inestables.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	73
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

	Flujos volcanoclásticos	Se involucran frecuentemente procesos de inestabilidad, y son producto de explosiones volcánicas que arrastran gran cantidad de bloques formando depósitos de tipo lahar; en ocasiones se desarrollan abanicos extensos, ejemplo Glacis del Quindío.
Eólico	Depósitos eólicos (dunas)	Generalmente son susceptibles a la erosión, pueden estar afectados por tubificación.
Marino	Depósito de gravas y arenas, lodos ricos en materia orgánica	Son susceptibles a movimientos en masa en el caso que estén expuestos lo cual no es frecuente

(Fuente: Geocing S.A.S)

2.2.6 COBERTURA DEL SUELO

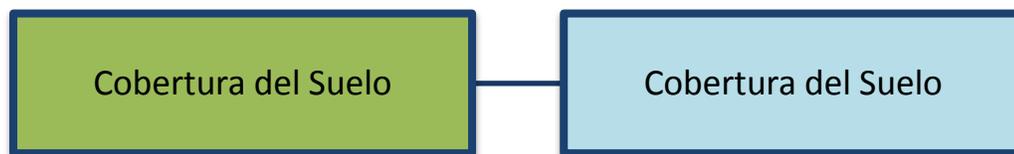


Figura 14. Capa del Tema Cobertura del Suelo

2.2.6.1 Definición

Para definir cobertura del suelo, se presentan algunas definiciones dadas por diferentes autores, como se presenta a continuación:

Autores como Burley (1961) describen el significado de la cobertura del suelo como la vegetación y las construcciones humanas que cubren la superficie de la Tierra (cuerpos de agua, herbazales, ciudades, entre otros), Gámez (1992) define la cobertura como un todo o una parte de algunos de los atributos de la tierra que, de cierta forma, ocupan una porción de su superficie ya que están localizados sobre esta. El IDEAM (1997) describe de manera puntual la cobertura como aquella unidad delimitable que surge a partir de un análisis de las respuestas espectrales determinadas por sus características fisonómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	74

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.2.6.2 *Importancia del tema*

Una idea sencilla y general de la razón de la cobertura del suelo podría ser: Es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve (en gran número de casos en forma negativa produciendo movimientos en masa, flujos, avalanchas, erosión).

La visión enunciada configura la relación e interdependencia de los recursos evaluados (incluyendo la cobertura y uso del suelo) para estimar una Susceptibilidad y susceptibilidad por movimientos en masa en cuya expresión se manifieste el efecto del hombre. Una evidencia permanente, tangible y evaluable es la ocurrencia de movimientos en masa donde la cobertura de la tierra siempre ha estado implicada.

El tipo, la densidad, la capacidad de interceptación de agua lluvia y el área de protección de cobertura vegetal constituye un factor de resistencia o favorecimiento de procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos en masa. En áreas de alta pendiente y de coberturas vegetales de ciclos biológicos muy lentos y frágiles, toda intervención de estas, hace que se aumente la Susceptibilidad.

Finalmente, la importancia de evaluar la cobertura del suelo es zonificar la misma con atributos que reflejen el grado o calificación en la Susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25000 en la zona de estudio del proyecto.

2.2.6.3 *Forma de obtención*

La generación de esta variable se realizó con base en información primaria y secundaria recopilada de los siguientes documentos y recursos:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	75

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

- Plan de Ordenamiento Territorial (POT)
- Reconocimiento y levantamiento de campo realizado por el consultor.
- Imágenes satelitales
- Aerofotografías

2.2.6.4 Coberturas Existentes

Con el fin de deducir el comportamiento de la cobertura en un determinado paisaje geomorfológico, se calificó en términos de Susceptibilidad de cada una (ver

Tabla 30), teniendo en cuenta que una cobertura es menos susceptible cuando se encuentra un tejido urbano que cuando se encuentra en una vegetación secundaria alta.

En la

Tabla 30 se presenta el área que cubre cada una de las coberturas establecidas, y la calificación asignada producto del método de estimación por el análisis de procesos jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés).

Tabla 30. Coberturas zona de estudio

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Símbolo
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo				1.1.1
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo				1.1.2
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales				1.2.1
		1.2.2. Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	1.2.2.1. Red vial y territorios asociados			1.2.2.1
		1.2.5. Obras hidráulicas				1.2.5
	1.3. Zonas de extracción mineras y	1.3.1. Zonas de extracción minera				1.3.1

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	76

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Símbolo	
	escombreras						
	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	1.4.1.1. Otras zonas verdes urbanas			1.4.1.1	
			1.4.1.2. Parques cementerio			1.4.1.2	
			1.4.1.5. Parques urbanos			1.4.1.5	
		1.4.2. Instalaciones recreativas	1.4.2.1. Áreas culturales			1.4.2.1	
			1.4.2.2. Áreas deportivas			1.4.2.2	
			1.4.2.3. Áreas turísticas			1.4.2.3	
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.1. Cultivos transitorios	2.1.1. Otros cultivos transitorios				2.1.1	
		2.1.2. Cereales	2.1.2.2. Maíz			2.1.2.2	
		2.1.5. Tubérculos	2.1.5.1. Papa			2.1.5.1	
	2.2. Cultivos permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos				2.2.1.1
			2.2.1.2. Caña	2.2.1.2.2 Caña Panelera			2.2.1.2.2
		2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	2.2.2.2. Café			2.2.2.2	
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos					2.2.3
			2.2.3.3. Cítricos				2.2.3.3
	2.2.5. Cultivos confinados					2.2.5	
	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios				2.3.1	

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	77
Fecha: 01/04/2015					

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Símbolo	
		2.3.2. Pastos arbolados				2.3.2	
		2.3.3. Pastos enmalezados				2.3.3	
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos				2.4.1	
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos				2.4.2	
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales				2.4.3	
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales				2.4.4	
		2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales				2.4.5	
3. BOSQUES Y AREAS SEMI NATURALES	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque Denso	3.1.1.1. Bosque Denso Alto	3.1.1.1.1. Bosque Denso Alto de Tierra Firme		3.1.1.1.1	
		3.1.2. Bosque Abierto	3.1.2.1. Bosque Abierto Alto	3.1.2.1.1. Bosque Abierto Alto de Tierra Firme		3.1.2.1.1	
			3.1.2.2. Bosque Abierto Bajo	3.1.2.2.1. Bosque Abierto Bajo de Tierra Firme		3.1.2.2.1	
		3.1.3. Bosque fragmentado	3.1.3.1. Bosques fragmentados con pastos y cultivos				3.1.3.1
			3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria				3.1.3.2
		3.1.4. Bosque de galería y ripario					3.1.4
		3.1.5. Plantación forestal					3.1.5

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	78
Fecha: 01/04/2015					

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Símbolo	
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazales	3.2.1.1. Herbazal Denso	3.2.1.1.1. Herbazales Densos de tierra firme	3.2.1.1.1.1. Herbazal Densos de Tierra Firme no arbolado	3.2.1.1.1.1	
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	3.2.3.1. Vegetación Secundaria Alta				3.2.3.1
			3.2.3.2. Vegetación Secundaria Baja				
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1. Zonas arenosas naturales					3.3.1
		3.3.2. Afloramientos rocosos					3.3.2
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas					3.3.3
4. AREAS HUMEDAS	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Zonas Pantanosas				4.1.1	
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos				5.1.1	
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales				5.1.2	
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales				5.1.4	

2.2.6.5 Forma de empleo

Con el método AHP utiliza una matriz que permite comparar las unidades por pares frente a la calificación final de susceptibilidad. Este método arroja el peso de importancia de acuerdo a la susceptibilidad de cada cobertura según el juicio de expertos (vector de pesos producto de la matriz de comparación por pares). De acuerdo a esta clasificación, el menor valor de estabilidad es el que tiene calificación de 1 en Susceptibilidad y el que tiene mayor valor de estabilidad es el que tiene calificación de 0 en Susceptibilidad.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	79

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 31. Calificación de Susceptibilidad de las coberturas del suelo de la zona de estudio

Tipo de Cobertura	Peso
Zonas de extracción minera	0.085
Tierras desnudas y degradadas	0.078
Zonas pantanosas	0.050
Zonas arenosas naturales	0.046
Red vial y territorios asociados	0.043
Cultivos transitorios Tubérculos Papa	0.040
Tejido urbano discontinuo	0.034
Cultivos permanentes arbustivos Café	0.030
Otros cultivos permanentes herbáceos	0.029
Otros cultivos transitorios	0.029
Cultivos transitorios Cereales Maíz	0.029
Cultivos permanentes herbáceos Caña panelera	0.027
Mosaico de pastos y cultivos	0.026
Cultivos confinados	0.025
Obras hidráulicas	0.025
Pastos limpios	0.024
Zonas industriales y comerciales	0.021
Mosaico de cultivos	0.020
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.020
Bosque de galería y ripario	0.020
Otras zonas verdes urbanas	0.019
Mosaico de cultivos con espacios naturales	0.019
Tejido urbano continuo	0.018
Parques urbanos	0.018
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.018
Pastos enmalezados	0.018
Parques cementerios	0.015
Áreas turísticas	0.015
Pastos arbolados	0.015
Cultivos permanentes arbóreos Cítricos	0.015
Cultivos permanentes arbóreos	0.013
Vegetación secundaria baja	0.013
Áreas deportivas	0.012
Herbazal Densos de Tierra Firme no arbolado	0.011

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	80

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tipo de Cobertura	Peso
Áreas culturales	0.011
Vegetación secundaria alta Conservación	0.011
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	0.009
Bosques fragmentados con pastos y cultivos	0.009
Bosques Plantación forestal	0.007
Bosque Abierto Bajo de Tierra Firme	0.007
Bosque Abierto Alto de Tierra Firme	0.007
Bosque Denso Alto de Tierra Firme	0.006
Afloramientos rocosos	0.005
Ríos	0.003
Lagos, lagunas y ciénagas naturales	0.003
Cuerpos de agua artificiales	0.003

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	81

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.2.7 GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Una vez definidas las variables que se van a utilizar, se continúa con la generación del mapa de Susceptibilidad. Este proceso se realizará mediante el método estadístico de la regresión logística. Para más información sobre el método de la regresión logística ir a la sección 2.1.3.

Los primeros modelos que se formularon para la creación del mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa incluían todas las variables expuestas en las secciones anteriores (2.2.4, 2.2.5 y 2.2.6), pero el ajuste al modelo logístico no fue muy bueno, por lo que los coeficientes generados no lograron reflejar los eventos ocurridos y mucho menos lograron predecir la probabilidad de ocurrencia de los eventos futuros. Por esta razón se reevaluaron las variables iniciales con las que se empezó a plantear el modelo.

Como el método exige que las variables explicativas deban ser independientes entre sí, se eliminaron algunas variables de las consideradas en las secciones anteriores porque presentan cierto grado de dependencia. Estas variables corresponden a curvatura, índice de relieve relativo y densidad de drenaje. Los nuevos modelos creados presentaron una mejoría significativa en cuanto al ajuste del modelo y la predicción de los eventos en la zona de estudio. Esta mejora se debe a que las variables dependientes estaban generando sobre dispersión en los datos, y por ende se producía un mal ajuste a la función logística y coeficientes sesgados.

2.2.7.1 SELECCIÓN DE VARIABLES

Para la selección de las variables de entrada en los modelos Backward y Forward (ver sección 2.1.3.1), se contrastan los modelos hipotéticos que se crean mediante la función *anova*, al indicarle que realizara un test de χ^2 (Heinze, 2014). Con esta indicación la función *anova* arroja la comparación entre los dos modelos indicando cual es el más sencillo y cuál es el que contiene más variables. En ella se observa el valor de χ^2 , los grados de libertad y el valor del p-value. Se aceptó la hipótesis de mantener una variable dentro del modelo cuando el p-value obtenido en cada paso era menor al factor de significancia ($\alpha=0.05$).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	82

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

En las siguientes tablas se muestra el valor del p-value que presenta el modelo al agregar o eliminar una variable dada por medio del programa *R*.

Tabla 32. Test de Anova Modelo Forward generado por *R*

Paso	Variable añadida	p-value
0	Modelo inicial	
1	Pendiente	0
2	Longitud de Flujo	0
3	Geología	0
4	Forma del área de captación	1.26E-8

Tabla 33. Test de Anova Modelo Backward generado por *R*

Paso	Variable eliminada	p-value
0	Modelo inicial con todas las variables	
1	Geomorfología	1
2	Cobertura del Suelo	0.0923

Las anteriores tablas muestran como todas las decisiones de agregar (Tabla 32) o eliminar (Tabla 33) variables se tomaron con base del valor del p-value. Para el primer caso el p-value siempre estuvo por debajo de 0.05 y para el segundo caso el p-value se mantuvo por encima de 0.05. Ahora bien, los modelos generados por el método backward y forward de *R* no siempre dan los mismos resultados, pero en este caso ambos coincidieron al no incluir o eliminar a las variables de cobertura del suelo y geomorfología, lo cual indica un grado más de confiabilidad en los resultados obtenidos.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	83
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

2.2.7.2 COEFICIENTES DEL MODELO

En esta sección se utilizó el test de test de χ^2 para evaluar los contrastes entre coeficientes. Como se explicó anteriormente, la función *logistf* arroja las estimaciones del estadístico, significancia del test e intervalos de confianza para cada coeficiente del modelo.

A continuación, se presenta el ajuste de la distribución logística de Firth realizada con R, los coeficientes obtenidos y su análisis estadístico.

Tabla 34. Modelo Ajustado con la regresión logística de Firth

Variable	Coeficiente	Error Estándar	Intervalo de Confianza		Z	p-value
			2.5%	97.5		
Intercepto	3.274	2.180	-0.938	7.735	2.281	1.31E-1
Pendiente	1.168	0.049	1.077	1.273	Inf	0
Geología	-28.475	5.398	-39.302	-17.964	28.771	8.15E-8
Forma área captación	-9.301	1.542	-12.506	-6.373	49.686	1.80E-12
Longitud de Flujo	0.006	0.0004	0.0058	0.0075	inf	0
Test de Máxima Verosimilitud = 47474.16 gdl= 4 p=0 n=38575						
Test de Wald = 611.58 gdl= 4 p= 0						

Como se puede observar en la Tabla 34, todos los coeficientes del modelo resultaron estadísticamente significativos porque ninguno de los intervalos de confianza contenía el valor de 1. Así mismo, los coeficientes resultaron significativos para este test debido a que presentaron un p-value menor al factor de significancia (0.05), ya que esto significa que sus valores son significativamente distintos de cero con un grado de confianza del 95% (Salazar, 2012-2013).

Las variables geología, forma del área de captación y pendiente son las que presentan los coeficientes en valor absoluto más grandes y por lo tanto son las que se encuentran más fuertemente asociadas con la presencia o ausencia de los movimientos en masa. La geología y forma de área de captación presentan una

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	84

correlación negativa con la estabilidad de la zona, puesto a que el signo de su coeficiente es negativo.

Al terminar el modelo con un número de variables inferior a las variables planteadas inicialmente (ver Figura 8), se sigue el principio de parsimonia en donde un modelo simple es el que mejor se ajusta a los datos y el que genera la mejor predicción.

2.2.8 BONDAD DE AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Una vez obtenidos los coeficientes de las variables que componen el modelo (ver Tabla 34), se generó la proyección de la Susceptibilidad por movimientos en masa para toda el área de estudio (ver Ilustración 1). Ver Anexo 1 Planos, SUSCEPTIBILIDAD, SUSCEPTIBILIDAD_GENERAL, GE333-CPG-PSIG-SU-001-00)

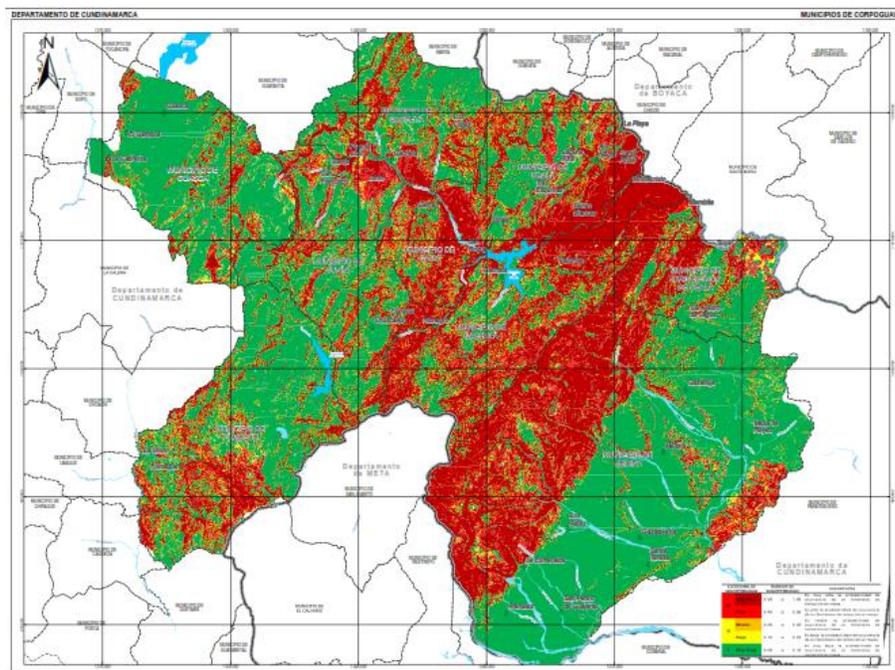


Ilustración 1. Mapa de Susceptibilidad Regional de Corpoguvio

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	85

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

La generación del mapa de susceptibilidad es producto de una serie de pruebas de ensayo y error. Se parte de la creación del modelo con los datos iniciales (Figura 8) y paso a paso se comienzan a depurar los datos y hacer ensayos con el fin de mejorar el ajuste del modelo logístico a los datos. Los datos se van refinando en cuanto a que se deben escoger los que mejor representen los procesos morfodinámicos que se desean modelar, eliminar los que puedan estar introduciendo información errónea y confusa al modelo. Para el estudio se crearon alrededor de 110 ensayos (mapas) hasta que se generó el mapa que presentaba el mejor ajuste y resultados después de su validación.

El modelo propuesto para la susceptibilidad de la zona de estudio a movimientos en masa puede predecir la ocurrencia de futuros movimientos en masa bajo el supuesto de que van a ocurrir bajo las mismas condiciones que los causaron en el pasado. Este supuesto en cierto grado genera una limitación en el modelo, ya que los movimientos en masa y su cantidad dependen de condiciones ambientales que cambian con el tiempo. Los cambios en las condiciones ambientales no solo son producto de la naturaleza sino también de las acciones del hombre, las cuales de igual forma son altamente variables. Pese a estas limitaciones, resulta razonable asumir que las predicciones en el área de estudio son buenas debido a que por lo general los movimientos en masa futuros ocurrirán bajo las mismas circunstancias y bajo las mismas condiciones que los desencadenaron en primer lugar.

Para la evaluación de la bondad de ajuste del modelo se utilizó la metodología propuesta por Guzzetti (2005), la cual recomienda realizar la comparación entre el modelo de susceptibilidad y el inventario de movimientos en masa producto del mapa de procesos morfodinámicos (Inventario utilizado para la generación del modelo el cual de ahora en adelante será nombrado Inventario 1⁵). Se comprobó que el modelo estadístico logra explicar correctamente en un 74% la ocurrencia de los movimientos en masa en la zona de estudio. Para el 26% restante el modelo proporciona un ajuste inadecuado, lo que conlleva a que no coincida con los datos que se encuentran en el Inventario 1.

⁵ Para información más detallada acerca del inventario de procesos y el mapa de procesos por fenómenos de remoción en masa ver el Volumen B. Regional, Tomo II Geología y Geomorfología.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	86

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

La Tabla 35 y Tabla 36 corresponden a tablas de concordancia para determinar el grado de asociación de los datos y la bondad de ajuste del modelo estadístico del mapa de susceptibilidad (índice de Kappa).

Tabla 35. Comparación entre las áreas (m²) clasificadas como estables o inestables por el modelo estadístico y el inventario de procesos producto del mapa de procesos morfodinámicos (Inventario 1)

		Procesos Pronosticados	
		Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)
Procesos Existentes	Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	17080258207	55288
	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)	10671527625	29779638634

Tabla 36. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de Susceptibilidad y el inventario de procesos producto del mapa de procesos morfodinámicos (Inventario 1)

		Procesos Pronosticados		Total del Margen
		Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)	
Procesos Existentes	Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	0.297	0.000001	0.297
	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)	0.185	0.518	0.703
Total de la Margen		0.482	0.518	1

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	87
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

A partir de los datos de la Tabla 36 se procede a calcular el índice de Kappa de Cohen, con la siguiente expresión:

$$\kappa = \frac{P_C - P_E}{1 - P_C}$$

P_C es la proporción de unidades que fueron correctamente clasificadas como estables o inestables en la tabla de concordancia.

$$P_C = 0.297 + 0.518 = 0.815$$

P_E es la proporción de unidades clasificadas al azar y se calcula siguiendo el procedimiento mostrado a continuación:

$$P(\text{Inestable}) = 0.518 \times 0.703 = 0.36$$

$$P(\text{Estable}) = 0.482 \times 0.297 = 0.14$$

$$P_E = P(\text{Inestable}) + P(\text{Estable}) = 0.36 + 0.14 = 0.51$$

El índice de Kappa de Cohen obtenido para la comparación es de $\kappa=0.62$, el cual representa una concordancia considerable entre los eventos existentes del inventario de procesos con el que se generó (Inventario 1) y los eventos pronosticados por el modelo estadístico (bondad de ajuste del modelo). Las celdas coloreadas en verde y rojo indican el área que efectivamente fue pronosticada como estable siendo estable, y la que fue clasificada como inestable siendo inestable en los eventos existentes respectivamente.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	88

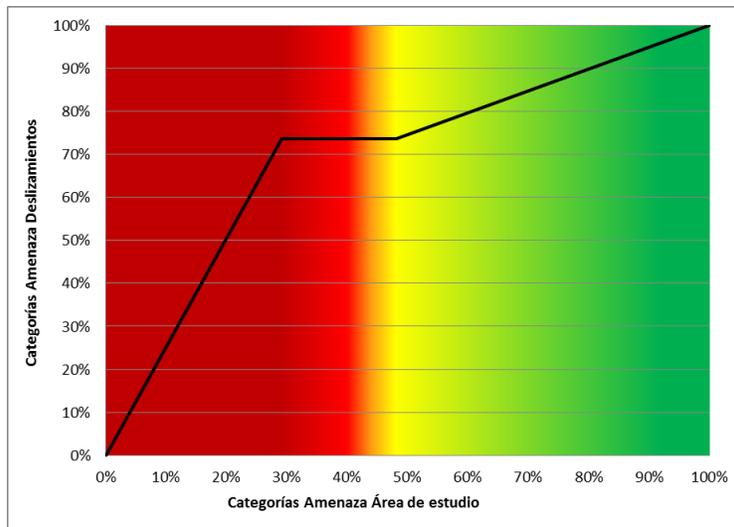


Figura 15. Análisis de la bondad de ajuste del mapa de susceptibilidad. En el eje x se presenta el porcentaje acumulado del área de estudio clasificado en la categoría de ocurrencia de los procesos de remoción en masa, la susceptibilidad disminuye de izquierda (susceptibilidad casi segura-rojo oscuro) a derecha (improbable – verde). En el eje y se encuentra el porcentaje acumulado del área de los procesos clasificados en las categorías de ocurrencia de los procesos de remoción en masa

La Figura 15 muestra el porcentaje del área de estudio clasificado con una susceptibilidad de improbable a casi seguro en contra del porcentaje del área acumulado de los procesos clasificados en las categorías de susceptibilidad. El 10% del área de estudio con la categoría más alta de susceptibilidad cubre el 20% del área total de los deslizamientos. La Figura 15 también muestra que el 29% del área de estudio con una susceptibilidad alta cubre el 73.6% del área total de los deslizamientos. Por otro lado, el 50% del área de los deslizamientos entra dentro del 20% del área de estudio con una categoría de susceptibilidad casi segura (probabilidad > 0.9). Finalmente, el 12% del área total de los deslizamientos del inventario de procesos se encuentran en áreas clasificadas con una susceptibilidad de improbable.

Para evaluar la validez del modelo, la metodología de Guzzetti (2005) propone comparar el mapa de susceptibilidad con un inventario de movimientos en masa que no se haya utilizado para generar el modelo ya que de esta forma se califica su forma de hacer pronósticos. Para fines del estudio, se contrastó el modelo con el inventario de procesos del consorcio producto de visitas a campo en la zona de

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

estudio (ver Tabla 37 y Tabla 38), el cual de ahora en adelante se nombrará como Inventario 2⁶.

El mapa de susceptibilidad clasifica correctamente 126 (79%) de los 159 eventos recolectados. De los 126 eventos clasificados correctamente por el modelo, 87 fueron clasificados como estables y 39 fueron clasificados como inestables. De los 33 eventos que fueron clasificados incorrectamente todos fueron categorizados como estables.

Tabla 37. Comparación entre los eventos clasificados como estables o inestables por el modelo estadístico y el Inventario 2.

		Procesos Pronosticados	
		Eventos Estables (Sin movimientos de masa)	Eventos Inestables (Movimientos de Masa)
Procesos Existentes	Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	87	0
	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)	33	39

Tabla 38. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de Susceptibilidad y los eventos del Inventario 2.

⁶ Para información más detallada acerca del inventario de procesos y el mapa de procesos por fenómenos de remoción en masa ver el Volumen B. Regional, Tomo II Geología y Geomorfología.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	90

		Procesos Pronosticados		Total del Margen
		Eventos Estables (Sin movimientos de masa)	Eventos Inestables (Movimientos de Masa)	
Procesos Existentes	Eventos Estables (Sin movimientos de masa)	0.547	0.0	0.547
	Eventos Inestables (Movimientos de Masa)	0.208	0.245	0.453
Total de la Margen		0.755	0.245	1

Para la validación también se utilizó el método del índice Kappa de Cohen debido a que permite medir la confiabilidad en términos de la clasificación de los eventos entre el mapa de susceptibilidad y el inventario de eventos producto de las visitas a campo (Inventario 2). Los resultados de la concordancia entre los mapas arrojan un kappa = 0.56, el cual indica que posee una fuerza de concordancia moderada según lo indicado en la Tabla 5.

La Figura 16 muestra que el 10% del área con categoría de susceptibilidad más alta contiene el 15% del área del inventario de procesos. Adicionalmente, el 29% del área de estudio contiene el 39% del área total del inventario de procesos (Inventario 2). Esta gráfica muestra un estimativo cuantitativo de la capacidad de predicción del modelo. La Figura 16 muestra que la bondad de ajuste del modelo es mayor que la capacidad de predicción del modelo, tal y como Guzzetti (2005) comenta que es el comportamiento normal para este tipo de análisis.

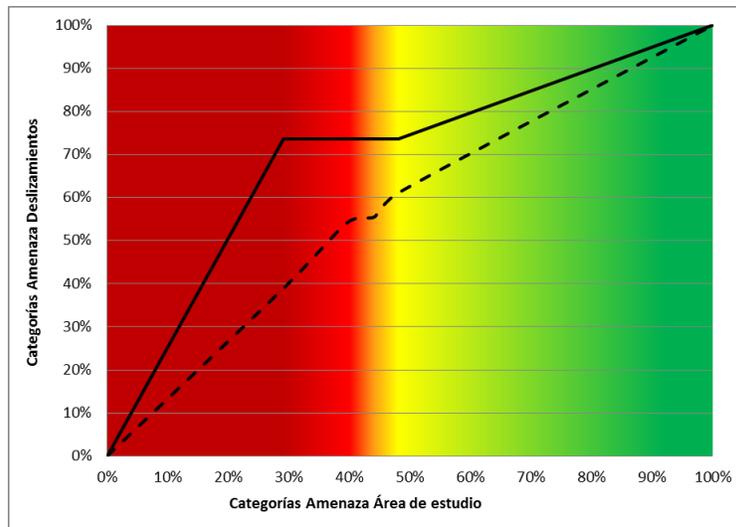


Figura 16. Análisis de la capacidad de predicción del mapa de susceptibilidad. En el eje x se presenta el porcentaje acumulado del área de estudio clasificado las categoría de ocurrencia de los deslizamientos, la susceptibilidad disminuye de izquierda (susceptibilidad casi seguro-rojo oscuro) a derecha (improbable – verde). En el eje y se encuentra el porcentaje acumulado del área de los procesos clasificados en las categorías de ocurrencia de los procesos de remoción en masa. La línea punteada indica los procesos del Inventario 2. La línea continua muestra la bondad de ajuste del modelo (Figura 15).

2.2.9 SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO RESPECTO AL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

En la Tabla 39 se muestran las estadísticas de la distribución del área de cada municipio dentro de cada categoría de susceptibilidad. Se puede observar que los municipios que presentan mayor área con una susceptibilidad muy alta son Gachalá, Gama y Ubalá. El municipio de Guasca es el que presenta menor porcentaje de área dentro de las categorías de muy alta y alta, adicionalmente, tiene la mayor área dentro de la categoría de muy baja.

Tabla 39. Distribución del área de cada municipio en las categorías de susceptibilidad según la clasificación del mapa de susceptibilidad.

Municipio	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Área Total (%)
Fómeque	58%	5%	6%	12%	18%	100
Gachalá	27%	4%	5%	13%	51%	100
Gachetá	55%	5%	6%	12%	23%	100

	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	  
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Municipio	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Área Total (%)
Gama	25%	5%	7%	18%	46%	100
Guasca	75%	4%	4%	8%	8%	100
Junín	55%	5%	6%	13%	21%	100
Medina	58%	3%	3%	8%	29%	100
Ubalá	38%	4%	5%	12%	41%	100

Por otro lado, la Tabla 40 muestra las estadísticas de la distribución del área de cada casco municipal dentro de cada categoría de susceptibilidad. De acuerdo a la clasificación de las áreas por el mapa de susceptibilidad, Junín es el casco municipal que presenta la susceptibilidad más alta de todo el grupo debido a que el 69% de su área se encuentra categorizada con una susceptibilidad alta. Al contrario de Junín, Guasca y Medina contienen toda su área categorizada con una susceptibilidad muy baja.

Tabla 40. Distribución del área de cada cabecera municipal en las categorías de susceptibilidad según la clasificación del mapa de susceptibilidad.

Casco Municipal	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Área Total (%)
Fómeque	80%	4%	4%	8%	4%	100
Gachalá	92%	2%	1%	3%	1%	100
Gachetá	68%	7%	6%	10%	9%	100
Gama	94%	5%	1%	0%	0%	100
Guasca	100%	0%	0%	0%	0%	100
Junín	2%	3%	23%	69%	3%	100
Medina	100%	0%	0%	0%	0%	100
Ubalá	84%	3%	4%	4%	6%	100

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	93

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

3. AMENAZA REGIONAL POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

3.1 MARCO DE REFERENCIA AMENAZA REGIONAL

3.1.1 Los Fenómenos de Remoción en Masa

Los movimientos en masa (deslizamientos, caída de bloques y flujos), junto con la erosión, hacen parte de los procesos naturales de denudación de la corteza terrestre y como tales no se consideran susceptibles de total manejo, pero el riesgo que pueden generar si puede ser eventualmente evitable.

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido. En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido de agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un “flujo” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Según (González G., 1990); las diversas magnitudes de estas causas provocan el fenómeno con niveles variables de amenaza, dependientes de la susceptibilidad al fenómeno de los materiales in-situ y de la energía potencial gravitatoria de las masas susceptibles en relación al lugar de interés. La susceptibilidad está controlada por factores intrínsecos (materiales, topografía, estado de esfuerzos, condiciones de drenaje, cobertura vegetal, etc.) mientras que las causas o eventos detonantes pueden considerarse externos (lluvias, sismos, excavaciones, socavación, obras, etc.); por otra parte, la energía potencial está controlada tanto por propiedades internas (el índice de fragilidad, la deformabilidad, la resistencia residual y el volumen de la masa), como propiedades externas (la altura de posición y la posible trayectoria desde el deslizamiento hasta el punto amenazado). La influencia y efectos en la estabilidad de ladera de los factores

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	94

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

intrínsecos (o condicionantes) y detonantes (o desencadenantes) se presentan en la Tabla 41.

Tabla 41. Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y las laderas (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Factores		Influencias y efectos
Intrínsecos	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición y textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional.	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisotrópico. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales.	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones de poros.
	Deforestación	Modificación del balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Detonantes	Precipitación y aportes de agua	Variación de las presiones de poros y del peso del terreno. Saturación de suelos (o cambios en la succión en suelos parcialmente saturados). Erosión
	Cambio en las condiciones hidrogeológicas.	
	Aplicación de cargas dinámicas (sismos) o estáticas (sobrecargas).	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado de esfuerzos de la ladera. Incremento de presiones de poros.
	Cambios morfológicos y de geometría de las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado de esfuerzos.
	Erosión o socavación de la pata del talud.	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado de esfuerzos de la ladera.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	95

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Factores		Influencias y efectos
	Acciones climáticas (heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Los efectos más importantes que pueden causar un deslizamiento pueden describirse así (Mora, 1990):

- Daños en la ladera, desde pequeños desplazamientos y subsidencias, pasando por agrietamientos y movimientos hasta fenómenos de destrucción total en la zona.
- Generación de aludes, con desarrollo de altas tasas de energía cinética y el consiguiente alto poder destructivo de los elementos que se encuentren a su paso.
- Obstrucción de corrientes, con la generación de represamientos y embalses de permanencia variable, capaces de producir avalanchas mayores al liberarse.

Entonces, dado los efectos del deslizamiento se debe evaluar la resistencia de los elementos expuestos (edificaciones, infraestructura, vidas humanas, etc.) ante las diferentes solicitudes que dependerán de la magnitud del fenómeno como de la posición relativa ante el elemento expuesto.

Una vez conocida tanto la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento como las consecuencias de los diferentes elementos expuestos por el deslizamiento, se puede determinar el riesgo. En forma esquemática, en la Figura 17 se presenta un diagrama de flujo para la evaluación del riesgo por deslizamientos.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	96

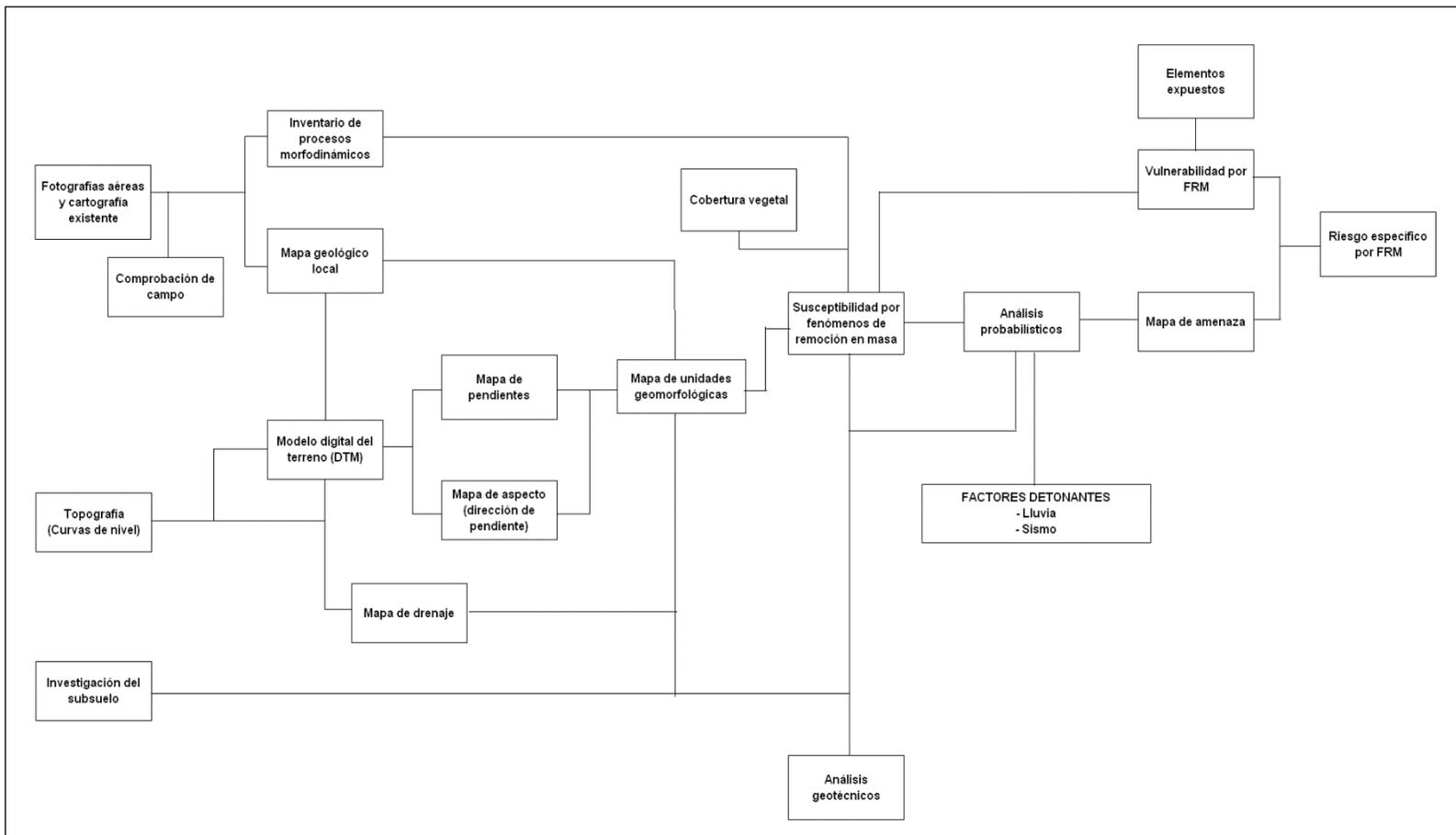


Figura 17. Diagrama de flujo para la evaluación de riesgos por deslizamientos

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	97
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

3.1.2 Análisis de Estabilidad de Taludes

Con los objetivos de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales, la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales y la elaboración del plano de amenaza a los deslizamientos, se realiza la modelación matemática de los taludes. Para su desarrollo, se realiza el análisis de equilibrio límite porque se puede implementar con facilidad y permite la combinación del análisis con técnicas probabilísticas (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b).

Esta metodología establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de falla. Siguiendo este orden de ideas, se interpreta que la masa del terreno por encima de la línea se desplaza respecto a la masa inferior lo que genera la rotura del terreno. En el momento en que se produce la falla, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento se encuentra desplazada y el terreno se encuentra por completo en un equilibrio estático (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b).

Mediante el análisis de equilibrio límite se obtiene un número de factor de seguridad (FS) el cual expresa las condiciones de estabilidad de lo actuante sobre lo resistente. Esto se considera una ventaja debido a que esta variable se emplea para conocer el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones. Este análisis consiste en determinar la existencia de una resistencia en el suelo del talud que sea suficiente para soportar los esfuerzos cortantes que tienden a causar la falla o deslizamiento. Así mismo, este método permite analizar superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc., de 2 y 3 dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b).

3.1.2.1 Método del Talud Infinito

Se denomina talud infinito al material inestable que posee una capa de espesor constante y pequeña respecto a la altura del talud, y así mismo, se supone que presenta una continuidad infinita lateralmente (ver Figura 18). En estas condiciones, la mayoría de la masa del talud se mueve aproximadamente en

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p> <p>Versión 3</p> <p>Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO</p> <p>JAP</p>	<p>REVISÓ</p> <p>HBC</p>	<p>AVALÓ</p> <p>FSS</p>	<p>APROBO</p> <p>UT-PGR</p>	<p>Pág.</p> <p>98</p>
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	-----------------------

forma paralela a la superficie topográfica. Esta inestabilidad se da generalmente en materiales muy poco o nada cohesivos y se encuentra dada por algún movimiento geológico como una capa de roca (Santoso, Phoon, Asce, & Quek, 2009).

El método del talud infinito supone que cualquier tamaño de la columna de suelo es representativo de todo el largo del talud con una capa delgada de suelo. Adicionalmente, el método supone un suelo isotrópico y homogéneo (Ozelim, Cavalcante, Pacheco de Assis, & Ribeiro, 2013).

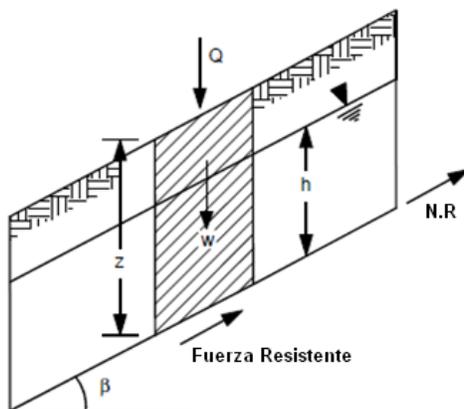


Figura 18. Talud Infinito, donde z= altura de la masa deslizante (m), h= altura del agua subterránea durante el movimiento (m), β = ángulo de inclinación con la horizontal (**grados**), γ = peso suelo específico del suelo (KN/m³), Φ = ángulo de fricción (grados), C= cohesión (KN/m²), Q= sobrecarga (KN/m²). N.R= Nivel de Referencia. Tomado de (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b)

Para el método, los efectos de borde son despreciables y el factor de seguridad se puede calcular a partir de la unidad de área con base en el criterio Mohr-Coulomb. Esto se debe a que el mecanismo de falla no es muy profundo y el talud es uniforme y relativamente largo (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b).

$$F.S = \frac{c + (\gamma_s z_w - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \Phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

Donde

c , cohesión del suelo (KN/m³)

γ_s , peso unitario total del suelo (KN/m³)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	99

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

γ_w , peso específico del agua (KN/m³)

h, espesor del estrato (m)

z_w , nivel freático (m)

β , pendiente del talud (°)

ϕ' , ángulo de fricción (°)

- **Cohesión de las raíces**

Como factor intrínseco adicional se consideró el efecto de la vegetación el cual no se incluye en la definición del factor de seguridad mostrada. La vegetación interpreta un rol muy importante dentro de la estabilidad de taludes debido a que las raíces refuerzan a estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades ya que estabilizan los arcos del suelo que se extienden a través del talud (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b). Por lo tanto, el efecto de la vegetación se incluye como una fuerza de cohesión adicional dentro del factor de seguridad. Existen ejemplos ilustrativos que enseñan como el efecto de la vegetación aumenta el factor de seguridad (Rickson & Morgan, 2005). Dependiendo de la clase de vegetación y de la profundidad del tipo de falla el efecto que tendrá la cohesión aportada por las raíces sobre el factor de seguridad será o no de mayor magnitud. Los valores de la cohesión debido a las raíces se encuentran en un rango de 6 a 23 kPa en bosques industriales, mientras que varían entre 25 a 94 kPa en bosques naturales (Schmidt, Roering, Stock, Dietrich, Montgomery, & Shaub, 2001).

Factores Detonantes

A continuación se relacionan los modos o forma de incorporación de los factores intrínsecos y detonantes en los análisis de estabilidad.

Factores		Modos de incorporación en los análisis
Intrínsecos	Relieve (pendiente, geometría)	Definición de la geometría de las secciones de análisis.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	100

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Factores		Modos de incorporación en los análisis
	Litología (composición y textura)	Formulación modelo geológico.
	Estructura geológica y estado	Formulación modelo geológico y modelo geológico - geotécnico.
	Propiedades geomecánicas de los materiales.	Definición de propiedades esfuerzo-deformación de los materiales especificados en los modelos de análisis.
	Deforestación	Condiciones actuales que definen las características de infiltración y por ende la respuesta hidrogeológica del subsuelo.
	Meteorización	Presenta relación con las propiedades de resistencia de los materiales y por ende en su definición.
Detonantes	Precipitación y aportes de agua	Definición de las condiciones de flujo en el subsuelo.
	Cambio en las condiciones hidrogeológicas.	Definición de niveles de agua para los análisis.
	Aplicación de cargas dinámicas (sismos) o estáticas (sobrecargas).	Incorporación de cargas sísmicas y sobrecargas por edificaciones o tráfico.
	Cambios morfológicos y de geometría de las laderas	Perfilado y adecuación de geometría de taludes en los diseños de la solución.
	Erosión o socavación de la pata del talud.	Evaluación de escenarios con cambio de perfiles por efectos de socavación cuando se presente.
	Acciones climáticas (heladas, sequías)	Estos efectos no son preponderantes para las condiciones locales, por lo tanto no fueron tenidos en cuenta en los análisis.

- **Sismo**

Como uno de los factores detonantes principales se consideró el sismo, para lo cual se desarrolló en el TOMO IV. SISMOLOGIA Y USOS DEL SUELO, el cual se encuentra en el Volumen B. REGIONAL del estudio. Dentro del tomo se evaluó la amenaza sísmica de la zona de estudio mediante el enfoque de análisis probabilístico, el cual involucró la teoría de los valores extremos y el uso de las ecuaciones de atenuación Donovan 1, Donovan 2 y MacGuire. Los resultados se analizaron para múltiples periodos de retorno, y se observó que se comportan como una distribución exponencial y tienen valores similares a los registrados por la NSR-10.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	101

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Por lo tanto, se va a considerar el coeficiente de aceleración horizontal (K_h) para que la ecuación del talud infinito incluya las fuerzas pseudoestáticas horizontales producto de un evento sísmico, mientras que asume que las fuerzas verticales son iguales a cero.

- **Lluvia**

Con el objetivo de simular diferentes escenarios de amenaza y observar el impacto que tiene la fluctuación del nivel freático sobre el modelo (tomado como el factor detonante principal), se realizaron diferentes simulaciones variando la altura del nivel freático. Esta recreación de múltiples situaciones que se pudieran presentar permitió visualizar el impacto que tiene la incertidumbre implícita del modelo. Se construyeron los siguientes 5 escenarios:

- Alto: el nivel freático es igual a la altura o espesor del talud.
- Medio Alto: el nivel freático es igual a tres cuartos veces la altura o espesor del talud.
- Medio: el nivel freático es igual a la mitad de la altura o espesor del talud.
- Medio Bajo: el nivel freático es igual a un cuarto de la altura o espesor del talud.
- Bajo: el nivel freático es igual a cero.

Al añadir las dos primeras variables, se garantiza que el factor de seguridad considere la actividad sísmica y la cohesión de las raíces de la zona. Al añadir la tercera variable, se permite el planteamiento de escenarios de acuerdo a los niveles de agua planteados. La expresión matemática, que de ahora en adelante, se nombrará como ecuación del talud infinito modificada se muestra a continuación:

$$F.S = \frac{\frac{c'}{\cos\beta} + h \cdot \tan\Phi' \cdot \gamma_s(\cos\beta - K_h \cdot \sin\beta - R_u \cdot \cos\beta)}{\gamma_s \cdot h(\sin\beta + K_h \cdot \cos\beta)}$$

Donde

$c' = c + c_R$, cohesión total (KN/m³)

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 102
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$R_U = \frac{\gamma_w * z_w}{\gamma_s * h}$, parámetro de la presión de poros

c_R , cohesión de las raíces (KN/m³)

K_h , coeficiente de la aceleración horizontal

Parámetros de Análisis del Talud Infinito

Para poder realizar el análisis se requiere conocer los siguientes parámetros:

- **Altura de la masa deslizante h (m)**
Es la altura o espesor del talud medido desde el nivel de referencia hasta el nivel de terreno.
- **Altura del agua subterránea medida durante el movimiento z_w (m)**
Se define como la altura del nivel freático desde el nivel de referencia hasta el nivel de terreno.
- **Ángulo de inclinación con la horizontal β (grados)**
Corresponde al ángulo de inclinación del talud con respecto al plano horizontal o pendiente del talud.
- **Peso específico del suelo γ (KN/m³)**
El peso específico del suelo es el peso húmedo por encima del nivel freático y saturado por debajo de este nivel.
- **Ángulo de fricción Φ (grados)**
El ángulo de fricción es la representación del coeficiente de rozamiento que actúa de forma tangente a la superficie de falla. El ángulo depende de varios factores de cada tipo de suelo, entre los cuales se encuentran tamaño, forma, distribución y densidad de los granos como los más importantes (Suarez, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Capítulo 3. Esfuerzo y Resistencia al Cortante, 1998).
- **Cohesión del suelo C(KN/m²)**
La cohesión es una medida de adherencia entre las partículas de suelo que se utiliza para representar la resistencia al corte (Suarez,

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	103

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Capítulo 3. Esfuerzo y Resistencia al Cortante, 1998).

- Cohesión de las raíces C_R (KN/m²)

Se refiere al aumento de la cohesión del suelo por medio de las raíces de las plantas o cultivos. El tamaño y el espesor que pueden alcanzar las raíces dependen del tipo de plantas o cultivos que se encuentren en el suelo. Las raíces le proporcionan al suelo una mayor resistencia al corte mediante tres maneras: la primera, por medio de las estructuras complejas que crean con el suelo, la segunda, por medio de la adhesión entre las partículas del suelo con las raíces y la tercera mediante la unión de los materiales de suelos inestables a mantos más estables (Jimeno, y otros, 1999). Por ejemplo, varios estudios demuestran que las raíces de los árboles proporcionan una alta cohesión al suelo (Schmidt, Roering, Stock, Dietrich, Montgomery, & Shaub, 2001). Por otro lado, se han determinado valores experimentales de la cohesión que proporcionan al suelo los diferentes tipos de árboles, plantas y cultivos. De igual forma se obtuvieron intervalos para estos valores, pero son únicamente de uso ilustrativo (Jimeno, y otros, 1999).

- Coeficiente de aceleración horizontal K_h

El coeficiente de aceleración horizontal representa las fuerzas horizontales producto de un evento sísmico y estas fuerzas se asumen que son proporcionales al peso de la masa de deslizamiento potencial. Con el fin de ser conservadores se asume que el coeficiente sísmico, k_h , es igual a la máxima aceleración pico esperada de un evento sísmico en la zona de estudio (Suarez Díaz, Deslizamientos., 2009b).

3.1.3 Método Probabilístico de Análisis de Estabilidad de Taludes

Si se asume que algunas de las anteriores variables son aleatorias (con su respectiva distribución de probabilidad) se pueden considerar como independientes y por lo tanto su convolución (según el modelo de falla) determina la distribución de probabilidad del Factor de Seguridad (FS). Para resolver el cálculo del factor de seguridad existe el método de Montecarlo el cual da como resultados los primeros dos momentos estadísticos (valores esperado - μ_{FS} -, y la

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	104

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

varianza – σ^2_{FS} -) de la distribución del Factor de Seguridad y la probabilidad de falla o de ocurrencia del evento.

3.1.3.1 Simulación de Montecarlo

La simulación de Montecarlo es un método que permite considerar todas las posibles combinaciones, interrelaciones y escenarios que puedan existir en una situación de estudio. La simulación incluye la distribución de probabilidad de las variables críticas de estudio y de esta forma tiene la capacidad de generar un histograma que refleja la proyección y medición de la incertidumbre (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

El objetivo de la simulación es el de imitar las condiciones reales a partir de la utilización de un método matemático que permita analizar las propiedades y características de la situación estudiada, para así poder conocer los posibles resultados que sirven como base para la toma de decisiones (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

La simulación trabaja mediante la generación de números aleatorios capaces de generar una trayectoria estocástica en el espacio de las fases de modelo que se tiene en consideración (Feria Domínguez). En otras palabras, esta metodología realiza una simulación de forma reiterativa de los procesos aleatorios que gobiernan el factor de seguridad de la ecuación del talud infinito modificada. Cada simulación proporciona un posible valor del factor de seguridad y si se toman esas simulaciones en un número lo suficientemente grande (10.000), la distribución de los valores del factor de seguridad convergerá hacia su verdadera distribución. Así mismo, se busca trabajar con el mayor número de iteraciones con el fin de que los resultados sean válidos porque se aproximan de la mejor manera a la población y su error de muestreo es el menor posible (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

Para su implementación se deben realizar los siguientes pasos (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012):

1. Construcción del modelo en condiciones de certidumbre plena
2. Identificación de las variables
3. Definición de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias
4. Realizar la simulación
5. Análisis de resultados

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 105
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

El primer paso y segundo paso se desarrollaron en la sección anterior (3.1.2.1), donde se planteó la ecuación de talud infinito modificada como el modelo que se quiere evaluar y las variables que influyen en la valoración. En estas etapas no se consideraron incertidumbres lo que también se conoce como el planteamiento del modelo en condiciones de certidumbre plena (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

Una vez se han establecido las variables críticas, se incorpora la incertidumbre en la evaluación del modelo matemático. Esta inclusión se realiza con la definición de la distribución de probabilidad para cada variable crítica, las cuales describen de forma precisa el comportamiento de dichas variables. Para el caso de la simulación de Montecarlo, se generan números de manera aleatoria de acuerdo con las distribuciones previamente establecidas, las cuales reflejan los rangos de valores en los que podrían caer las variables de interés, sin que se conozca con exactitud el valor final que pueda llegar a tener (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012).

3.1.3.2 Definición de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias

El ángulo de inclinación con la horizontal o pendiente es una variable aleatoria obtenida del modelo digital de elevación del terreno que se recategorizó en rangos que aumentaban de a 5 grados. Este paso se realizó con el objetivo de disminuir el número total de combinaciones que se generaban entre las variables dentro de la zona de estudio, por ende, se disminuyó el número de simulaciones de Montecarlo a realizar. La pendiente se distribuye triangularmente, ya que se pueden estimar sus valores mínimo, más probable y máximo. Debido a la re categorización que se realizó, los valores del mínimo y máximo son los mismos, y el mínimo se encuentra a una diferencia de 5 grados del máximo (ver Tabla 42).

El coeficiente de la aceleración horizontal se distribuye según la familia exponencial perteneciente a la distribución Pareto generalizada (ver Tabla 42). Esta distribución modela los máximos anuales de las aceleraciones horizontales provenientes del inventario histórico de sismos para Colombia. Un análisis más detallado sobre el cálculo y la distribución del coeficiente de aceleración horizontal se encuentra en el Volumen B. REGIONAL. TOMO IV. SISMOLOGIA Y USOS DEL SUELO.

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p>	<p>ELABORO</p>	<p>REVISÓ</p>	<p>AVALÓ</p>	<p>APROBO</p>	<p>Pág.</p>
<p>Versión 3 Fecha: 01/04/2015</p>	<p>JAP</p>	<p>HBC</p>	<p>FSS</p>	<p>UT-PGR</p>	<p>106</p>

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

De acuerdo al análisis y definición de las características del suelo de la zona de estudio realizado por los especialistas en geología y geotécnica del proyecto, se identificaron 33 unidades geológicas⁷ definidas para la geología regional. Para fines de este estudio, se le asignó a cada unidad geológica unas variables intrínsecas numéricas de altura (espesor del suelo), peso específico del suelo, ángulo de fricción y cohesión, los cuales son producto de ensayos de laboratorio, visitas de campo y consultas bibliográficas (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Las variables intrínsecas pueden tomar valores distintos dependiendo de la pendiente del talud, ya que esta define si se presenta una estratificación de suelo o una porción de suelo residual sobre una estratificación rocosa. Las variables de cohesión y el ángulo de fricción serán tomadas como aleatorias por ser consideradas críticas para el modelo matemático y su comportamiento sigue una distribución uniforme y triangular respectivamente, cuyos parámetros se exponen en la Tabla 43. Por otro lado, las variables de altura y peso específico del suelo serán consideradas como variables estáticas o constantes y sus valores también se muestran en la Tabla 43.

El mapa de cobertura y uso del suelo se trabajó de forma similar a lo realizado con el mapa de geología. Es decir, a cada cobertura se le asignó una valoración de acuerdo a lo planteado en las metodologías de Hang Chok (2008), Schmidt y otros (2001), Jimeno y otros (1999), y lo observado por el especialista forestal de la consultoría durante las visitas de campo y a cada cobertura se le asignó un rango representativo de la cohesión de las raíces que le correspondía.

La distribución uniforme describe la cohesión de las raíces, ya que se considera una variable aleatoria en la que cualquier ocurrencia tiene la misma probabilidad dentro de los límites inferior y superior establecidos en la Tabla 44. Se aplica la distribución uniforme porque la incertidumbre de las variables es muy alta debido a que los valores de la cohesión de las raíces son difíciles de obtener y su variación con el tiempo es lenta y compleja de determinar.

⁷ Para más información sobre la descripción de las unidades geológicas ver la sección “Estudio Geológico y Geomorfológico Regional”.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 107
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

La Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44 enseñan las distribuciones de probabilidad que mejor se adaptan a cada una de las variables aleatorias de la ecuación de talud infinito modificada.

Tabla 42. Distribuciones de Probabilidad y parámetros de las variables aleatorias (pendiente, cohesión de las raíces y coeficiente de aceleración horizontal) de la ecuación de talud infinito modificada

Variable		Distribución	Parámetros
Pendiente	β (grados)	Triangular	Min= Max - 5° Promedio=Max
Coeficiente de aceleración horizontal	Kh	Exponencial	Lambda

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	108

 <p>Consorcio J & G</p>	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

Tabla 43. Valores de los parámetros de las variables aleatorias de las unidades geológicas

Unidades Geológicas	Espesor del suelo (m)	Peso específico del suelo γ (KN/m ³)	Ángulo de fricción Φ (grados)		Cohesión C(KN/m ²)	
	Valor	Valor	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Capas Rojas de Chingaza	4	20	28	34	10	15
Macizo de Quetame	4	20	28	34	5	10
Grupo Farallones	4	20	28	34	5	10
Grupo Batá	4	19	26	32	10	15
Formación Chipaque	5	19	24	32	10	15
Formación Arenisca de las Juntas	5	19	26	32	5	15
Calizas del Guavio	5	19	26	32	5	10
Formación Fómeque	5	19	24	32	5	15
Formación Lutitas de Macanal	5	19	24	30	5	15
Formación Une	5	19	26	34	5	15
Formación Caqueza 1	5	19	24	32	5	15
Formación Caqueza 2	5	19	26	34	5	15
Formación Guadalupe Inferior	5	19	28	34	10	15
Formación Guadalupe Superior	5	18	26	33	10	15
Depósitos Antrópicos	4	17	25	32	0	5
Depósitos Aluviales	5	17	30	34	0	5
Depósitos Coluviales	5	17	22	30	0	5
Depósitos Glaciales	5	18	26	32	5	10
Terrazas Aluviales 1	6	18	30	34	0	5

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	109
Fecha: 01/04/2015					

 <p>Consorcio J & G</p>	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

Unidades Geológicas	Espesor del suelo (m)	Peso específico del suelo γ (KN/m ³)	Ángulo de fricción Φ (grados)		Cohesión C(KN/m ²)	
	Valor	Valor	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Terrazas Aluviales 2	6	18	32	36	0	10
Terrazas Aluviales 3	6	18	34	38	0	10
Formación Areniscas del Limbo	5	18	27	34	5	10
Formación Caja	5	18	24	30	5	10
Formación Bogotá	5	18	25	32	10	15
Grupo Humea	5	18	25	32	10	15
Formación Guaduas	5	18	22	30	5	10
Grupo Palmichal	5	18	24	30	5	10
Grupo Medina	5	18	24	30	5	15
Formación Choopal	5	18	28	32	10	15
Formación Cacho	5	18	24	32	5	15
Formación San Fernando	5	18	24	32	5	15
Formación Regadera	5	18	24	30	5	15
Capas Rojas de Chingaza	4	20	28	34	10	15

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	110
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 44. Valores de los parámetros de la distribución uniforme de las variables aleatorias de las coberturas del suelo (tomado de Hang Chok (2008), Schmidt y otros (2001), Jimeno y otros (1999)).

Coberturas	Cohesión de las raíces CR (KN/m ²)	
	Min	Max
Tierras desnudas y degradadas	0	0
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5	15
Vegetación secundaria alta Conservación	5	15
Pastos limpios	1	5
Otros cultivos permanentes herbáceos	1	5
Otros cultivos transitorios	1	5
Lagos, lagunas y ciénagas naturales	1	5
Cuerpos de agua artificiales	0	0
Zonas pantanosas	1	5
Pastos enmalezados	1	5
Pastos arbolados	1	5
Bosque Denso Alto de Tierra Firme	20	30
Vegetación secundaria baja	5	10
Ríos	0	0
Herbazal Densos de Tierra Firme no arbolado	1	5
Mosaico de cultivos con espacios naturales	10	20
Mosaico de cultivos	1	5
Bosques fragmentados con pastos y cultivos	15	30
Zonas industriales y comerciales	0	0
Mosaico de pastos y cultivos	2	6
Bosque Abierto Alto de Tierra Firme	10	40
Bosque de galería y ripario	8	12
Cultivos confinados	1	5
Cultivos transitorios Cereales Maíz	1	5
Cultivos transitorios Tubérculos Papa	1	5
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	10	30
Zonas arenosas naturales	0	0
Zonas de extracción minera	0	0
Bosques Plantación forestal	25	35
Afloramientos rocosos	0	0
Bosque Abierto Bajo de Tierra Firme	20	40
Tejido urbano discontinuo	0	0

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO JAP	REVISÓ HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 111
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Coberturas	Cohesión de las raíces CR (KN/m ²)	
	Min	Max
Mosaico de pastos con espacios naturales	1	5
Cultivos permanentes herbáceos caña panelera	1	5
Tejido urbano continuo	0	0
Otras zonas verdes urbanas	1	5
Cultivos permanentes arbóreos Cítricos	1	5
Cultivos permanentes arbustivos Café	1	5
Obras hidráulicas	0	0
Cultivos permanentes arbóreos	1	10
Parques cementerios	1	5
Red vial y territorios asociados	0	0
Parques urbanos	1	5
Áreas deportivas	1	5
Áreas culturales	0	0
Áreas turísticas	1	5

Las anteriores tablas muestran como el modelo matemático del talud infinito modificado posee múltiples distribuciones interrelacionadas, lo que apoya la idea de que se deben realizar un número considerable de simulaciones (10.000) antes de obtener datos convergentes y consistentes.

3.1.4 Cálculo de la Amenaza

Para calcular el valor del factor de seguridad promedio para la zona, se realiza un análisis pixel a pixel de dimensiones 10x10 mediante los mapas de pendiente, geología, valor característico, cobertura y uso del suelo. Para este análisis, se realiza una combinatoria entre los mapas antes mencionados con el fin de identificar todas las posibles combinaciones entre los múltiples parámetros de los 4 mapas. Cada una de las combinaciones tendrá como resultado su propio factor de seguridad promedio, el cual se halla aplicando la fórmula antes mencionada de talud infinito modificada mediante la simulación de Montecarlo.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	112

El factor de seguridad promedio es la media del factor de seguridad que arroja el análisis probabilístico. Este valor corresponde al promedio de todos los factores de seguridad calculados para la combinación.

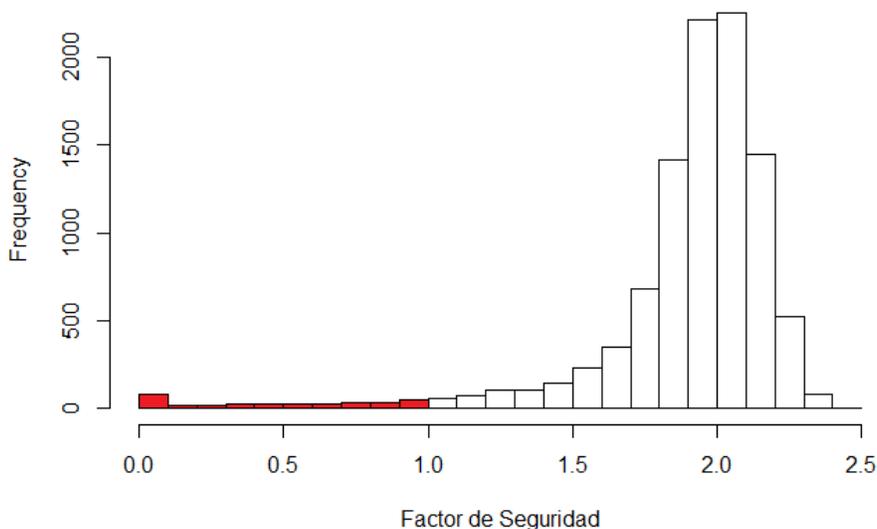


Figura 19. Histograma del Factor de Seguridad. La zona en rojo indica los análisis que obtuvieron un factor de seguridad igual o menor que 1.

La simulación de Montecarlo genera un histograma de los análisis realizados, el cual refleja la proyección de los datos, su tendencia, forma y dispersión tal y como se muestra en la Figura 19. De esta manera, la probabilidad de falla del talud (PF) se puede determinar puesto que el análisis probabilístico permite determinar la distribución de probabilidad del factor de seguridad.

La probabilidad de falla se define como el área bajo la curva de la distribución de probabilidad del factor de seguridad igual o menor que 1 (ver Figura 19 y Figura 20). En otras palabras, la probabilidad de falla es igual al número de análisis a los que les corresponde un factor de seguridad menor o igual a 1, el cual se encuentra dividido por el número total de análisis (simulaciones).

$$PF = \frac{\text{núm. } F.S \leq 1}{\text{núm. análisis}}$$

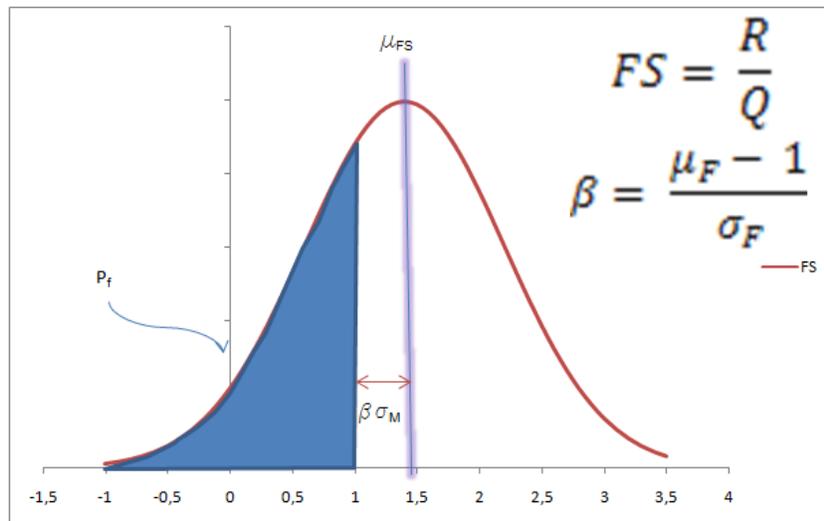


Figura 20. Distribución del factor de seguridad, probabilidad de falla, definición del factor seguridad e índice de confiabilidad.

3.1.5 Categorización de la Amenaza

La caracterización de la amenaza (probabilidad de falla) desde el punto de vista de ocurrencia del evento, depende del nivel de aceptabilidad que se desee, encontrándose en la literatura varias categorizaciones, entre las cuales se pueden mencionar las propuestas por Hungr (1997) y más recientemente por la AGS (2007). Teniendo en cuenta los criterios encontrados en la literatura, se propone para categorizar la amenaza por fenómenos de remoción en masa con la siguiente tabla:

Tabla 45. Categorización adoptada para la amenaza por fenómenos de remoción en masa

Categoría Amenaza	Probabilidad Relativa	Rango de Frecuencia (1/año)	Probabilidad de falla anual del fenómeno, $P(Dz)_1$	Significado
Alta (A)	Casi Seguro	>1/20	>5%	El fenómeno de remoción en masa puede ser inminente. Los eventos ocurrirían con un período de retorno menor a 20 años.

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Categoría Amenaza	Probabilidad Relativa	Rango de Frecuencia (1/año)	Probabilidad de falla anual del fenómeno, $P(Dz)_1$	Significado
	Probable	1/100 – 1/20	1% - 5%	<p>Debe esperarse que ocurra un fenómeno de remoción en masa dentro del tiempo de vida de una persona o de una estructura típica (períodos de retorno entre 20 y 100 años).</p>
Media (M)	Posible	1/225 – 1/100	0.44% - 1%	<p>La ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa durante el término de un tiempo de vida es poco probable, pero es posible que ocurra bajo condiciones adversas. Su límite inferior corresponde a una probabilidad de ocurrencia acumulada de 20% en un período de diseño de 50 años, que corresponde a la probabilidad de excedencia del sismo para una seguridad limitada en edificaciones según la NSR-2010.</p>
	Raro	1/475 – 1/225	0.21% - 0.44%	<p>El evento puede ocurrir siempre y cuando se presenten condiciones muy adversas. La probabilidad de ocurrencia acumulada del evento está entre el 10% y el 20% en un período de diseño de 50 años.</p>
Baja (B)	Improbable	<1/475	<0.21%	<p>El evento puede ser concebible pero únicamente bajo circunstancias excepcionales. Corresponde al límite de probabilidad de excedencia del sismo de diseño para edificaciones según la NSR-2010. La probabilidad de ocurrencia acumulada del evento es menor al 10% en un período de diseño de 50 años.</p>

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	115

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

3.2 GENERACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA REGIONAL

El mapa de amenaza regional se generó a partir de la fórmula del método de talud infinito, el cual se encuentra descrito más ampliamente en el numeral 3.1.2.1, para lo cual se creó una rutina de Montecarlo en el programa “*The R Project for Statistical Computing*”, y así poder obtener los resultados con 10.000 simulaciones para cada combinación.

Las combinaciones obtenidas fueron 73.316 posibles, que provienen de las variables manejadas por el análisis de Talud Infinito, esto conlleva a que se realicen 10.000 simulaciones por combinación, es decir que se ejecutarán alrededor de 733 millones de simulaciones en total y su resultado es un factor de seguridad promedio, desviación estándar y probabilidad de falla para cada escenario planteado.

Como se mencionó anteriormente, un escenario planteado requirió de alrededor de 733 millones de simulaciones, por lo tanto, los 5 escenarios demandaron un total de 3 mil millones de simulaciones.

El mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa divide un territorio basado en diferentes niveles de amenaza. La creación de un sólo mapa de amenaza resulta problemático debido a que diferentes condiciones de amenaza se deben mostrar en el mismo mapa, sin embargo, es un mapa que se debe realizar para representar un nivel de amenaza general para la zona de estudio. Para su realización y representación se definieron 2 variables: el factor de seguridad característico, FS^* y probabilidad de falla característica, PF^* ; las cuales se calculan mediante una ponderación de los diferentes factores de seguridad promedio y probabilidades de falla determinados en los diferentes escenarios planteados.

$$FS^* = \sum \overline{FS}_i \times P_i$$

$$PF^* = \sum \overline{PF}_i \times P_i$$

Donde

\overline{FS}_i , factor de seguridad promedio por escenario

\overline{PF}_i , probabilidad de falla por escenario

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	116
Fecha: 01/04/2015					

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

P_i , probabilidad de ocurrencia del escenario planteado

Tal y como se muestra anteriormente, la probabilidad de falla total, PF^* , se encuentra como una probabilidad de falla total combinada con cada uno de los escenarios planteados de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia.

De acuerdo al juicio de expertos de la consultoría, la Tabla 46 indica la probabilidad de ocurrencia que se le asigna a cada escenario para la ponderación de los valores característicos finales.

Tabla 46. Probabilidades de ocurrencia de los escenarios planteados para el factor detonante de agua.

Mapa	Escenario	Probabilidad de Ocurrencia, P (%)
A.	$zw = 0$	40
B.	$zw = 0.25 \text{ h}$	35
C.	$zw = 0.5 \text{ h}$	20
D.	$zw = 0.75 \text{ h}$	4
E.	$zw = \text{h}$	1

Una vez obtenidas las probabilidades de falla, se clasifican en las categorías de amenaza mostradas en la Tabla 45 y se asignan a cada combinación en el mapa. En otras palabras, se tomó la categoría de amenaza para cada tipo de combinatoria y se le asignó la clasificación correspondiente en el mapa, para así obtener el mapa de Amenaza por fenómenos de remoción en masa para el área de estudio (ver Ilustración 3).

3.3 VALIDACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA REGIONAL

La validación del modelo y mapa de amenaza para diferentes escenarios temporales resulta difícil, dado que requiere información sobre los procesos en diferentes periodos de tiempo, que hayan afectado el área de estudio después de que se haya realizado el análisis por la consultoría (SafeLand, 2011). Adicionalmente, para poder realizar una validación completa del área de estudio es esencial contar con una base de datos válida (inventario de procesos después del estudio) la cual se encuentre espacialmente distribuida por toda el área del proyecto. Ejemplos en la literatura muestran que son muy pocos los mapas de amenaza que han podido ser validados con datos recopilados después de la

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	117

evaluación, y por lo contrario, sólo presentan la validación del mapa de susceptibilidad.

Debido a que la ubicación de los futuros fenómenos por remoción en masa es incierta, no es posible comparar el mapa de amenaza con este tipo de datos (procesos futuros), por esta razón, una segunda opción para validar los datos es realizar la comparación con los datos históricos de los procesos. Esta comparación se realiza mediante la utilización de las tablas de concordancia, las cuales fueron empleadas en las secciones anteriores.

La Tabla 47 y Tabla 48 corresponden a tablas de concordancia para determinar el grado de asociación de los datos y la bondad de ajuste del modelo estadístico del mapa de amenaza regional.

A partir de los datos de la Tabla 48 se procede a calcular el índice de Kappa de Cohen, el cual tiene un valor de $\kappa=0.72$. Este índice representa un nivel de concordancia considerable entre los procesos existentes y los eventos pronosticados por el mapa de amenaza.

Tabla 47. Comparación entre las áreas (m²) clasificadas como estables o inestables por el mapa de amenaza y el inventario de procesos históricos de la consultoría

		Procesos Pronosticados	
		Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)
Procesos Existentes	Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	14078834	72834
	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)	4078246	11261257

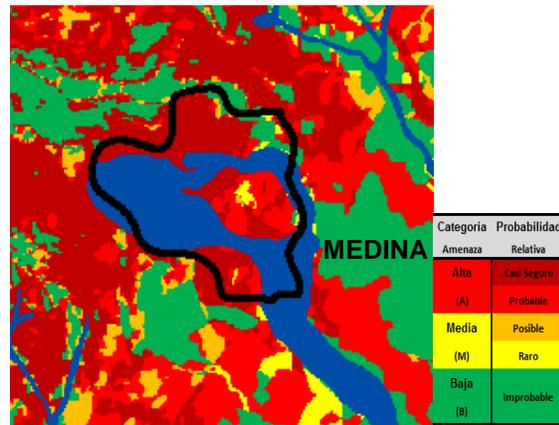
Tabla 48. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el mapa de amenaza y el inventario de procesos históricos de la consultoría

		Procesos Pronosticados		Total del Margen
		Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)	
Procesos Existentes	Unidades Estables (Sin movimientos de masa)	0.477	0.002	0.480
	Unidades Inestables (Movimientos de Masa)	0.138	0.382	0.520
Total de la Margen		0.616	0.384	1

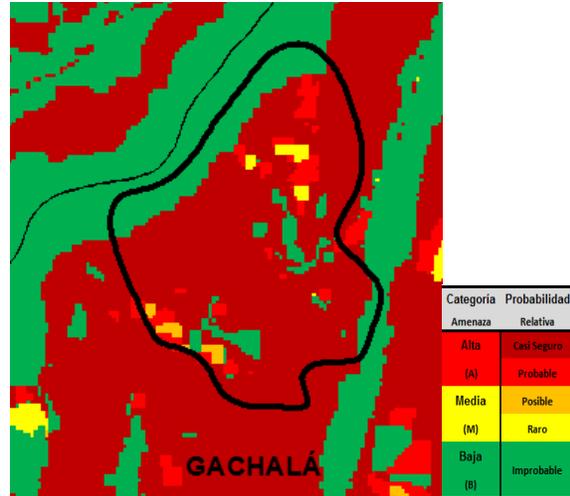
En la Figura 21, se muestran fotografías de 2 procesos, identificados por la consultoría, en forma detallada y la representación de su polígono en el mapa de amenaza.



A.



B.



C.

D.

Figura 21. A. Proceso identificado en la vereda Argentina municipio de Medina. B. Ubicación del proceso A en el mapa de amenaza regional C. Proceso identificado cerca de la cabecera de Palomas en el municipio de Gachalá B. Ubicación del proceso C en el mapa de amenaza regional

Como se puede observar en la Figura 21 B y D, el área de los polígonos de los procesos está en su mayoría clasificada en la categoría de amenaza Alta (Casi Seguro y Probable). Estas imágenes son un ejemplo visual de que los procesos están localizados en zonas altamente inestables, lo cual resulta congruente con el resultado del índice de Kappa de Cohen obtenido a partir de la tabla de concordancia.

Para evaluar la semejanza entre el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa y el mapa de susceptibilidad del mismo tipo de fenómeno, se realizó la comparación entre las áreas de las categorías utilizadas para la clasificación de los eventos.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	120
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 49. Comparación entre el área de las categorías del mapa de amenaza por movimientos en masa y el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

		Mapa Susceptibilidad	
		Área Total	Área Coincide (%)
Mapa Amenaza	1	1042696406	71%
	2	234086684	2%
	3	298920303	5%
	4	596236198	9%
	5	1442009004	48%
	total	3613948594	

A partir de la Tabla 49 se puede observar que las áreas de las categorías 1 (Improbable) y 5 (Casi Seguro) son las que coinciden en mayor porcentaje. Esto resulta importante porque las áreas de mayor interés son las que se encuentran clasificadas como casi seguro debido a que poseen una probabilidad de ocurrencia de un evento de movimiento en masa mayor al 5%. De igual forma, la categoría de amenaza improbable coincide en un 71% porque tienen una probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa muy bajo y son terrenos que se consideran estables con factores de seguridad promedio mayores a 1.5.

Adicionalmente, se utilizó el método del índice Kappa de Cohen, para medir la confiabilidad en términos de la clasificación de los eventos entre el mapa de amenaza y el mapa de susceptibilidad. Los resultados de la concordancia entre los mapas arrojan un kappa=0.29, el cual indica que posee una fuerza de concordancia aceptable según lo indicado en la Tabla 5. La tabla de concordancia utilizada se muestra en la Tabla 50.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	121

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 50. Comparación entre las proporciones de las áreas clasificadas como estables o inestables por el modelo de susceptibilidad y el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

		Procesos Pronosticados		Total del Margen
		Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	
Procesos Existentes	Áreas Estables (Sin movimientos de masa)	0.338	0.266	0.603
	Áreas Inestables (Movimientos de Masa)	0.098	0.298	0.397
Total de la Margen		0.436	0.564	1.000

Los análisis demuestran que los mapas de susceptibilidad y amenaza se encuentran relacionados aunque no sean exactamente iguales. Esta diferencia radica en que el mapa de susceptibilidad refleja la probabilidad de ocurrencia espacial de los movimientos en masa, mientras que el mapa de amenaza relaciona las variables de magnitud, temporalidad y ocurrencia espacial de los movimientos en masa. Adicionalmente, el mapa de amenaza tiende a clasificar muchas más áreas de la zona de estudio en categorías altas, debido a que toma en consideración los factores detonantes de lluvia y sismos. Los cambios en la frecuencia y en la intensidad de dichos factores no afectan la susceptibilidad, pero definitivamente si alteran la tasa de ocurrencia de los eventos como los movimientos en masa.

Siguiendo este orden de ideas, se plantearon diversos escenarios en los que se contempla el efecto de la presencia e intensidad de los factores detonantes. En la Ilustración 2 se presentan los mapas resultantes para cada escenario planteado (ver Tabla 51).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	122

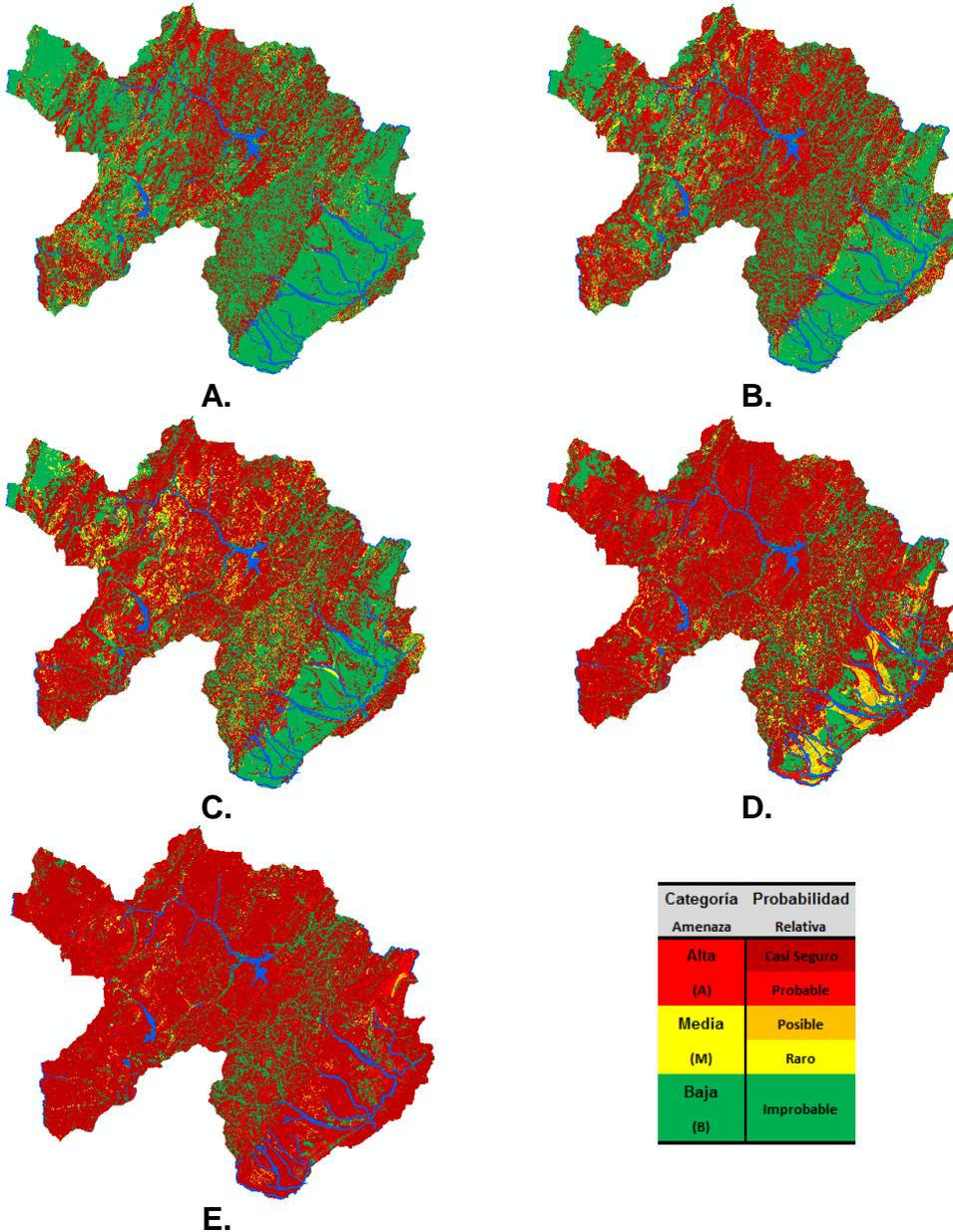


Ilustración 2. Mapas de diferentes escenarios de amenaza regional de Corpoguavio. A. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Seco. B. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Bajo. C. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Medio. D. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Alto. E. Amenaza Regional Condición Nivel de Agua Saturado.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	123
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 51. Descripción de los escenarios analizados para la amenaza regional

Mapa	Escenario
A.	Condición Nivel de Agua Seco
B.	Condición Nivel de Agua Bajo
C.	Condición Nivel de Agua Medio
D.	Condición Nivel de Agua Alto
E.	Condición Nivel de Agua Saturado

En todos los escenarios se incluyó el factor sismos y se varió la intensidad de las lluvias. El escenario A, representa la condición seca ya que no considera el efecto de la lluvia; por lo tanto, sólo incluye el factor sismos. A partir de este mapa se puede observar que es el escenario que presenta la menor área clasificada con un nivel de amenaza casi seguro y probable. El escenario B presenta un nivel de lluvia bajo, por lo contrario, el escenario E presenta un escenario saturado donde el nivel freático tiene la misma altura que el espesor del suelo residual. En las figuras se observa el aumento progresivo de las áreas clasificadas en las categorías de amenaza alta a medida en que se aumentan las lluvias y por lo tanto el nivel freático; demostrando que sin duda la lluvia es un factor detonante que afecta directamente el grado de amenaza que presenta una zona. El escenario E, es la condición más extrema planteada lo que conlleva a que sea el escenario que presenta las áreas con mayores probabilidades de ocurrencia por movimientos en masa. Este aumento se debe a que los resultados del análisis de estabilidad muestran que bajo dichas condiciones el terreno es altamente inestable (factores de seguridad promedio menores que 1).

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA AMENAZA REGIONAL

Las estadísticas de la distribución de los municipios pertenecientes al área de estudio según el mapa de amenaza (ver Ilustración 3) se pueden observar en la Tabla 52. (Ver anexo 1 Planos, AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCION MASA, GE333-CPG-PSIG-AZ-001-00.)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	124
Fecha: 01/04/2015					

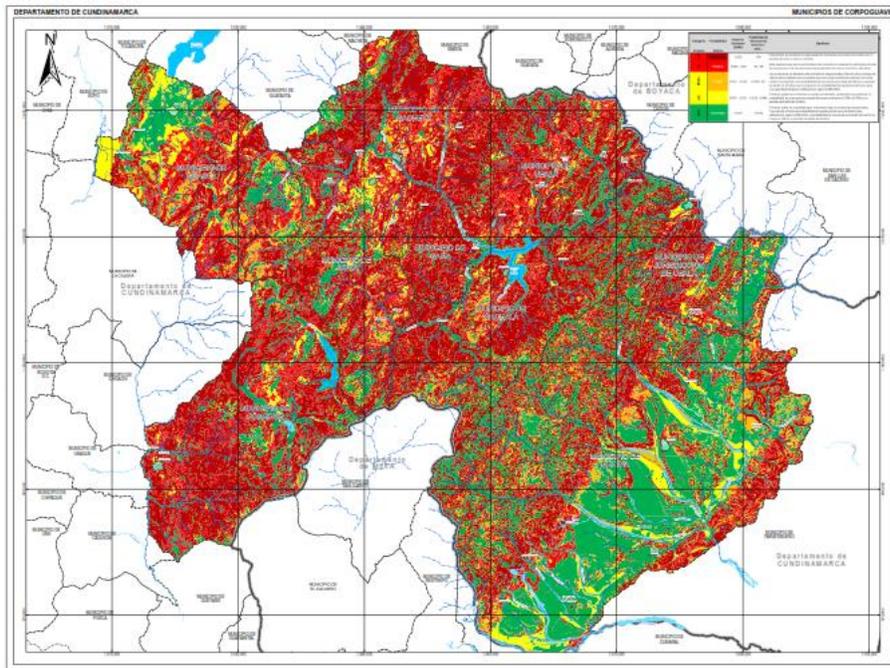


Ilustración 3. Mapa de Amenaza Regional por fenómenos de remoción en masa de Corpoguaiivo

En ella se observa que los municipios que presentan mayor área dentro de la categoría de amenaza casi segura son Gama, Gachetá, Ubalá y Fómeque. Así mismo, los municipios de Gama, Gachetá y Fómeque presentan el 80%, 76% y 73% de su área respectivamente dentro de la categoría de amenaza alta (Casi seguro y Probable). Como resultado Gama es el municipio que se encuentra en una situación más crítica frente a este tipo de fenómenos. Por otro lado, Medina es el municipio que presenta el mayor porcentaje de su área dentro de la categoría de amenaza improbable y el menor porcentaje dentro de la categoría alta.

Tabla 52. Distribución del área de cada municipio en las categorías de amenaza según la clasificación del mapa de amenaza regional.

Municipio	Improbable	Raro	Posible	Probable	Casi Seguro	Área Total (%)
Gachetá	13.9%	6.8%	2.9%	19.7%	56.6%	100
Guasca	22.9%	14.9%	9.7%	22.8%	29.6%	100
Ubalá	19.3%	4.2%	5.5%	17.4%	53.6%	100

	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	  
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Municipio	Improbable	Raro	Posible	Probable	Casi Seguro	Área Total (%)
Junín	20.5%	7.7%	7.8%	22.1%	41.9%	100
Gachalá	24.4%	1.9%	10.1%	10.5%	53.1%	100
Gama	13.2%	5.7%	1.5%	15.9%	63.7%	100
Jurisdicción de Ubalá	35.9%	8.1%	6.0%	13.3%	36.6%	100
Fómeque	19.9%	4.9%	2.3%	20.3%	52.6%	100
Medina	43.7%	6.4%	12.7%	13.1%	24.2%	100

Por otro lado, la Tabla 53 muestra las estadísticas de la distribución del área de cada centro urbano dentro de cada categoría de amenaza. San Roque, Gachalá, Santa Rosa y Rionegro (municipio de Gachalá) son los centros urbanos que presentan la amenaza más alta del grupo de la Tabla 53, presentando más del 70% de su área dentro de la categoría de amenaza catastrófica. El centro urbano de Montecristo por su parte presenta el 100% de su área clasificada en amenaza alta (catastrófica y probable) mientras que Rio Negro (municipio de Ubalá), Arenales, Gazaduje, Mesa de Reyes, Gazatavena, San Pedro de Guajaray, Santa Teresa, Peñas Blancas y Guasca no tienen ningún porcentaje de su área clasificado en amenaza catastrófica o probable. Adicionalmente, el 100% del área de los centros poblados de Peñas Blancas y Rio Negro (municipio de Ubalá) se encuentra categorizada con una amenaza de improbable.

Tabla 53. Distribución del área de cada centro urbano en las categorías de amenaza según la clasificación del mapa de amenaza regional

Casco Municipal	Improbable	Raro	Posible	Probable	Casi Seguro	Área Total (%)
Laguna Azul	0%	13%	0%	46%	42%	100%
La Cabrerita	75%	0%	0%	0%	25%	100%
San Francisco	16%	0%	0%	54%	30%	100%
Puente Licio	98%	0%	0%	1%	0%	100%
Tres Esquinas	5%	0%	71%	12%	12%	100%
Rio Negro (municipio Ubalá)	100%	0%	0%	0%	0%	100%
Montecristo	0%	0%	0%	49%	51%	100%
Los López	0%	24%	0%	54%	22%	100%
Santa Rosa	0%	0%	2%	25%	73%	100%
Arenales	24%	38%	38%	0%	0%	100%
Los Alpes	13%	17%	0%	70%	0%	100%
Gazaduje	0%	73%	27%	0%	0%	100%

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	126

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Casco Municipal	Improbable	Raro	Posible	Probable	Casi Seguro	Área Total (%)
Mesa de Reyes	1%	0%	99%	0%	0%	100%
Sueva	16%	0%	6%	64%	13%	100%
Claraval	4%	47%	0%	29%	21%	100%
Chuscales	21%	8%	46%	22%	3%	100%
La Unión	61%	37%	0%	2%	0%	100%
Rionegro (municipio Gachalá)	0%	0%	1%	28%	71%	100%
San Roque	0%	3%	0%	14%	82%	100%
Gazatavena	27%	69%	4%	0%	0%	100%
La Esmeralda	30%	6%	33%	8%	22%	100%
San Pedro de Guajaray	29%	71%	0%	0%	0%	100%
Santa Teresa	77%	23%	0%	0%	0%	100%
San Pedro de Jagua	23%	34%	28%	13%	2%	100%
Mámbita	71%	11%	12%	4%	3%	100%
Palomas	76%	3%	18%	3%	0%	100%
Peñas Blancas	100%	0%	0%	0%	0%	100%
La Playa	51%	40%	0%	5%	3%	100%
Soya	29%	29%	18%	24%	0%	100%
El Gamboa	65%	0%	30%	4%	2%	100%
Fómeque	2%	10%	0%	46%	43%	100%
Gachalá	3%	2%	3%	18%	74%	100%
Gama	1%	14%	10%	45%	29%	100%
Gachetá	10%	14%	7%	20%	48%	100%
Guasca	20%	46%	33%	0%	0%	100%
Junín	18%	33%	0%	47%	2%	100%
Medina	44%	29%	0%	21%	5%	100%
Ubalá	2%	3%	7%	22%	66%	100%

3.5 CONCLUSIONES

De acuerdo con los reconocimientos de campo, las características y condiciones geológicas y geomorfológicas de los terrenos, en el sitio de estudio se presentan procesos superficiales de tipo reptación, de erosión de márgenes de drenajes, socavación de drenajes, tipo caída de detritos, deslizamientos recientes de naturaleza variada, procesos erosivos y procesos antiguos.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	127

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Para la generación del modelo estadístico de susceptibilidad fue necesario realizar 110 ensayos de prueba y error. Lo anterior indica que para obtener el modelo estadístico adecuado se requiere de un gran número de pruebas con el fin de encontrar el que posea mayor ajuste y buena capacidad de predecir eventos futuros.

El modelo estadístico de Susceptibilidad del terreno de los municipios Medina, Fómeque, Guasca, Junín, Gachetá, Ubalá, Gama y Gachalá se encuentra definido por las variables pendiente, longitud de flujo, geología y forma del área de captación. Siendo las dos últimas variables las que se encuentran fuertemente asociadas con las presencia/ausencia de los movimientos en masa.

Las variables de geomorfología y cobertura del suelo no entraron o fueron eliminadas del modelo de susceptibilidad ya que fueron inconsistentes al explicar la distribución de los movimientos en masa.

Por otro lado, las variables curvatura, índice de relieve relativo y densidad de drenaje fueron eliminadas del conjunto de variables de entrada del modelo debido que presentaban dependencia con las variables pendiente, forma del área de captación y longitud de drenaje. Esta dependencia generaba una sobredispersión en los datos y el modelo que se producía no tenía un buen ajuste con los datos y presentaba una pobre habilidad para predecir eventos futuros.

El mapa de susceptibilidad del terreno presenta un buen ajuste (74%) al inventario de procesos utilizados para generarlo (inventario 1) y un grado de asociación considerable ($\kappa = 0.62$), por lo que se considera que el modelo estadístico logra explicar la ocurrencia de los movimientos en masa.

Igualmente, se validó la capacidad del modelo para predecir futuros movimientos en masa al evaluar el modelo con un inventario de procesos independiente del que fue utilizado para su construcción (Inventario 2). La comparación demostró la capacidad del modelo de predecir el 79% de los eventos. La confiabilidad del modelo estadístico para clasificar los eventos corresponde a un $\kappa = 0.56$, el cual indica que posee una fuerza de concordancia moderada.

Según el mapa de susceptibilidad de la zona de estudio, los municipios que presentan una mayor área dentro de la categoría de susceptibilidad muy alta son Gachalá (51%), Gama (46%) y Ubalá (41%). Los cascos urbanos de los municipios no presentan un porcentaje alto de su área dentro de la categoría de

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	128

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

susceptibilidad muy alta. Gachetá presenta la mayor área dentro de esta categoría, sin embargo, no es mayor al 10% de su área total. Por otro lado, el casco urbano de Junín se encuentra en situación crítica debido a que el 69% de su área se encuentra categorizada con una susceptibilidad alta. En situación opuesta a Junín, los cascos urbanos de Guasca y Medina contienen toda su área categorizada con una susceptibilidad muy baja. Adicionalmente, Guasca es el municipio que presenta el menor porcentaje de área dentro de las categorías de alta y muy alta.

Para la generación del modelo de estabilidad del terreno y el mapa de amenaza regional fue necesario realizar diferentes pruebas con el fin de calibrar los parámetros. El mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa predice la ocurrencia de eventos futuros siempre y cuando ocurran bajo las mismas circunstancias y a causa de las mismas circunstancias que los causaron en el pasado, como lo hacen todos los modelos probabilísticos. Se puede asumir que los factores geológicos (litología, estructura y sísmica) no cambiarán significativamente para un periodo geológico corto. Pueden existir modificaciones en la morfología debido a erosión, acciones humanas; sin embargo, no se espera que ocurran cambios morfológicos extensos sobre la zona de estudio. Por otro lado, los cambios en la cobertura y uso del suelo son más probables que ocurran, y como es una variable que influye en la estabilidad del suelo se deberá replantear el modelo de estabilidad del suelo únicamente en los casos en que los cambios sean muy extensos y significativos.

La validación del mapa y modelo de amenaza resulta difícil debido que no se cuenta con una base de datos para la validación recopilada después de que se realizó el estudio; sin embargo, se realizó la comparación con el inventario de procesos recopilados por la consultoría. La concordancia entre los procesos existentes y los eventos pronosticados por el mapa de amenaza es considerable ($\kappa=0.72$).

El grado de concordancia entre el mapa de susceptibilidad y amenaza regional es aceptable ($\kappa=0.29$), mientras que las áreas clasificadas con una categoría de amenaza casi segura coinciden en un 48%. Los mapas son semejantes más no iguales debido a que la amenaza considera factores adicionales (factores detonantes, frecuencia y magnitud) los cuales no son necesarios para la generación y cálculo de la susceptibilidad.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	129

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Una vez comparados el mapa de susceptibilidad y amenaza, se evidencia que la cobertura y uso del suelo son definitivamente un factor importante; ya que en las zonas forestadas del área de estudio, la susceptibilidad y amenaza son bajas, y es directamente proporcional debido a que si hay deforestación, la amenaza y susceptibilidad del suelo aumentan, ya que las raíces aportaban mayor cohesión al suelo y en la deforestación se pierden.

Los factores detonantes considerados – lluvia y sismos - afectan directamente la estabilidad del terreno dado que disminuyen su factor de seguridad promedio y aumentan la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa. Esto se evidencia en la Ilustración 2 porque el escenario A, únicamente sismo, presenta menos áreas con categoría de amenaza casi segura mientras que a medida en que se introducen y se aumentan las condiciones de lluvia (escenarios B al E) aumenta de categoría de amenaza.

Los centros poblados con mayor área, en amenaza Casi Seguro es San Roque con un 82%, seguido de Gachalá con un 74% y Santarosa con un 73%, la cual corresponde a la probabilidad de que ocurra un evento por remoción en masa, y son los que se les debe priorizar para la ejecución de obras y así prevenir daños a los elementos expuestos, tanto físicos como humanos. Y el municipio con mayor amenaza en Casi Seguro es Gama con un valor de 63.7%, el cual también debe ser priorizado para el diseño y ejecución de obras.

En general cada municipio tiene una porción del área en la categoría de amenaza Casi Seguro, lo que indica que se debe atender estos sitios críticos con prioridad. El municipio de Medina tiene la mayor área en amenaza Improbable, con un valor de 43.7%, lo que quiere decir que en orden de prioridades, no necesita una atención inmediata; pero sin dejar de lado que todos los municipios deben tener una atención constante, para evitar daños o catástrofes mayores.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	JAP	HBC	FSS	UT-PGR	130

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

4. AMENAZA REGIONAL POR INUNDACIÓN

4.1 MARCO TEORICO

4.1.1 Definiciones

4.1.1.1 Amenaza

Es la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado. La amenaza surge cuando de la posibilidad teórica se pasa materializar la probabilidad de que un fenómeno de origen natural o humano se produzca en un determinado tiempo y en una determinada región que no esté adaptada para afrontarlo sin traumatismos (Ayala, 2009).

La amenaza puede ser natural o antrópica.

- **Amenaza natural:** Tiene su origen en la transformación dinámica de la naturaleza. Normalmente el hombre no interviene en la ocurrencia de estos fenómenos, ni está en capacidad de evitar que los mismos se produzcan. La amenaza natural puede considerarse según su origen en dos grupos: geológica e Hidrometeorológica o climática.
- **Amenaza Geológica:** Incluye a fenómenos como los sismos y los terremotos, las erupciones volcánicas, los maremotos o tsunamis, las avalanchas, los hundimientos y la erosión terrestre y costera.
- **Amenaza Hidrometeorológica o Climática:** Esta amenaza es el producto directo de las condiciones climático-atmosféricas. Se incluyen a los huracanes, las tormentas tropicales, los tornados, las granizadas y las tormentas eléctricas, el fenómeno del Niño, las temperaturas extremas, las sequías, los incendios forestales, las inundaciones y los desbordamientos de los cauces (Ayala, 2009).
- **Amenaza antrópica** Es aquella claramente atribuible a la acción humana sobre los elementos de la naturaleza (aire, agua y tierra) o sobre la población,

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	131
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

que pone en peligro la integridad física o la calidad de vida de las comunidades. Ejemplos: una explosión en una planta nuclear, la rotura de una represa, el vertimiento o derrame de sustancias tóxicas en una fuente de agua (Ayala, 2009).

4.1.1.2 Caracterización de la Amenaza

Un fenómeno natural puede caracterizarse como amenaza en relación con tres variables que permiten identificarlo como peligroso:

- **Ubicación:** La ubicación se puede caracterizar mediante información y registro geológico, arqueológico e histórico con características del ambiente físico-naturales, tales como terrenos, topografía, drenajes, huellas de fenómenos anteriores y cercanía de fuentes de amenaza.
- **Severidad:** La severidad puede ser evaluada mediante registros naturales y documentales, por extensión y tipo de efectos observables o por comparación con regiones similares.
- **Recurrencia:** La recurrencia está sujeta a múltiples limitaciones; muchos de los fenómenos ocurren en lapsos de tiempo promedio que pueden abarcar desde varias generaciones hasta miles de años (CVC- Universidad del Valle, 2010).

4.1.1.3 Inundaciones

Es un evento natural y recurrente que se produce en las corrientes de agua como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan las llanuras o zonas bajas y, en general, aquellos terrenos aledaños a los cursos de agua. Algunas de las clasificaciones que se tiene para las inundaciones se describen a continuación (Aparicio, 2003):

- **Inundaciones por precipitaciones in situ:**

Son las que se producen por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	132

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

desbordamiento de un cauce fluvial. Este tipo de inundación se genera tras un régimen de precipitaciones intensas o persistentes, es decir, por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio período de tiempo. Lógicamente, es el primero de estos casos el que conlleva el mayor peligro para la población y sus bienes y el que plantea los principales inconvenientes a los servicios de coordinación e intervención para prevenir y controlar sus daños. Las precipitaciones torrenciales, que se acumulan peligrosamente en un lapso muy breve de tiempo, hacen que el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia sea más reducido (Aparicio, 2003).

- **Inundaciones por desbordamientos de los ríos:**

Son causadas por los desbordamientos de los ríos y los arroyos, lo cual se atribuye, en primera instancia, a un excedente de agua, al igual que la sequía se atribuye al efecto contrario, es decir, la carencia de recursos hídricos. El aumento brusco del volumen de agua que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse produce lo que se denomina como avenida o riada, un mayor aumento del volumen es la causa de la inundación (Aparicio, 2003).

4.1.2 Metodologías utilizadas para la determinación de los niveles de Amenaza por inundaciones

A partir de los criterios para clasificar las amenazas por inundación se han desarrollado diferentes metodologías para la elaboración de los mapas de amenaza por inundación.

Estas metodologías generalmente se basan en la determinación de valores límites para la profundidad del agua, la velocidad del flujo o una combinación de estos dos parámetros.

Además, tienen en cuenta la frecuencia de los eventos en términos de los periodos de retorno. Sin embargo, las metodologías difieren entre sí en los requerimientos de información y los criterios establecidos para la zonificación de la amenaza, en los que principalmente se varían los rangos de amenaza debido a la diferencia entre valores límites adoptados (CVC-Univalle, 2010).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	133

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Algunas de las metodologías que han sido desarrolladas se relacionan a continuación:

- Metodología establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de España, 1995:

Propuesta en España (1995), considera las características de vulnerabilidad de la población y de los elementos (edificios, instalaciones, infraestructuras y elementos naturales o ambientales), su ubicación y las características hidráulicas de la creciente que genera el desbordamiento (profundidad del agua, velocidad del flujo, caudal sólido transportado y duración de la inundación).

En esta metodología las zonas potencialmente inundables, de acuerdo con la amenaza de inundación se clasifican en: Zonas A de alto riesgo, Zonas B de riesgo significativo, Zonas C de riesgo bajo.

- Metodología adoptada por la Agencia Catalana del Agua, 2003:

Se presenta en la guía “Recomendaciones Técnicas para los Estudios de Inundabilidad Locales” (Agencia Catalana de Agua, 2003) y propone la siguiente clasificación de las zonas potencialmente inundables: Zonas de Inundación Alta, Zonas de Inundación Media y Zonas de inundación baja.

- Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana, PATRICOVA, 2002:

Metodología que define 6 niveles de amenaza de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia del evento que genera el desbordamiento y la profundidad que alcanza la columna de agua en la llanura de inundación.

Para la definición de los niveles de amenaza deben considerarse tres frecuencias de ocurrencia de crecientes: Frecuencia Alta, Frecuencia Media y

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	134

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Frecuencia Baja, y dos profundidades de la columna de agua en la planicie: Profundidades Altas y Profundidades Bajas.

- Metodología propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y tramo bajo del río Cinca (Gobierno de Aragón – Iberinsa, 2005):

Esta metodología fue propuesta en el año 2005 y plantea la implementación de dos procedimientos para la evaluación de la amenaza debido a inundaciones.

- Un procedimiento simplificado aplicable para las situaciones de amenaza baja, en donde no se espera que se presenten daños importantes.
- Un procedimiento general que debe implementarse cuando los bienes amenazados son de alta vulnerabilidad.

- Metodología aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación Proyecto MET-ALARN INETER/COSUDE “Inundaciones Fluviales Mapas de Amenaza” Recomendaciones técnicas para su elaboración. Managua, Nicaragua, Agosto de 2005.

Esta metodología fue aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales en Managua, Nicaragua, en el año 2005. A su vez, dentro de esta metodología existen diversos criterios para la evaluación de la amenaza, los cuales se mencionan a continuación.

- Criterios para la evaluación de la intensidad o magnitud de la inundación
- Criterios para la evaluación de la frecuencia, recurrencia o periodo de retorno de la inundación.
- Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones

- Metodología para la Zonificación de Amenaza y Riesgo por Avenidas Torrenciales en la Cabecera Municipal de Florida-Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC - Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química, Ingeominas. Convenio CVC-984/96 Ingeominas I-024. Santa Fé de Bogotá, Marzo de 1998.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	135

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Esta metodología fue empleada para la zonificación de amenaza y riesgo por avenidas torrenciales en la cabecera municipal de Florida, Valle del Cauca, en marzo de 1998.

En este estudio, el alcance establecido permite obtener la cuantificación de los elementos expuestos afectados y la estimación del nivel de pérdidas de los mismos, lo cual lleva a establecer la condición de riesgo en que se encuentra la población para el caso específico.

- Metodología aplicada en el cono aluvial del cauce Jones Creek y propuesta por Kerr Word Leital Associates Limited para el Departamento de Obras Públicas del Condado de Whatcom (Estados Unidos, 2004).

La metodología empleada en el proyecto MIDAS para la Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión fue la propuesta por R. García, J.J.Rodríguez y J.S.O'Brien (2001).

- Metodología propuesta por R. García, J.J. Rodríguez Y J.S. O'Brien (2001)
La metodología desarrollada por García et al. (2003-2005), que se propuso por primera vez en el proyecto PREVENE (2001), en el cual la metodología se aplicó a dos abanicos aluviales en Caracas, Venezuela, y luego se adaptó y aplicó a otro abanico aluvial urbanizado para la delimitación de mapas de amenaza. Esta metodología se basa en normas de Suiza y Austria que establecen tres zonas para la delineación del nivel de amenaza por inundaciones: alta, media y baja.

El nivel de amenaza en un lugar determinado está en función tanto de la intensidad como de la probabilidad de la inundación. La intensidad de la inundación está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación. Por eso, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes pero menos dañinos. El nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	136

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia).

4.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA

La modelación matemática es la representación de un sistema o fenómeno natural mediante ecuaciones matemáticas (técnicas numéricas y robustos algoritmos de programación que simula en detalle los procesos físicos que acontecen en las corrientes aluviales). En el caso de flujo libre, la modelación matemática puede predecir el comportamiento del flujo, las velocidades, el transporte de sedimentos, la socavación, etc., mediante la solución de las ecuaciones hidrodinámicas que intervienen en estos fenómenos (Jojoa *et al.*; 2011).

Los modelos matemáticos bidimensionales son los más usados para simular y estudiar los diferentes procesos hidrodinámicos, de oleaje, sedimentológicos, reológicos y de calidad del agua (transporte y dispersión de contaminantes) en zonas costeras, lagos, puertos, estuarios, embalses, ríos y planicies aluviales, canales, etc. Existe una gran variedad de este tipo de modelos, los cuales deben ser utilizados especialmente cuando parte de la llanura de inundación de la zona de estudio posee una topografía relativamente plana.

4.2.1 Descripción del modelo matemático FLO-2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien, 1988) empleado en este estudio permite simular fluidos newtonianos y no-newtonianos (flujos hiperconcentrados de sedimentos) como avenidas torrenciales o flujos de lodos. El modelo es apto para trabajar en topografías complejas, tales como, planicies de inundación, conos de deyección y áreas urbanizadas; adicionalmente, permite el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación. El modelo FLO-2D combina un modelo hidrológico con un modelo hidráulico, por lo cual permite simular el proceso lluvia – escorrentía, incluyendo los procesos de evaporación e infiltración y simular los procesos hidrodinámicos en los diferentes cauces y canales definidos en el modelo.

El transporte de flujo en canales, cuyas secciones pueden ser rectangulares, trapezoidales o naturales, es simulado unidimensionalmente así como el flujo a

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	137

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

través de calles. Por otra parte, el flujo no confinado en las planicies de inundación es modelado de forma bidimensional en ocho direcciones. Con el modelo matemático FLO-2D es posible, además, modelar el transporte de sedimentos, brindando al usuario la posibilidad de escoger entre nueve diferentes ecuaciones de transporte formuladas por distintos autores. Finalmente se pueden simular diversas estructuras, como diques, vertederos y puentes, además de construcciones, las cuales son esquematizadas como obstrucciones al paso del flujo.

Otra de las funciones del modelo FLO-2D es delimitar las zonas de amenaza y establecer para ellas distintas categorías (alta, media y baja) de acuerdo con la recurrencia de los eventos de caudales extremos o de lluvias en la zona de estudio. Para ello el usuario puede definir la metodología para determinar los mapas de amenaza, ingresando al modelo los rangos de profundidad de flujo y el producto de la velocidad por la profundidad del flujo para cada una de las categorías.

4.2.2 Ecuaciones hidrodinámicas utilizadas en el modelo FLO-2D

El modelo FLO-2D se basa en la ley de conservación de volumen, definida así:

$$\text{Volumen total de entrada} = \text{Volumen de salida} + \text{Volumen almacenado} + \text{Pérdidas de volumen por infiltración y abstracción}$$

En el modelo FLO-2D los diferentes tipos de flujos son transportados en canales a través de celdas cuadradas que en conjunto conforman la malla del dominio computacional.

Cada una de las celdas contiene información de la topografía de la zona de estudio. La progresión de la onda decreciente de flujo sobre la zona a modelar está controlada por la topografía y los parámetros de resistencia al flujo (rugosidad de los cauces y de las planicies de inundación). La modelación bidimensional se logra integrando numéricamente las ecuaciones de movimiento y de continuidad o de conservación del volumen de fluido, que se presentan a continuación.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HV_x}{\partial x} + \frac{\partial HV_y}{\partial y} = i \quad \text{Ecuacion 1. Continuidad}$$

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p> <p>Versión 3</p> <p>Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO</p> <p>LAG</p>	<p>REVISO</p> <p>HBC</p>	<p>AVALÓ</p> <p>FSS</p>	<p>APROBO</p> <p>UT-PGR</p>	<p>Pág.</p> <p>138</p>
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------------

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad \text{Ecuacion 2. Cantidad de movimiento en la direccion } x$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad \text{Ecuacion 3. Cantidad de movimiento en la direccion } y$$

Dónde:

V_x = Componente en la dirección x de la velocidad promedio en la vertical

V_y = Componente en la dirección y de la velocidad promedio en la vertical

S_{fx} = Componente en la dirección x de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción

S_{fy} = Componente en la dirección y de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción

S_{ox} = Componente en la dirección x de la pendiente del lecho

S_{oy} = Componente en la dirección y de la pendiente del lecho

H = Profundidad del flujo

g = Aceleración de la gravedad

i = Intensidad de lluvia de exceso, en términos de agua por unidad de tiempo

t = Tiempo

$\frac{\partial H}{\partial x}$ = Gradiente de presiones en la dirección x.

$\frac{\partial H}{\partial y}$ = Gradiente de presiones en la dirección y.

$\frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y}$ = Aceleración convectiva en la dirección x.

$\frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x}$ = Aceleración convectiva en la dirección y.

$\frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$ = Aceleración local en la dirección x.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 139
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v_y}{\partial t} = \text{Aceleración local en la dirección } y.$$

Para las planicies de inundación, las ecuaciones de cantidad de movimiento son aplicadas calculando la velocidad promedio del flujo a través de la frontera de un elemento o celda de la malla computacional en una dirección a la vez. Son 4 direcciones principales (norte, sur, este y oeste) y cuatro direcciones diagonales (noreste, noroeste, sureste y suroeste).

El cálculo de la velocidad es unidimensional y se resuelve independientemente para las otras siete direcciones. La estabilidad de este esquema numérico está basada en un criterio que permite controlar el tamaño del intervalo de tiempo computacional, Δt .

4.2.3 Algoritmo de solución del modelo FLO-2D para la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo

Para determinar el flujo en las planicies de inundación, el procedimiento computacional requiere calcular el caudal a través de las ocho direcciones potenciales de flujo de frontera para cada elemento de malla. El procedimiento comienza con el cálculo lineal de la profundidad de flujo en la frontera de la celda en consideración. Dicha profundidad es un valor promedio entre las profundidades de flujo en el elemento adyacente que compartirá caudal en una de las ocho direcciones de flujo. De la misma manera, se promedian los valores de rugosidad de Manning que determinan la resistencia al flujo, el área de flujo, la pendiente, el perímetro mojado y la elevación de la superficie.

La solución de las ecuaciones diferenciales de flujo se resume en los siguientes pasos:

- El cálculo hidráulico en un elemento de la malla computacional se inicia con la estimación de la profundidad del flujo en la frontera de dicho elemento, la cual es obtenida promediando las profundidades de flujo en dos elementos de la malla adyacentes que compartirán descarga de flujo en una de las ocho direcciones potenciales de flujo.
- La profundidad de flujo, d , para el cálculo de la velocidad a través de la frontera de dos elementos de la malla computacional para el siguiente intervalo de tiempo, Δt ($i+1$), es estimada a partir de las profundidades de flujo halladas en

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	140

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

el instante previo, $i \cdot \Delta t$, utilizando una función lineal (el promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos):

-

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad \text{Ecuación 4. Profundidad de flujo para un intervalo de tiempo}$$

- La primera estimación de la velocidad del flujo es realizada empleando la ecuación de momentum para onda difusa, siendo la velocidad la única variable desconocida ya sea para flujo en canales, calles o planicies de inundación.
- El caudal a través de la frontera de una celda es calculado multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal de cada una de las caras que componen dicho elemento.
-
- El incremento en el caudal para un intervalo de tiempo en una celda a través de las ocho fronteras (o en el elemento aguas arriba y el elemento aguas abajo si se trata de un canal o calle) se calcula sumando los caudales en las diferentes direcciones:

$$\Delta Q_x^{t+1} = Q_n + Q_s + Q_e + Q_o + Q_{ne} + Q_{no} + Q_{se} + Q_{so}$$

Ecuación 5. Incremento en el Caudal para un intervalo de tiempo

Donde los subíndices n, s, e, o, ne, no, se y so indican las direcciones norte, sur, este, oeste, noreste, noroeste, sureste y suroeste, respectivamente.

- El incremento en la profundidad es calculado a partir del área y del incremento de caudal en un elemento de la malla:

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{(\Delta Q_x^{t+1} \Delta t)}{A_{surf}}$$

Ecuación 6. Incremento en la profundidad para un intervalo de tiempo

Donde Δt es el incremento en el tiempo y A_{surf} es la superficie o área del elemento.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	141

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

4.2.4 Criterios de estabilidad numérica

Con el fin de obtener una modelación de flujo eficiente, el modelo FLO-2D, a través de los criterios de estabilidad numérica limita el intervalo de tiempo, Δt , para evitar la oscilación numérica, lo que permite simulaciones con intervalos de tiempo eficientes y suficientemente grandes para finalizar la simulación en un tiempo razonable. El modelo FLO-2D modifica automáticamente el intervalo de tiempo cuando los criterios de estabilidad numérica son excedidos. Para cada una de las celdas se chequean estos criterios en cada intervalo de tiempo para lograr una solución estable, y se descartan los cálculos hidráulicos para el intervalo de tiempo en que los criterios de estabilidad son excedidos; después la simulación regresa al intervalo anterior, el cual se reduce, para comenzar con él nuevamente los cálculos hidráulicos.

El modelo FLO-2D se encuentra limitado por tres criterios de estabilidad numérica:

- i. Criterio de porcentaje de cambio de profundidad (DEPTOL): según este criterio, el usuario ingresa un valor inicial de porcentaje sugerido entre 0.1 y 0.3. Si se excede este valor, el intervalo de tiempo se reduce y los cálculos hidráulicos se anulan, evitando que sea necesario un análisis adicional de estabilidad numérica.
- ii. Criterio de estabilidad de Courant: este criterio restringe los intervalos de tiempo haciendo que estos sean muy pequeños de forma que se cumpla el criterio de estabilidad de Courant. Este criterio relaciona la celeridad de la onda de flujo con el intervalo de tiempo de ejecución del modelo y el tamaño de la celda de la malla computacional (Ecuación 4). Para evitar la dispersión numérica, el número de Courant no debe ser mayor a 1.

$$\Delta t = \frac{Cr\Delta x}{(\beta V + C_o)} \quad \text{Ecuación 7. Numero de Courant}$$

Dónde:

Cr = Número de Courant, el cual debe ser menor o igual a uno ($Cr \leq 1$)

Δx = Longitud de la celda

Δt = Intervalo de tiempo computacional

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 142
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

V = Velocidad promedio calculada en la celda en la dirección principal del flujo

β = Coeficiente igual a 5/3 para un canal ancho

C_o = Celeridad de la onda

iii. Criterio de estabilidad numérica (WAVEMAX) de la ecuación de onda dinámica desarrollada por Ponce & Theurer (1982).

$$\Delta t < \frac{\zeta S_0 \Delta x^2}{q_0}$$

Ecuación 8. Criterio de estabilidad numérica de la ecuación de onda dinámica (WAVEMAX)

Dónde:

q_0 = Caudal unitario

S_0 = Pendiente del lecho

ζ = Coeficiente empírico

Δt = Intervalo de tiempo computacional

El coeficiente empírico ζ es una variable única para cada elemento de la malla computacional y es definido por el usuario. Los valores ζ van desde 0.1 a 1; un valor típico recomendado es 0.2.

4.2.5 Tamaños de celda recomendados

En el modelo FLO-2D las resoluciones espacial y temporal del modelo están sujetas al tamaño de los elementos de la malla computacional y a la tasa de crecimiento de la hidrógrafa de caudales de entrada. Con elementos pequeños de la malla computacional se logra una mejor resolución en la distribución de la inundación, pero esto implica invertir en mayores tiempos computacionales. Los creadores del modelo FLO-2D recomiendan un rango entre 15 y 150 m para el tamaño de la celda a emplear y que la malla computacional no contenga más de 30.000 celdas.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	143

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

4.2.6 Limitaciones del modelo FLO-2D

El modelo FLO-2D en algunos casos asume hipótesis que involucran la resolución temporal y espacial de la malla computacional, lo que limita al modelo de la siguiente manera:

Un elemento de canal está representado por una sola geometría de canal (sólo una sección transversal) y un valor de rugosidad, y se encuentra ubicado en una sola celda de la malla computacional

- El flujo rápidamente variado, como saltos hidráulicos u ondas de choque, no es simulado
- Cada elemento o celda de la malla está representado por un único valor de elevación, rugosidad y profundidad de flujo.
- Durante un intervalo de tiempo, Δt , el flujo se considera uniforme
- La distribución de presiones en la profundidad es hidrostática
- La rugosidad hidráulica se basa en la resistencia al flujo estacionario, uniforme y turbulento.

4.2.7 Fases del modelo FLO-2D

El modelo matemático bidimensional FLO-2D dispone de un grupo de programas preprocesadores y postprocesadores, tanto para ingresar los datos como para visualizar los resultados. Entre los programas preprocesadores se encuentran GDS (Grid Developer System o sistema para elaboración de la malla computacional) y PROFILES.

Adicionalmente, el modelo cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI), en la cual el usuario puede ejecutar el programa, ingresar datos, tener acceso a los diferentes pre y postprocesadores y acceder a los comentarios explicativos de las distintas variables y parámetros del modelo FLO-2D.

El preprocesador GDS permite al usuario ingresar la información de la zona de estudio de una forma sencilla, visualizándola gráficamente. A través del GDS se ingresa la información topográfica y se discretiza en celdas cuadradas mediante la creación de la malla computacional, se trazan los canales y las calles, se esquematizan las obstrucciones del flujo y se ingresan diques y demás estructuras

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 144
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

hidráulicas. También el preprocesador GDS es utilizado para asignar los valores de rugosidad de las planicies, los canales y las calles. Además, es posible importar aerofotografías georreferenciadas y archivos shape como imágenes de fondo para apoyar la edición gráfica.

El preprocesador PROFILES sirve para la edición de las secciones transversales de los canales. Mediante esta herramienta es posible ajustar el perfil y la pendiente de los canales e interpolar las secciones transversales.

Los postprocesadores del modelo FLO-2D son MAXPLOT, MAPPER e HYDROG. Estos programas permiten al usuario la visualización de los resultados de la simulación, así como la generación de mapas de inundaciones y amenaza.

El postprocesador MAXPLOT permite una visualización rápida de los resultados, aunque sin muchos detalles. Entre los resultados que pueden apreciarse se encuentran las profundidades y las velocidades del flujo máximas y finales en las llanuras, calles y canales, así como la energía específica máxima, entre otros.

El postprocesador HYDROG muestra la hidrografía de caudales en cualquier tramo o elemento de canal y parámetros hidráulicos como la velocidad del flujo, la profundidad, el caudal, el área de flujo, el radio hidráulico, el perímetro mojado, el ancho superior, la relación entre ancho y profundidad y la pendiente de la línea de energía.

Mediante el postprocesador MAPPER se crean los mapas de inundación y amenaza. Al igual que el postprocesador MAXPLOT, pueden visualizarse las profundidades y velocidades del flujo máximas y finales de las llanuras, calles y canales pero de una forma más detallada.

4.3 METODOLOGÍA

4.3.1 Descripción general de la zona de estudio

En la Ilustración 4 se presenta la imagen del plano general del área de estudio correspondiente a la jurisdicción de Corpoguvio, dicho plano presenta la imagen

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	145

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

aérea con los límites municipales, red de drenaje sencillo y red de drenaje doble, embalses, lagunas, Imagen aérea general “ortofoto”, perímetros municipales.

Para consultas e información detallada remitirse al Volumen B - Tomo I del presente estudio.

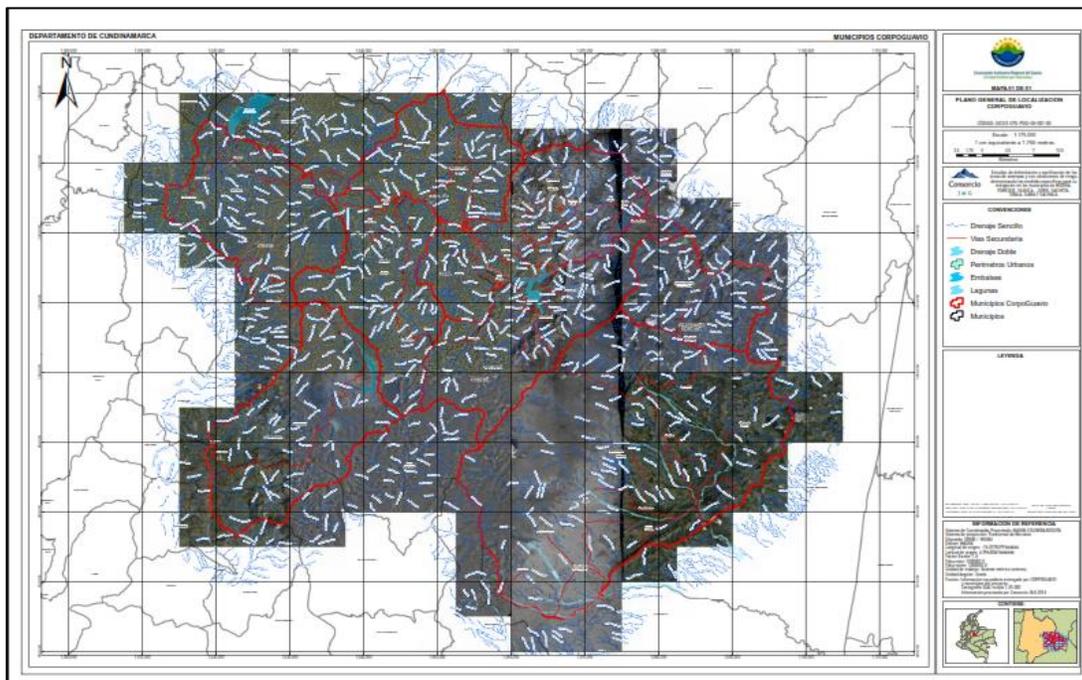


Ilustración 4. Mapa General Área de estudio

4.3.2 Caracterización Hidrológica.

Para el análisis climático y la caracterización hidrológica de la zona de estudio y las áreas de drenaje aferentes a ésta, se recopiló la información de la zona en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. En Tabla 54 se presenta el nombre, tipo y código de cada una de las estaciones representativas para este sector y sus características de localización y elevación, respectivamente para las estaciones sinópticas principales, medidoras de parámetros climatológicos, que se utilizaron para identificar la zona del proyecto.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	146

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 54 Características de Localización de las Estaciones Hidrometeorológicas Cercanas a la Zona de Proyecto

CODIGO	TE	NOMBRE DE ESTACION	CORRIENTE	DPTO.	MUNICIPIO	COORD PLANAS		ELEVACIÓN
						Y(Norte)	X(Este)	(msnm)
3507019	PG	CHIVOR	GACHETÁ	BOYA	ALMEIDA	1031590	1079364	1850
3506010	PG	ESC TENA	GACHETÁ	CUND	GACHALÁ	1013070	1062696	1700
3507048	PG	LA ESPERANZA	MACHETA	CUND	MANTA	1046406	1060844	1840
3503008	PG	CASAS LAS	CAQUEZA	CUND	CAQUEZA	983458	1016396	2100
3502028	PM	CHOACHI	NEGRO	CUND	CHOACHI	992718	1016396	1950
3506021	PM	CLARAVAL	Q FARALLONES	CUND	JUNÍN	1005662	1044176	2150
3506020	PM	EL AMOLADERO	SUEVA	CUND	GUATAVITA	1029738	1038620	2850
3504001	PM	EL RETIRO	PIRI	CUND	MEDINA	976050	1058992	1800
3507047	PM	ESC LOS MOLINOS	BATA	BOYA	ALMEIDA	1038998	1075660	2150
3502029	PM	FÓMEQUE	NEGRO	CUND	FÓMEQUE	989014	1021952	1900
3506009	PM	GACHALÁ	GACHETÁ	CUND	GACHALÁ	1011218	1062696	1760
3506024	PM	GAMA	GACHETÁ	CUND	GAMA	1018626	1051584	2065
3507049	PM	HDA HATO GRANDE	MACHETA	CUND	MANTA	1038998	1055288	2230
3506005	PM	JUNÍN	GACHETÁ	CUND	JUNÍN	1020478	1046028	2350
3506022	PM	LA GLORIA	NEGRO	CUND	UBALÁ	1024182	1073808	1910
3506013	PM	LAS MINAS	BATATAS	CUND	GACHALÁ	1009366	1066400	1800
3506014	PM	LAS PALOMAS	BATATAS	CUND	GACHALÁ	1011218	1070104	2000
3507032	PM	MARTOTA	QDA CUYA	BOYA	SOMONDOCO	1037316	1071447	2620
3505001	PM	MEDINA	GAZAMUMO	CUND	MEDINA	990866	1081216	480
3506030	PM	MUNDO NUEVO	RUCIO	CUND	UBALÁ	1027886	1075660	1740
3506016	PM	POTRERITOS	SUEVA	CUND	GUATAVITA	1026034	1034916	2550
2120161	PM	SAN ISIDRO	BOGOTA	CUND	GUASCA	1027886	1020100	2698
3505002	PM	SAN JUANITO	HUMEA	CUND	MEDINA	981606	1073808	426
2120125	PM	SAN PEDRO	TEUSACA	CUND	SOPO	1029738	1014544	2600
2120122	PM	STA CRUZ DE SIECHA	SIECHA	CUND	GUASCA	1026034	1021952	3100
3506025	PM	STA ROSA DE UBALÁ	RUCIO	CUND	UBALÁ	1022330	1075660	1600
3506002	PM	SUEVA	SUEVA	CUND	JUNÍN	1024182	1042324	1820
3506017	PM	TASAJERAS	AGUACIA	CUND	GACHETÁ	1027886	1051584	2100
3506015	PM	TEMLADARES	Q FARALLONES	CUND	JUNÍN	1014922	1046028	2910
3506023	PM	TRES ESQUINAS	CHIVOR	CUND	UBALÁ	1020478	1066400	1950
3506018	PM	UBALÁ	GACHETÁ	CUND	UBALÁ	1016774	1060844	1920
3506012	PM	VEGA LA SAN JUAN	GACHETÁ	CUND	GACHALÁ	1014922	1066400	1480
2120669	CO	COL MIGUEL A. CARO	BOGOTÁ	BOGOTÁ	BOGOTÁ	1022537	1006749	2700

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	147

	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	  
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

CODIGO	TE	NOMBRE DE ESTACION	CORRIENTE	DPTO.	MUNICIPIO	COORD PLANAS		ELEVACIÓN (msnm)
						Y(Norte)	X(Este)	
3505501	CO	EL JAPON	HUMEA	CUND	MEDINA	976050	1086772	280
3506501	CO	GACHETÁ	GACHETÁ	CUND	GACHETÁ	1024182	1051584	1850
2120570	CO	GUASCA	CHIPATA	CUND	GUASCA	1029738	1021952	2750
3504502	CO	CABANA LA HDA	GUACAVIA	META	CUMARAL	963086	1090476	305
2120592	ME	SUASUQUE	TEUSACA	CUND	SOPO	1024182	1012692	2650
3507714	LG	BARBOSA TERMALES	MACHETA	CUND	TIBIRITA	1053814	1057140	1980
3505701	LG	EL CABLE	HUMEA	CUND	MEDINA	974198	1090476	280
3502719	LG	GUACAPATE	NEGRO	CUND	QUETAME	966790	1027508	920
3506709	LG	LA BOCA	BATATAS	CUND	GACHALÁ	1011218	1066400	1700
3506701	LG	LA GLORIA	NEGRO	CUND	UBALÁ	1026034	1073808	1900
3506713	LG	MUNDO NUEVO	RUCIO	CUND	UBALÁ	1027886	1075660	1750
3506703	LG	UBALÁ	CHIVOR	CUND	UBALÁ	1020478	1066400	1840
3504703	LM	PTE CARRETERA	GUACAVIA	META	CUMARAL	970494	1084920	275
Nota:	PG	Pluviográfica	ME	Meteorológica Especial				
	PM	Pluviométrica	LG	Limnigráfica				
	CO	Climatológica Ordinaria	LM	Limnimétrica				

Para ver información detallada remitirse al Volumen B - Tomo III del presente estudio.

4.3.3 Metodología propuesta para el presente estudio

La metodología usada en el estudio consistió en la modelación hidráulica de varios eventos hidrológicos de grandes magnitudes, para distintos periodos de retorno, a través del análisis de información disponible, recolectada para la identificación de la amenaza. Se tomaron en consideración las cuencas asociadas a las corrientes definidas en el informe Hidrología e Hidrogeología perteneciente a este mismo proyecto (ver Anexo 1- 4 , Tabla 9 y Tabla 11 de dicho informe). A cada corriente se le asociaron los caudales obtenidos a partir de la modelación hidrológica realizada en el informe anteriormente mencionado, una vez obtenida y clasificada la información, se generó un modelo hidráulico mediante el uso del software FLO-2D, cuyos resultados muestran los niveles de agua, velocidades y zonas de influencia

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	148

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

correspondientes a las cuencas analizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 20 y 100 años, siendo este último el más crítico.

Se obtuvo así un mapeo de zonas de posible inundación analizando la amenaza latente.

4.3.4 IMPLEMENTACIÓN MODELO FLO-2D.

4.3.4.1 Introducción

FLO-2D es un software diseñado para realizar modelos de inundación a través de terrenos, canales, etc.; en el mismo se pueden incluir diferentes conceptos y elementos como lo son muros, puentes, alcantarillado, lluvia, infiltración, transporte de sedimentos, entre otros.

El objetivo de este tipo de herramientas es simular daños por inundación probable en una zona determinada en función de varios escenarios de inundación con diferente intensidad, duración y período de retorno.

4.3.4.2 Esquematización del Modelo

A continuación se realiza una breve descripción de los diferentes pasos necesarios para poder desarrollar y simular el modelo de inundación dentro del software.

- Creación del Proyecto

El primer concepto necesario para desarrollar el modelo de inundación es definir un proyecto, esto se realiza importando información que permita identificar la zona a estudiar (datos con coordenadas X, Y, Z); existen varias formas de obtener dichos datos (a través de un shapefile de puntos, un DTM de puntos, o, un archivo de autocad, entre otros). En el caso específico de este proyecto se utilizó información proveniente de un archivo tipo shapefile de puntos, el resultado se puede observar en la Ilustración 5.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	149

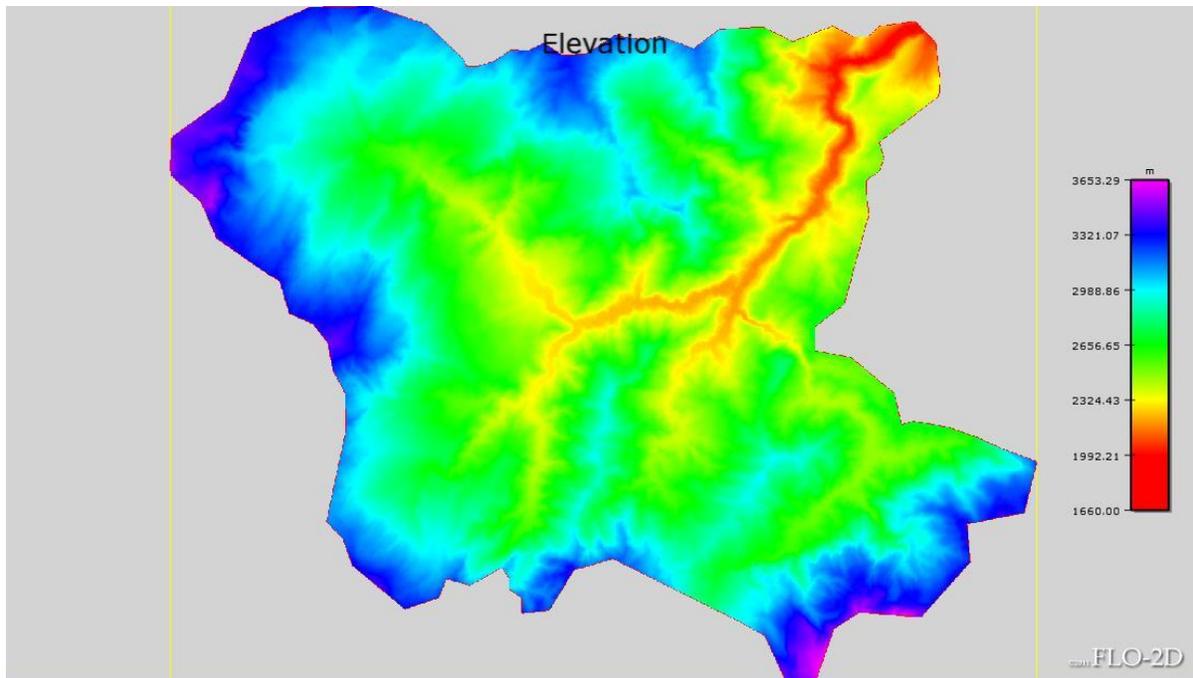


Ilustración 5 Archivo tipo shapefile cargado en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores)
Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

- Generación Grilla

El siguiente paso es generar un malla o grilla (grid en inglés) de manera que los datos se puedan trabajar de manera similar a una matriz, el único dato necesario para generar la malla es definir el tamaño de cada celda (las unidades dependerán del sistema métrico del shapefile, en este caso metros). Ilustración 6.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	150

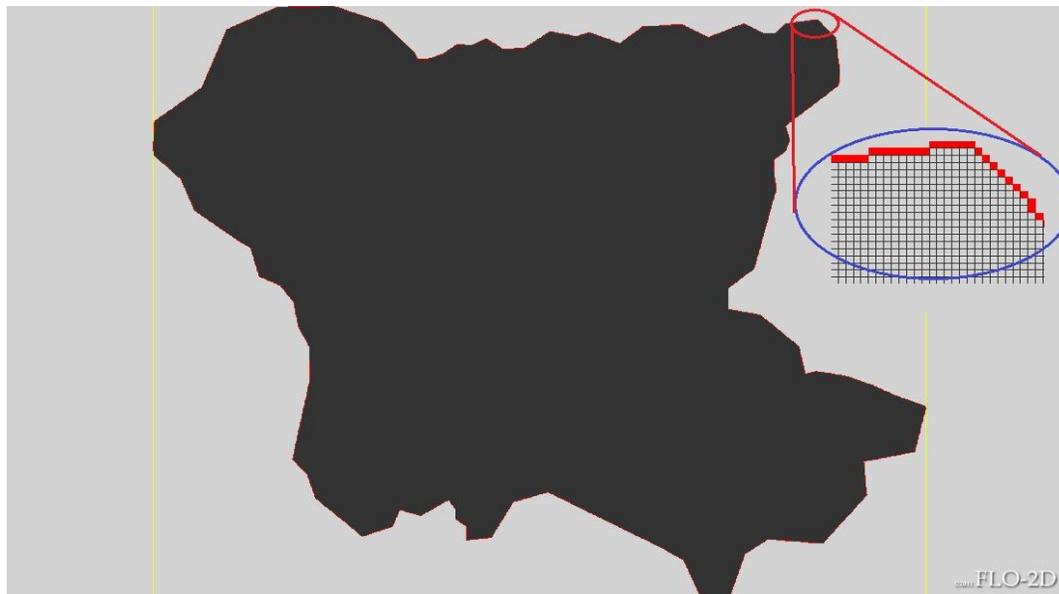


Ilustración 6 Malla generada para un valor de 10m (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

- Definición Área de Trabajo

Previo a designar parámetros e información dentro de las diferentes celdas de la malla, se deben definir los límites del área de trabajo, esto se puede realizar mediante varias funciones que se encuentran en el menú Grid (opción Define Boundary Grid Elements y posteriormente Setup Computational Área, o, directamente usando la última opción mencionada), el resultado se presenta en la Ilustración 7.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	151

Una vez se ha generado la malla con sus respectivas elevaciones, se procede a definir qué elementos harán parte del análisis de inundaciones (canales, celdas con ingreso/salida de flujo, infiltración, lluvia, evaporación, entre otros). Para este estudio se definió usar la topografía como canal natural del transporte de flujo, adicionalmente en unas celdas específicas ubicadas en las zonas aguas arriba de las diversas corrientes se ingresó la información correspondiente a los hidrógramas generados previamente mediante el software HEC-HMS en el marco del informe Hidrología e Hidrogeología, por último se seleccionaron las celdas que simulan los puntos de salida del flujo. Ilustración 9 e Ilustración 10.

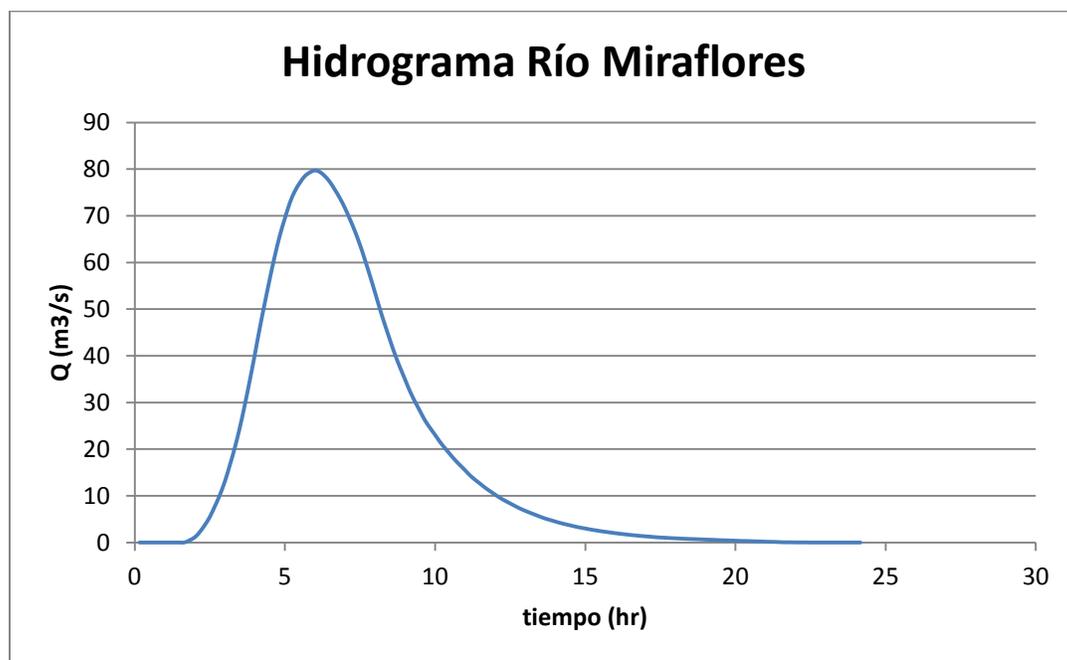


Ilustración 9 Hidrograma Ingresado para el Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

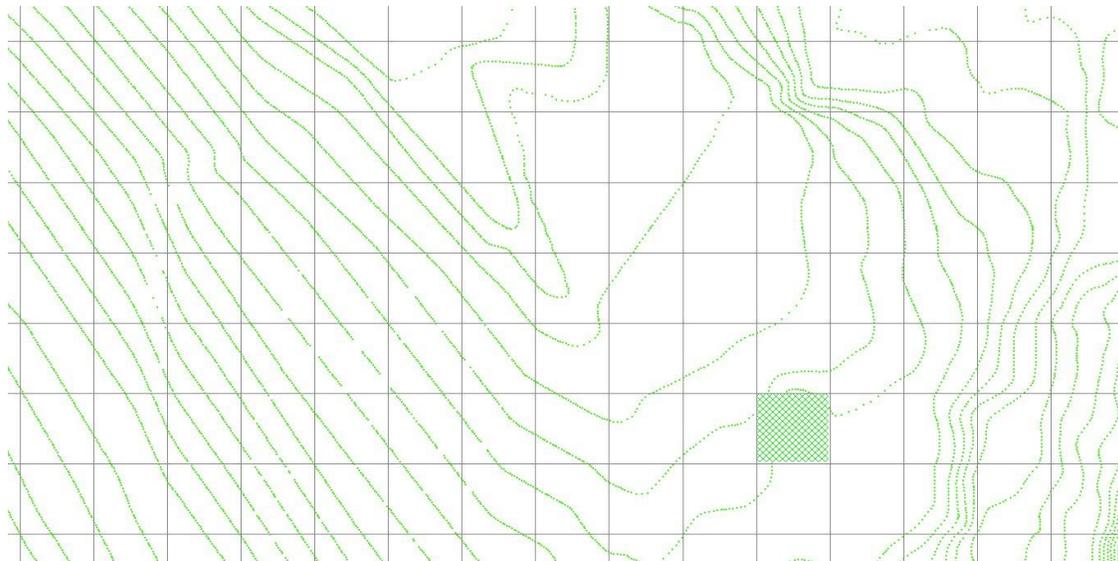


Ilustración 10 Acercamiento celda que contiene el hidrograma del Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

- Simulación

Para realizar la simulación del modelo, se debe ingresar a la opción Run FLO-2D que se encuentra en el menú File, esta acción abre una ventana con diferentes opciones de simulación, en este caso particular, se define el tiempo de modelación (horas), el tiempo del paso de simulación (horas), y, si se desea realizar un seguimiento gráfico o mediante una tabla; el último paso es seleccionar la opción de correr el modelo guardando los archivos. e Ilustración 12.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	154

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

FLO-2D Control Variables

Time Control and Plot Variables:

Simulation Time (hrs):

Output Interval (hrs):

Graphics Display: Text Screen
 Detailed Graphics

Metric Backup File

Global Data Modification:

n-value Adjustment: Floodplain Limiting Froude No:

Flow Depth for Depth Duration Analysis: Shallow Flow n-value:

Bulking Concentration: Encroachment Depth:

Area Reduction Factor:

System Component Switches:

Main Channel Area Reduction Factors (ARF)

Streets Multiple Channels (Fill and Gullies)

Levees

Floodplain Display Options:

Print Options:

Create Supercritical Output File

Physical Processes Switches:

Rainfall Infiltration Evaporation

MODFLO-2D Modelling

Volume Rating Tables

EPA-SWMM

Channel Display Options:

Check "Main Channel" to activate "Channel Print Options"

Channel Print Options:

Numerical Stability Parameters:

Surface Detention:

Percent Change in Flow Depth:

Dynamic Wave Stability Coefficient:

Courant Numbers:

Floodplain:

Channel:

Street:

Change Accelerator Rate:

Animate Flow within GDS

Conveyance Structure Switches:

Hydraulic Structures

Floodway Analysis

Debris Basin

Graphics Display:

Select "Detailed Graphics" in "Time Control and Plot"

Update Time Interval (hrs):

Ilustración 11 Ventana de Simulación Modelo FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

VOLUME CONSERVATION					
Pause	Zoom	Close Zoom Window	Exit		
NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS) INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW) SIMULATION TIME AVERAGE TIMESTEP VOLUME CONSERVATION (HOURS) (SECONDS) (CU METERS) PERCENT OF INFLOW					

Ilustración 12 Tabla de Simulación FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

4.3.5 Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo de inundación en FLO-2D se pueden observar a través del módulo gráfico denominado Mapper++, el cual se encuentra en el menú File (Ilustración 13).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	155

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

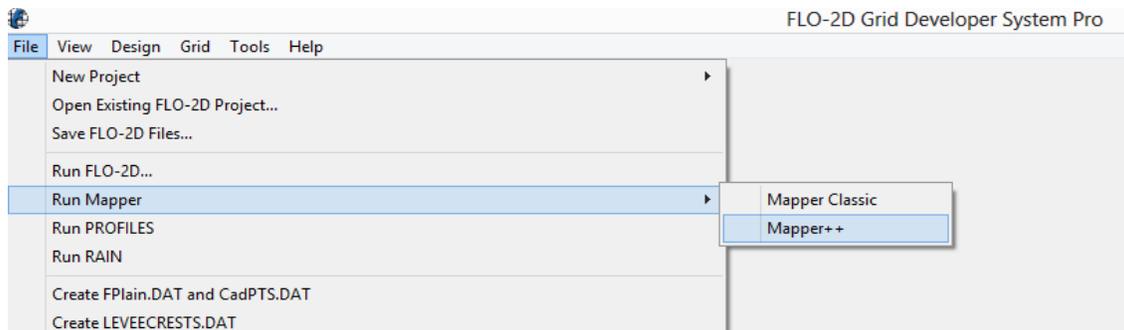


Ilustración 13 Proceso para cargar el módulo Mapper++ Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

Una vez se encuentra cargado el módulo se procede a buscar el proyecto creado en el paso anterior (Ilustración 14); a partir de éste, se pueden graficar los diferentes resultados (velocidad Ilustración 15) Solicitación (profundidad del flujo) de inundación -Ilustración 16, entre otros), cada uno de estos puede ser exportado como un archivo tipo shapefile (Ilustración 17), de manera que se pueda manejar en un SIG y adecuar a otros mapas específicos de la región analizada.

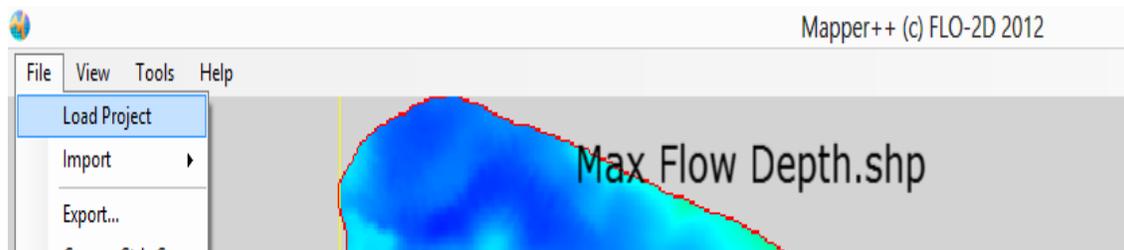


Ilustración 14 Proceso de carga modelo generado en FLO-2D Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	156
Fecha: 01/04/2015					

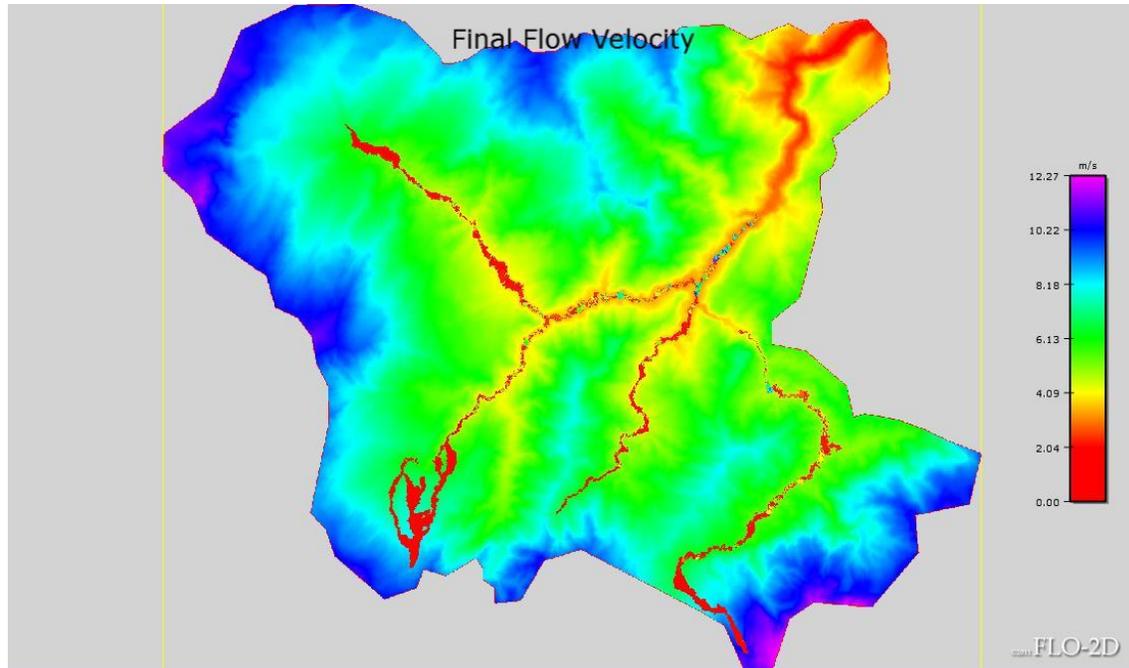


Ilustración 15 Velocidad generada en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

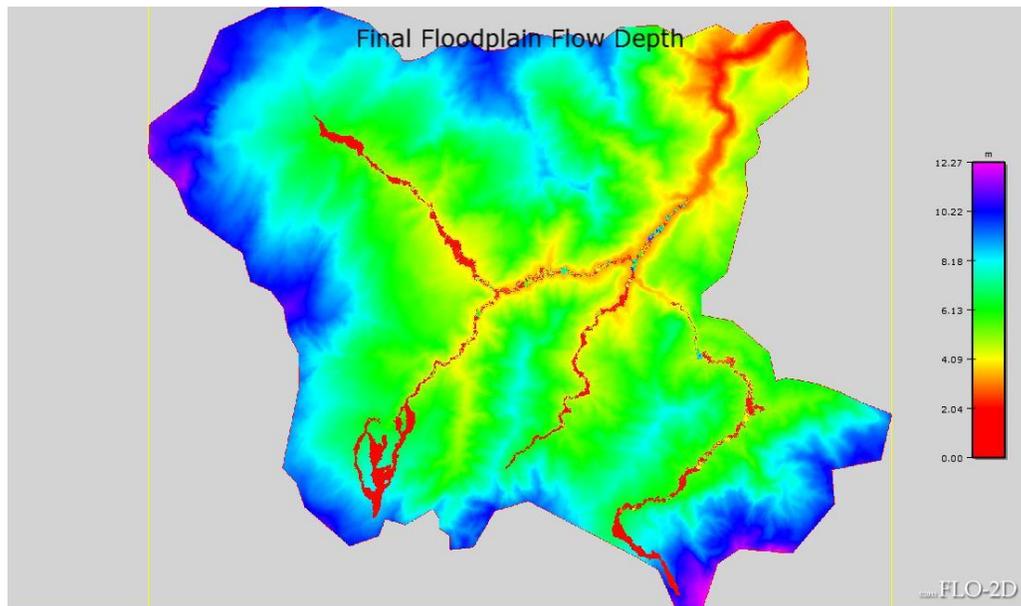


Ilustración 16 Solicitación (Profundidad de flujo) simulada en FLO-2D (Cuenca Río Miraflores) Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	157
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

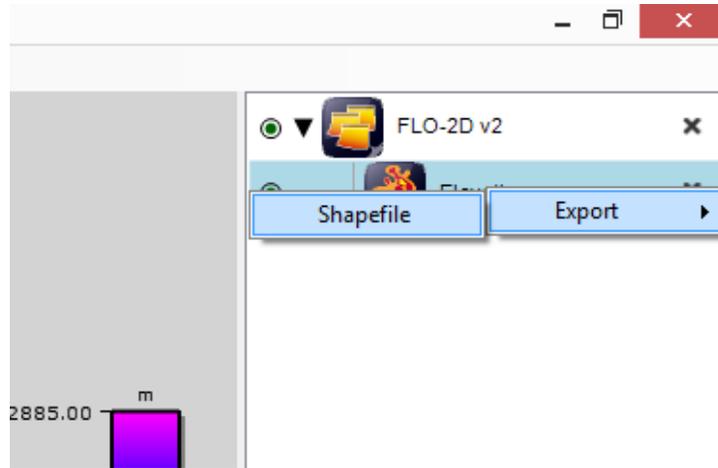


Ilustración 17 Acercamiento indicando proceso para convertir a shapefile. Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

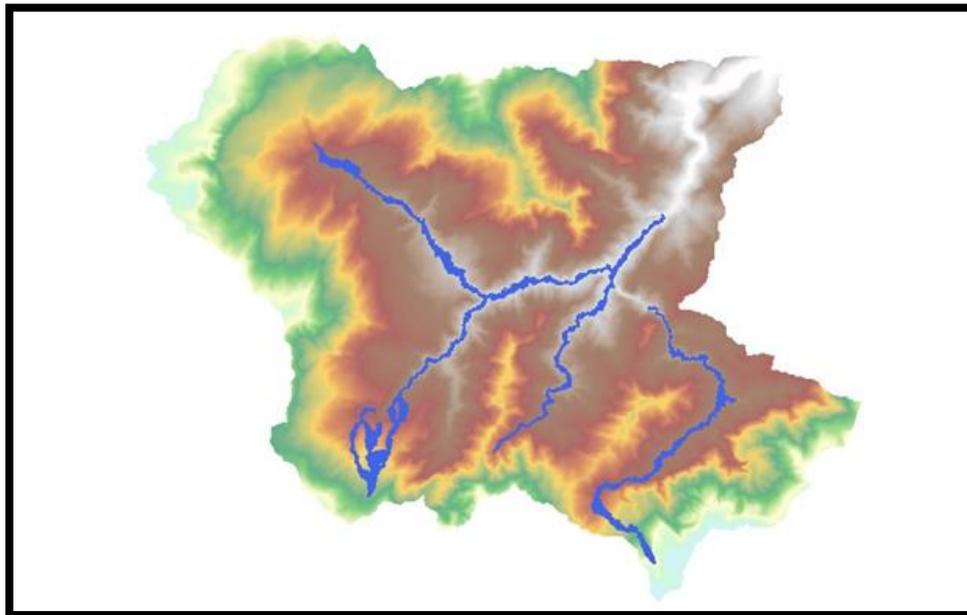


Ilustración 18 Mancha de Inundación obtenida en FLO-2D y presentada en ArcGIS (de fondo el Modelo de Elevación Digital) – Cuenca Río Miraflores Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

Los resultados se muestran en los planos anexos de Velocidad de Flujo y, Solicitación (Profundidad de Flujo).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	158

4.3.6 Análisis de resultados

La topografía y el volumen de flujo son dos razones que influyen en los resultados obtenidos, debido a que si se combinan estos parámetros se puede intuir comportamientos diferentes en las corrientes, i.e. si las pendientes son importantes el comportamiento con volúmenes altos es diferente al obtenido con volúmenes bajos (mayor velocidad, mayor energía de arrastre, entre otros).

Cabe resaltar que para el periodo de retorno de 2 años, muchas cuencas no presentaron zonas de inundación importantes, es decir, no presentan desbordamientos en sus cauces naturales de manera notable (área de influencia), ni en su profundidad (valores alrededor de los 15 cm); las cuencas de los Ríos Gazajuyo y Gasamumo presentan en este mismo periodo de retorno en la zona cercana a sus respectivas desembocaduras, un incremento en la profundidad cercano a los 30 cm por lo que al presentarse caudales mayores (en periodos de retorno altos) serán zonas que deberán monitorearse con especial atención. (Ver Ilustración 19)(Ver anexo 1 Planos, Amenaza Por Inundación, AMENAZA_POR_INUNDACION_2ANOS, GE333-CPG-PS1G-AI2-001-00)

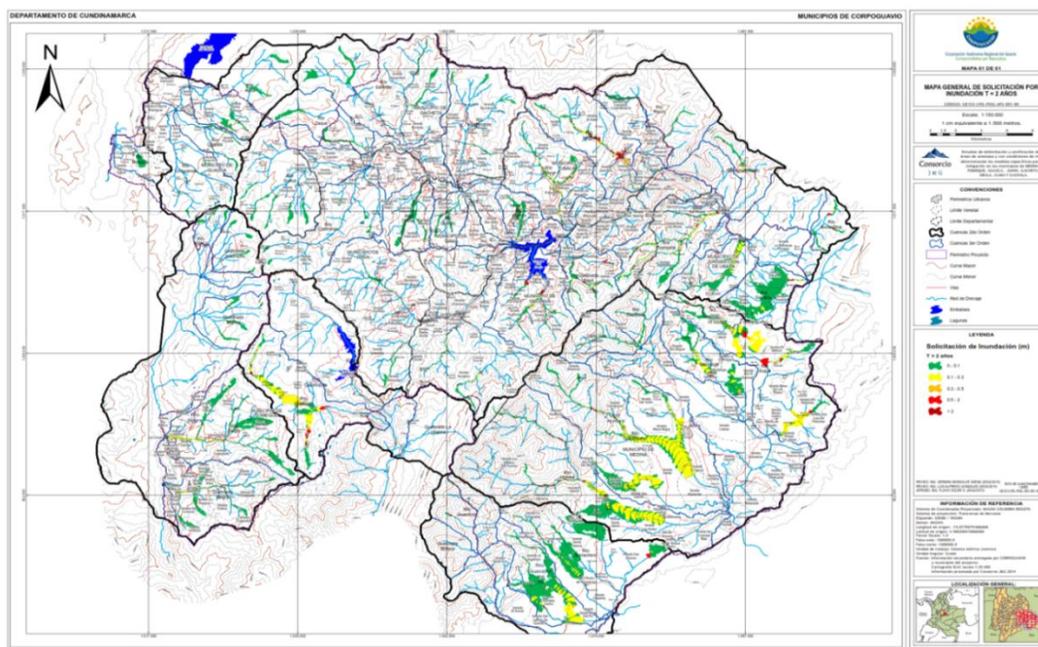


Ilustración 19. Mapa general de solicitud por inundación – PR_2 años.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	159
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Respecto al periodo de retorno de 20 años, se observa de manera general que la profundidad aumenta a valores alrededor de los 30 cm y zonas de inundación más amplias; en particular se destacan: la zona de la cuenca 24 (Río Gazajujo) es muy amplia a medida que se unen sus diferentes brazos o afluentes; la cuenca del Río Gazaunta presenta valores de profundidad de inundación superiores a los mencionados anteriormente en la zona aguas debajo de la unión de los brazos principales del río; en la cuenca del denominado Caño San Jesús hay un aumento en la profundidad de inundación hasta los 40 cm aproximadamente en la zona de confluencia de los brazos; la hoya correspondiente al Río Gusamumo presenta en la zona aguas abajo del brazo derecho profundidades cercanas a los 70 cm; en la cuenca del Río Humea la profundidad media es cercana a los 40 cm; en la hoya del Río Piri se presentan zonas de inundación extensas aunque poco profundas, pero cerca de la unión de los dos brazos hay un aumento de la profundidad hasta los 60 cm; dentro de la cuenca de las corrientes Guajaricito Borrachero y Guajaray se presentan inundaciones extensas y profundidades alrededor de los 30 cm; estas descripciones hacen notar que la región más susceptible a inundaciones la comprende el municipio de Medina, en los planos de topografía se pueden observar cambios importantes donde existe una zona de pendientes medias al norte, y zonas de pendientes suaves (casi llanuras) en las confluencias y desembocaduras de los mismos. (Ilustración 20) (Ver anexo 1 Planos, Amenaza Por Inundación, AMENAZA_POR_INUNDACION_20ANOS, GE333-CPG-PS1G-AI20-001-00).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	160

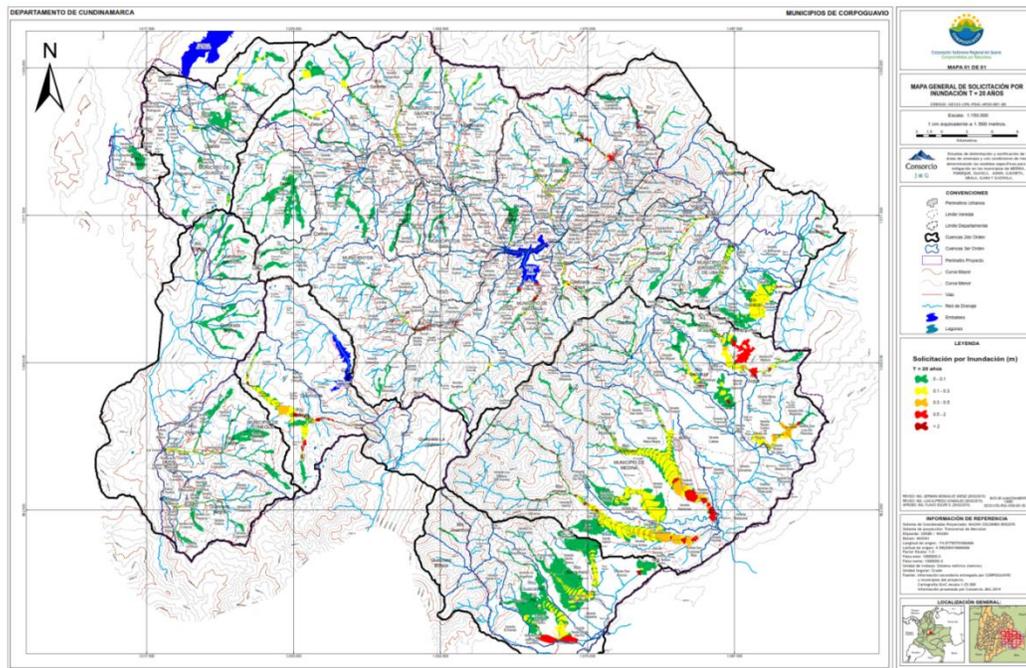


Ilustración 20. Mapa general de solicitud por inundación – PR_20 años.

Para el periodo de retorno de 100 años (el más crítico pero también el menos probable dada su periodicidad), la extensión de las áreas afectadas es mucho mayor (i.e. el volumen de flujo que puede transitar por los cauces se excede notablemente), al igual que la profundidad media que se presenta (60 cm); en particular las corrientes críticas son: el Río Sueva contiene una zona muy amplia de inundación en su brazo izquierdo con profundidades alrededor de 15 cm; en la cuenca del Río Miraflores se presentan zonas con inundaciones cercanas a los 80 cm, principalmente en las uniones de los diferentes brazos; en la Quebrada El Calam cerca de su desembocadura hacia el Río Guavio la profundidad aumenta hasta los 90 cm; en el Río Gazajujo se visualiza una región muy amplia de inundación con profundidades hasta de 25 cm, mientras que en la zona aguas abajo la profundidad aumenta hasta 70 cm; la profundidad en la cuenca del Río Gusamumo aumenta hasta valores cercanos a los 90 cm en las zonas más planas; en la hoya del Río Humea la zona aguas abajo presenta profundidades hasta de 70 cm; en la cuenca del Río Piri se presentan zonas muy amplias de inundación en todos sus afluentes y, aguas abajo presenta una profundidad cercana a 1.2 m; en la hoya correspondiente a las corrientes Guajaricito,

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	161

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Borrachero y Guajaray, las zonas de inundación se presentan en el área más plana e influye en gran porcentaje de la topografía con profundidades entre 30 y 40 cm; en estas descripciones se ratifica que la región más susceptible a la amenaza por inundación es Medina por las razones anteriormente expuestas, se deben monitorear las corrientes mencionadas principalmente aguas abajo y en época de lluvia para generar las alertas que sean necesarias. (Ilustración 21) (Ver anexo 1 Planos, Amenaza Por Inundación, AMENAZA_POR_INUNDACION_100ANOS, GE333-CPG-PS1G-A11-001-00)

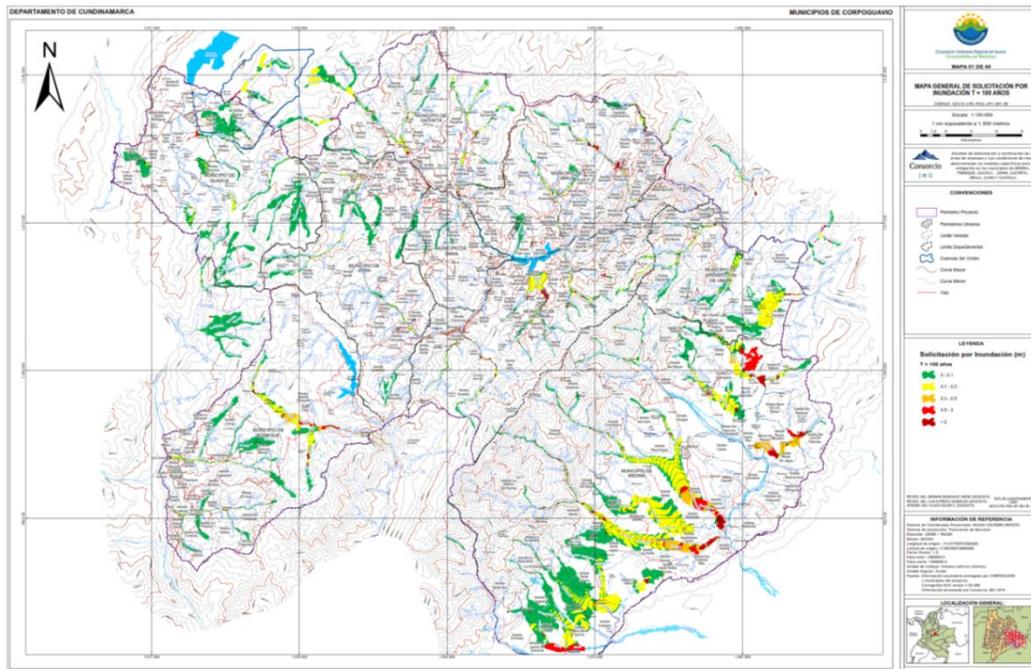


Ilustración 21. Mapa general de solicitud por inundación – PR_100 años.

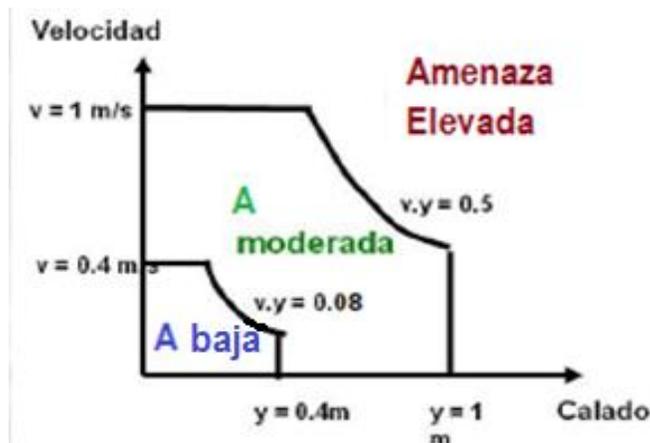
4.4 DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA

El nivel de amenaza se evaluará de acuerdo a las normas de la Agencia Catalana del Agua la cual lo clasifica en tres niveles; Nivel de amenaza Baja, Moderada y Elevada. Para esto se toma la siguiente gráfica:

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 162
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Ilustración 22 Evaluación de Amenaza (Extraída de la Agencia Catalana del Agua)



Fuente: CONSORCIO J&G, 2014

Con este criterio de evaluación y tomando los datos de velocidad y profundidad de la lámina de agua (Calado) obtenidos en la modelación hidráulica, el mapa de velocidades y la mancha de Inundación, se obtiene el nivel de amenaza que se presenta a lo largo de la zona de estudio para las diferentes corrientes.

El nivel de amenaza está en función tanto de la intensidad como de la probabilidad de la inundación. La intensidad de la inundación está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación. Por eso, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes pero menos dañinos. El nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia), como se muestra en la Tabla 55. El mapa de amenaza se basa en tres colores para definir el nivel de amenaza: nivel alto (rojo), nivel medio (Amarillo) y nivel bajo (Verde).

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	163

	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 55 Nivel de amenaza por inundaciones

INTENSIDAD	Alta			
	Media			
	Baja			
FRECUENCIA		Alta	Media	Baja
Periodo de Retorno		2	20	100
Probabilidad de Ocurrencia		50%	5%	1%

Los colores de los mapas se traducen en áreas con características específicas de amenaza potencial, como se muestra en la Tabla 56.

Tabla 56 Categorización de Amenaza por Fenómeno de Inundación

GRAVEDAD RELATIVA	PERIODO DE RETORNO	DESCRIPCIÓN
I Bajo	100	El evento de inundación puede ser concebible pero únicamente bajo circunstancias excepcionales. Los eventos ocurrirían con un período de retorno mayor o igual a 100 años.
II Medio	20	La ocurrencia de un fenómeno de inundación durante el de término un tiempo de vida es poco probable, pero es posible que ocurra bajo condiciones adversas. Los eventos ocurrirían con un período de retorno de 20 años.
III Alto	2	El fenómeno de Inundación puede ser inminente. Los eventos ocurrirían con un período de retorno menor a 2 años.

La intensidad está definida en términos de la profundidad máxima del agua y el producto de la máxima velocidad por la máxima profundidad. Para el caso de las inundaciones las intensidades se definen en la Tabla 57 .

Tabla 57 Intensidad de la inundación según la Agencia Catalana del Aguas

Intensidad de la inundación	Profundidad máxima H (m)		Producto de la profundidad máxima h y la velocidad máxima V (m ² /s)
Alta	H > 1	ó	V*H > 0.5
Media	H > 0.4 < H < 1	ó	0.08 < V*H < 0.5
Baja	0.0 < H < 0.4	y	0.0 < V*H < 0.08

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	164

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

para proyectos de mitigación contra los efectos negativos de las inundaciones, con el fin de mejorar las condiciones ambientales de las cuencas y el bienestar de sus habitantes., (3) planteamiento y evaluación de diferentes medidas estructurales para fines de prevención o mitigación de los efectos de las inundaciones, (4) diseño e implementación de sistemas de alertas tempranas.

Se encontró que las zonas más susceptibles a sufrir inundaciones están en los municipios de Ubalá y Medina, en la área de influencia de los ríos Humea, Guacavia, Borrachero, Piri, Gazamumo, Gazaduje, Jagua, Gazadujo, y la quebrada El Calam, se encontró que para un periodo de retorno de dos (2) años las profundidades de inundación oscilan entre 0 y 0.5 metros, principalmente, en algunas zonas afectadas por los ríos Borrachero, Piri, Humea y Jagua, las inundaciones pueden alcanzar profundidades alrededor de los 2 metros, en la vereda Gazaduje pueden presentarse profundidades de inundación mayores a dos (2) metros, al igual que las veredas Santa Rosa, El santuario afectadas por el río Negro y el sector El Páramo jurisdicción del municipio de Fómeque.

En el modelo de análisis para un periodo de retorno de 100 años se evidencia un aumento en el área de afectación y en las profundidades de inundación, en ciertas zonas, se encontró que las profundidades de inundación oscilan entre 0 y 0.5 metros, principalmente, en menor proporción entre 0.5 y 2 metros, pueden presentarse profundidades de inundación mayores a dos (2) metros en las veredas Gazaduje, San francisco de Gazaduje, Alto el quemado, al igual que las veredas Santa Rosa, El santuario afectadas por el río Negro, vereda La Playa afectadas por el río Rucio, vereda la floresta afectada por el río Trompeta, vereda providencia (río Miraflores), vereda Santa Elena (río Guavio) jurisdicción municipio de Gachalá y el sector El Páramo jurisdicción del municipio de Fómeque.

En términos generales un 90% del área de estudio afectada por este fenómeno experimentara profundidades de inundación entre 0 y 0.5 metros, independientemente de los periodos de ocurrencia y áreas de afectación.

Los niveles de amenaza por eventos de inundación para las cuencas hidrográficas que afectan la zona de estudio, se discriminan aproximadamente así:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	166

 Consorcio J & G	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	 Gobernación de CUNDINAMARCA  Construye Paz  Corporación Autónoma Regional del Guavio <small>Comprometidos por Naturaleza</small>
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 58 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por inundación.

Amenaza Inundación Total		
Amenaza	Área (Ha)	%
Alta	41955.0	63.58%
Media	14502.4	21.98%
Baja	9533.8	14.45%
Total	65991.2	100.00%

De acuerdo a lo anterior un 63.58% de la zona afectada por inundaciones se encuentra nivel de amenaza alto, 21.98% en medio y 14.45% en bajo.

Teniendo en cuenta la distribución geográfica del área de estudio, correspondiente a los municipios jurisdicción de la corporación autónoma regional del Guavio y en consecuencia con las manchas de inundación resultado del análisis regional a escala 1:25.000, a continuación se relacionan las áreas y porcentaje de cada nivel de amenaza por fenómeno de inundación, para cada municipio (Ver Tabla 59 y Tabla 60).

Tabla 59 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por inundación área de estudio.

Amenaza Inundación Total		
Amenaza	Área (Ha)	%
Alta	35808.3	63.52%
Media	12671.8	22.48%
Baja	7894.6	14.00%
Total	56374.7	100.00%

Tabla 60 Áreas de cada nivel de amenaza por fenómeno de inundación por municipio.

Área (Ha)	Amenaza Inundación Total Por Municipio			Total
	Alta	Media	Baja	
Fómeque	4277.32	1212.77	1053.22	6543.31
Gachalá	2192.67	784.74	749.57	3726.98
Gachetá	1529.41	452.01	449.36	2430.78
Gama	507.55	132.09	144.50	784.14
Guasca	4237.66	1162.30	787.49	6187.45
Junín	2212.45	549.33	551.42	3313.20
Medina	16823.23	6966.74	2935.78	26725.76
Ubalá	4027.97	1411.86	1223.23	6663.05
Total (Ha)	35808.26	12671.83	7894.57	56374.66

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	167
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Área (Ha)	Amenaza Inundación Total Por Municipio			Total
	Alta	Media	Baja	
Total (%)	64%	22%	14%	100%

El estudio detallado del análisis por inundación a nivel local, para municipios y centros poblados podrá verificarse en el Volumen C, Tomo I, II, III, IV, V, VI, VII y VIII, en cumplimiento de los términos contractuales.

5. AMENAZA REGIONAL POR AVENIDAS TORRENCIALES

5.1 DEFINICIONES

Las avenidas torrenciales, en ocasiones denominadas crecientes, avalanchas, crecidas, o torrentes, son una amenaza en cuencas de alta montaña, debido a sus características puede causar grandes daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas.

Estos fenómenos se originan comúnmente en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas presentan fuertes vertientes por efecto de fenómenos hidrometeorológicos intensos cuando en un evento de lluvias se superan valores de precipitación pico en pocas horas. Esto genera la saturación de los materiales de las laderas facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	168

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea & Vásquez, 1996), (Rendón, 1997); (OSSO – La Red, 2003); (Castro, 2007). En otros casos puede que no halla desgarres en las vertientes originados por la lluvia, simplemente el material que ya se encontraba en el cauce con mucha anterioridad es arrastrado aguas abajo por la creciente.

Aunque la duración de estos eventos varía entre pocos minutos a varios días, su rápida manifestación y altas velocidades le confieren una alta peligrosidad debido a que no dan tiempo de reacción a las personas que se encuentran en el área de influencia del evento, generando así situaciones desastrosas con pérdidas de vidas humanas y destrucción de viviendas, estructuras, cultivos, carreteras, etc. (Vásquez, 1993); (Urrea & Vásquez, 1996); (Flórez & Suavita, 1997); (Smith & Ward, 1998); (Castro, 2007).

Hidráulicamente un flujo torrencial se caracteriza por contener un alto porcentaje de material sólido (que incrementa considerablemente la viscosidad y densidad del flujo, disminuyendo su velocidad), recorre cauces de altas rugosidades y altas pendientes.

Cuando se presentan avenidas torrenciales las corrientes aumentan la capacidad para transportar sedimentos gruesos, donde además se pueden incorporan restos vegetales y lodo con una zona de influencia amplia de gran potencial destructivo un área afectada que se ubica paralelamente al flujo principal y otra que corresponde a la zona donde grandes depósitos de flujos de escombros se acumulan. Estos eventos son impredecibles y ocurren de manera rápida, en periodos de tiempo muy cortos, con largos periodos de retorno para un mismo lugar y presentan una distribución temporal y espacial errática (Durán, Elízaga, Garzón, Lamas, & Prieto, 2008); (Piedrahíta, 1996).

Las avenidas torrenciales destructoras se presentan cuando se da, al menos, la confluencia de los siguientes cuatro factores (Caballero & Mejia, 1988):

- Cuencas con gradientes altos y áreas medias, lo que implica rápidos tiempos de concentración y altas velocidades de las corrientes.
- Precipitaciones de gran intensidad, concentradas sobre la cuenca o parte importante de ésta.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	169

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

- Disponibilidad de material fino granular tipo limos y arcillas que puedan ser puestos en movimiento por la creciente. Las fuentes de estos materiales pueden ser movimientos en masa o focos de erosión existentes, grupos de movimientos en masa generados durante el mismo evento climático, material depositado en las vertientes por procesos constructivos, cortes, explanaciones, llenos y escombreras entre otros.
- Cambios bruscos en el gradiente de la quebrada, lo que facilita la acumulación de los sedimentos transportados desde la cuenca alta o media. En algunos casos, puede darse acumulación de sedimentos por el ensanchamiento abrupto del cauce mayor, lo que generalmente ocurre unido al cambio de gradiente al que ya se hizo referencia.

Flujos de detritos e inundaciones

Los movimientos en masa se refieren en términos generales a todo desplazamiento ladera abajo de material geológico debido principalmente a la fuerza de la gravedad. Esto, por supuesto, involucra un conjunto de tipos de movimientos con diversas características que abarcan desde la simple caída de un bloque de roca hasta movimientos lentos o rápidos similares a los de un fluido. Sin embargo, no hay un consenso universal sobre la clasificación de los mismos y es así como en la literatura especializada se encuentran diversos términos para referirse a ellos. No obstante, se puede decir que uno de los sistemas más ampliamente aceptados por los especialistas en Ciencias de la Tierra es la clasificación propuesta por Varnes en 1978, posteriormente actualizada por (Cruden & Varnes, 1996). En ella, los movimientos se clasifican principalmente de acuerdo con el mecanismo del movimiento y los materiales involucrados. Entre estos mecanismos se cuentan los movimientos tipo flujo, llamando así aquellos que presentan una deformación interna significativa del material.

Sin apartarse del esquema general de Varnes, (Hung, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001) discuten el caso de los flujos y con base en los atributos más importantes de este tipo de movimientos proponen una clasificación que se considera apropiada para los propósitos del proyecto y constituye el marco de referencia conceptual en lo que tiene que ver con la mecánica de los movimientos en masa tipo flujo.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISÓ	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	170

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

La clasificación de (Hungry, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001) tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Mecanismo del movimiento
- Propiedades del material
- Velocidad del movimiento
- Otros atributos

Dando lugar a las siguientes definiciones, en orden alfabético:

Crecida de detritos (Debris flood), flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal o cauce. Este tipo de crecida puede transportar una cantidad de sedimentos semejante a la de un flujo de detritos, pero en este caso los sedimentos son arrastrados por la fuerza tractiva del agua y por lo tanto el caudal pico es comparable al de una crecida de agua multiplicada por un factor entre 1 y 2. De esta manera, la capacidad de daño de una crecida de detritos es similar a la de una inundación y los objetos impactados quedan enterrados o rodeados por los detritos pero frecuentemente sin sufrir daño. Sin embargo, pueden ocurrir eventos excepcionales por descargas de agua inusualmente altas, tales como las producidas por el rompimiento de presas (naturales o artificiales) y el deshielo de capas de hielo de volcanes.

Deslizamiento por fluidificación (flow slide), flujo muy rápido o extremadamente rápido de material con estructura ordenada o desordenada, en taludes de pendiente moderada que involucra un exceso de presión de poros o licuación del material en la zona donde se origina el movimiento en masa. De acuerdo con el tipo de material puede denominarse más específicamente como: deslizamiento por fluidificación de arena, deslizamiento por fluidificación de limo, deslizamiento por fluidificación de detritos o deslizamiento por fluidificación de roca débil.

Deslizamiento por fluidificación de arcilla (Clay flow slide), flujo muy rápido a extremadamente rápido de arcilla sensible licuada con un contenido de agua igual o muy cerca al de su estado original. Este movimiento se inicia a partir de fallas rotacionales múltiples retrogresivas. En ciertas arcillas la fluidificación se presenta por colapso de la estructura interna del suelo, como es el caso clásico en las llamadas quick clays o arcillas extrasensibles.

Flujo (Flow), movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido pero que en principio se origina a partir

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	171

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

de otro movimiento como un deslizamiento o caída. (Hungry, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001), clasifican a estos movimientos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles.

Flujo seco (Dry –sand, silt, gravel, debris- flow), movimiento tipo flujo de material granular con estructura ordenada o desordenada, suelto, seco o húmedo, durante el cual no hay un exceso de presión de poros significativa. De acuerdo con el tipo de material puede denominarse como flujo de arena seco, flujo de limo seco, flujo de grava seco o flujo de detritos seco.

Flujo canalizado Tipo de movimiento en masa en el cual el material desplazado transita en su mayor parte confinado a lo largo de un cauce o canal.

Flujo no canalizado Tipo de movimiento en masa en el cual el material desplazado transita a lo largo de una ladera sin confinamiento lateral.

Flujo de detritos (debris flow), flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados no plásticos que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado (Índice de plasticidad menor al 5% de arenas y fracciones más finas). Este tipo de evento se distingue también porque el agua del cauce se incorpora al cuerpo del flujo de detritos incrementando su contenido de agua, el confinamiento lateral que además de ayudar a mantener la profundidad del flujo facilita un cierto tipo de ordenamiento de las partículas sólidas y el desarrollo de oleaje. El ordenamiento se refiere a que los clastos más grandes tienden a quedar cerca de la superficie del flujo, lo que se conoce como gradación inversa. Por otra parte, el caudal pico que presentan estos flujos puede ser hasta 40 veces mayores que los que causan una inundación. Otra característica que distingue a estos flujos es la forma de la depositación del material sólido: cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos son expulsados hacia los lados para formar una especie de jarillones y el frente es sobrepasado por el material fino que viajaba tras ellos hasta detenerse tomando una forma lobulada gruesa.

Flujo de lodo (mud flow), flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad > 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al de flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica

<p>VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO LAG</p>	<p>REVISÓ HBC</p>	<p>AVALÓ FSS</p>	<p>APROBO UT-PGR</p>	<p>Pág. 172</p>
---	------------------------	-----------------------	----------------------	--------------------------	---------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por fluidificación de arcilla en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento mientras la fluidificación ocurre por licuación in situ sin un incremento significativo del contenido de agua.

Flujo de tierra (earth flow), movimiento intermitente, rápido o lento, de tierra arcillosa plástica (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). El mecanismo dominante en este caso es el deslizamiento a un nivel de resistencia igual a la residual.

Flujo de turba (peat flow), movimiento lento a muy rápido en forma de flujo de turba saturada y que involucra una alta presión de poros.

En las anteriores definiciones se hace la distinción de los diferentes materiales de acuerdo con la siguiente descripción:

Detrito(s) (debris), material suelto con estructura desordenada y de baja plasticidad, originado por procesos de movimientos en masa (coluviones), meteorización (suelo residual), transporte glacial (tilita, morrenas), volcanismo explosivo (depósitos piroclásticos), o desechos antrópicos desordenados tales como estériles de minería. Los detritos también pueden contener una proporción significativa de material orgánico, incluyendo troncos y ramas de árboles o cualquier otra cubierta orgánica, (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). En la clasificación de (Varnes, 1978) y (Cruden & Varnes, 1996), se llama así a un material que contiene una proporción significativa de materiales gruesos en donde entre un 20% y un 80% de las partículas son mayores a 2 mm y el resto menor a 2 mm; en este caso el término se utiliza para el material involucrado en el movimiento pero antes del desplazamiento.

Lodo (mud), suelo arcilloso blando, remoldeado, cuya matriz (arena y finos) es significativamente plástica (Índice de Plasticidad > 5) y cuyo Índice de Liquidez es mayor a 0.5 cuando se encuentra en movimiento.

Tierra (earth), a) Suelo para ingeniería con el 80% o más de las partículas que lo componen de tamaño menor a 2 mm (Cruden & Varnes, 1996), b) Material producto de la meteorización de arcillas duras y de rocas arcillosas como lodolitas, shales y ciertas rocas metamórficas, con una consistencia más cerca del Límite Plástico (LP) que del Líquido (LL) y un Índice de Liquidez generalmente menor a 0.5 (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001).

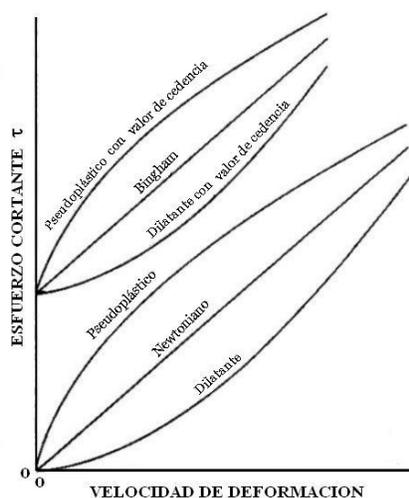
<p>VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO LAG</p>	<p>REVISÓ HBC</p>	<p>AVALÓ FSS</p>	<p>APROBO UT-PGR</p>	<p>Pág. 173</p>
---	------------------------	-----------------------	----------------------	--------------------------	---------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Por su parte en la clasificación de (Pierson & Costa, 1987), tanto las inundaciones como los flujos están clasificadas en función de la concentración de sedimentos que lleva el flujo. En esta clasificación, el comportamiento del flujo depende de sus propiedades reológicas, es así como las inundaciones con poca concentración de sedimentos se comportan como un fluido Newtoniano, mientras que los flujos a medida que aumenta su concentración de sedimentos se comportan más como un material no Newtoniano.

La Figura 22 muestra las curvas de flujo para un líquido idealizado y para cuerpos reológicos plásticos; si hablamos de flujo, este podría ser definido como la deformación continua e irreversible de un material geológico que ocurre en respuesta a un esfuerzo aplicado; en la mayor parte de las situaciones la fuerza aplicada es la gravedad actuando usualmente como esfuerzo cortante y el material es alguna mezcla de partículas sólidas (rocas, suelo, detritos orgánicos), agua y aire.

La clasificación propuesta por (Pierson & Costa, 1987) hace una distinción entre los diferentes tipos de flujo usando una matriz bidimensional basada en la velocidad media del flujo y la concentración de sedimentos; se basa en el entendimiento de que la respuesta reológica de una mezcla de agua – sedimentos para una tasa de deformación dada es gobernada principalmente por la concentración de sedimentos (o contenido de agua) y es afectada en menor proporción por la distribución de tamaños de los sólidos y las propiedades químicas de las partículas.



VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	174

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Figura 22 Curvas de flujo para un líquido idealizado y cuerpos reológicos plásticos, con los nombres de los modelos de flujo indicados. Los líquidos no exhiben resistencia al corte. Los cuerpos plásticos comienzan a deformarse solo después de que un esfuerzo de cedencia, s_c , es alcanzado (**Pierson & Costa, 1987**).

Para un área geográfica dada, la distribución del tamaño de partículas y las propiedades químicas podrían tender a ser más constantes que la concentración de sedimentos, por esta razón la concentración de sedimentos es considerado un parámetro más sensible y se eligió como la segunda variable para la matriz de clasificación (Figura 23); en el eje horizontal no se muestran números para la concentración de sedimentos excepto para agua pura (0%) y sedimentos secos (100%) debido a que los valores exactos dependerán de la composición granulométrica y la composición físico – química de las partículas. Las fronteras en el diagrama de clasificación son sólo aproximadas y también tienen un alto grado de inferencia, debido a que las mediciones en campo son muy pocas, entre más registros sean llevados a cabo, las fronteras serán mejor definidas. En este sistema de clasificación según la apariencia del flujo en campo se puede dividir en dos grupos:

Flujo Aparentemente Líquido: Cuando se observa esta condición en campo, dos tipos de flujo con concentraciones relativamente pequeñas de sedimentos son distinguidos en el sistema de clasificación:

- Flujo Canalizado (Streamflow): Definido como el flujo normal de agua con una concentración de sólidos lo suficientemente pequeña para que su comportamiento no sea afectado por la presencia de sedimentos en transporte, es un fluido Newtoniano.
- Flujo Hiperconcentrado (Hiperconcentrated Streamflow): A medida que la concentración de partículas suspendidas aumenta, se alcanza un punto en el cual dichas partículas empiezan a interactuar, cuando la interacción de partículas ocurre el fluido adquiere una resistencia a la cedencia y empieza a comportarse como un fluido no – newtoniano. Aunque el flujo hiperconcentrado fue definido inicialmente por Culbertson en 1964 como un flujo corriente el cual posee concentraciones entre el 40% – 80% en peso (20% - 60% en volumen) (Pierson & Costa, 1987) en su sistema de clasificación lo definen como una mezcla de agua y sedimentos que fluye, la cual posee una resistencia a la cedencia medible, pero que aún aparenta fluir como un líquido.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 175
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Flujo de Fluidos Plásticos: en este sistema son incluidos dos tipos de flujos con comportamiento plástico:

- **Flujo de Lodos (Slurry Flow o Mudflow):** A medida que la concentración de sedimentos aumenta en la mezcla, la resistencia a la cedencia se incrementará lentamente hasta que un punto de transición es alcanzado (frontera B, Figura 23); después de este umbral, la resistencia incrementará rápidamente; la transición que marca este umbral puede ser identificada por la línea continua de la Figura 24, allí se observa que el cambio en la tasa de incremento en la resistencia a la cedencia es más abrupto en mezclas gruesas que en mezclas finas, este incremento puede ser atribuido al principio de fricción interna, y a las fuerzas electroquímicas que aún pueden dominar en las mezclas ricas en arcilla.

En este aparte un flujo de lodos se define como una mezcla de agua – sedimentos que tiene la suficiente resistencia a la cedencia para exhibir un comportamiento de flujo plástico en el campo (esto es formar frentes lobulados y pendientes, diques laterales y llevar partículas tamaño grava o bloques en suspensión); como tal la mezcla está saturada, el agua en los poros es atrapada en algún grado por la estructura de los granos, y el índice de liquidez (en mezclas de grano fino la relación de humedad natural con el límite líquido del sedimento) es mayor que 1.0.

Cuando el contenido de limo y arcilla de la mezcla es relativamente alto o si la tasa de corte, el diámetro medio de granos, la densidad de los granos y contenido de agua son relativamente bajos, las fuerzas viscosas pueden dominar el comportamiento del flujo. Bajo esas condiciones el modelo plástico Bingham es elegido frecuentemente como la ecuación constitutiva para predecir el comportamiento del flujo; cuando las fuerzas viscosas dominan al flujo se le conoce como flujo de lodos viscoso (viscous slurry flow).

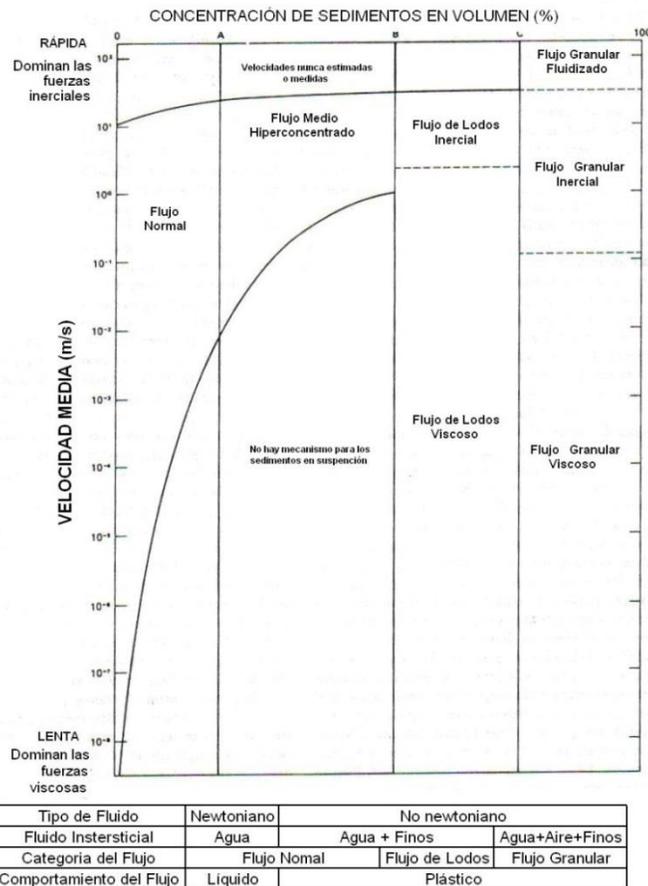
Cuando la viscosidad del fluido en los poros es relativamente baja y las tasas de corte, diámetro medio de granos, densidad y contenido de agua son altas, el efecto dominante de las fuerzas viscosas es reemplazado por fuerzas inerciales donde el momentum es transferido a través de la colisión de partículas; el flujo en el cual éste mecanismo es dominante se conoce

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	176

como flujo de lodos inercial (inertial slurry flow), en este caso el modelo del fluido dilatante puede ser usado para modelar el comportamiento.

- **Flujo Granular (Granular Flow):** El flujo granular comienza cuando la concentración de sedimentos del material se incrementa hasta el punto donde las presiones de agua de los poros no están más tiempo en exceso de presiones hidrostáticas (Frontera C, Figura 23), y el peso total de la masa granular que está fluyendo es soportada por el contacto grano a grano o por colisiones.

Un flujo granular se define cuando la concentración de sólidos es alta, la interacción directa entre granos individuales es frecuente y el comportamiento volumétrico es gobernado enormemente por las fuerzas entre partículas, llámense fricción o colisión.



	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Figura 23 Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua. Las fronteras verticales A, B, y C son umbrales reológicos y son función de la distribución granulométrica y de la concentración de sedimentos **(Pierson & Costa, 1987)**.

Cuando ocurre un flujo a bajas tasas de corte, el arreglo de partículas es fuerte, y los efectos inerciales de los granos son omitibles, se dice que el flujo es granular friccional (frictional granular flow); el flujo granular friccional abarca los regímenes de flujo macro –viscoso y cuasi – estático propuestos por Savage’s en 1984.

Cuando ocurre un flujo con moderadas tasas de corte, lo efectos de la inercia de los granos empiezan a dominar, pero si los efectos friccionales son aun significativos, se dice que el flujo es granular inercial (inertial granular flow) en este las colisiones entre los granos transfieren momentum entre partículas resultando en un esfuerzo dispersivo el cual es medible. Las masas de detritos que exceden el millón de metros cúbicos presentan altas tasas de corte con velocidades que varían desde 50 hasta 100 m/s, bajo esas condiciones la transferencia de momentum por las colisiones entre partículas determina el comportamiento del flujo, algunos de esos movimientos tales como avalanchas de detritos o los Sturztroms viajan grandes distancias en proporción a avalanchas de detritos más pequeñas, tales movimientos se denominarían flujos granulares inerciales rápidos.

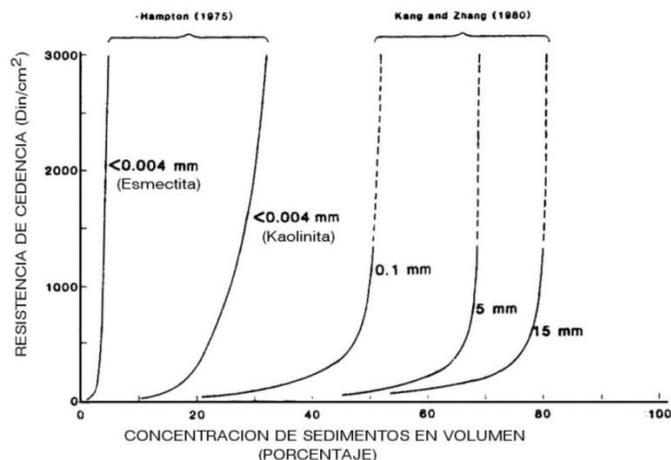


Figura 24 Resistencia a la cedencia de varias mezclas de sedimentos – agua (tamaño promedio de granos indicado) graficado contra concentración de sedimentos **(Pierson & Scott, 1985)**, la intersección de cada curva con las abscisas marca la transición de flujo normal a flujo hiperconcentrado (frontera A de la Figura 23). El incremento abrupto de la pendiente en cada curva, marca aproximadamente la transición de flujo hiperconcentrado a flujo barroso (frontera B de la Figura 23)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	178

Mientras las categorías en la Figura 23 son un enfoque para clasificar flujos sólo con base en el comportamiento reológico, éstas también pueden ser usadas para poner fronteras reológicamente basadas en términos de procesos geomorfológicos mejor conocidos; de esta manera se presenta la clasificación de la Figura 25; allí el término “debris flow” o flujo de detritos, parece ser el más indicado para los flujos de lodos, tanto en el rango inercial como en el rango viscoso, excepto para los flujos extremadamente lentos de regolito saturado, conocidos como soliflucción. Aunque el flujo de lodos viscoso frecuentemente llamado flujo de lodo (mudflow) es muy rico en material fino, la clasificación se basa en la tasa de movimiento y no en su composición, por lo que se considera adecuado incluirlo en esta categoría

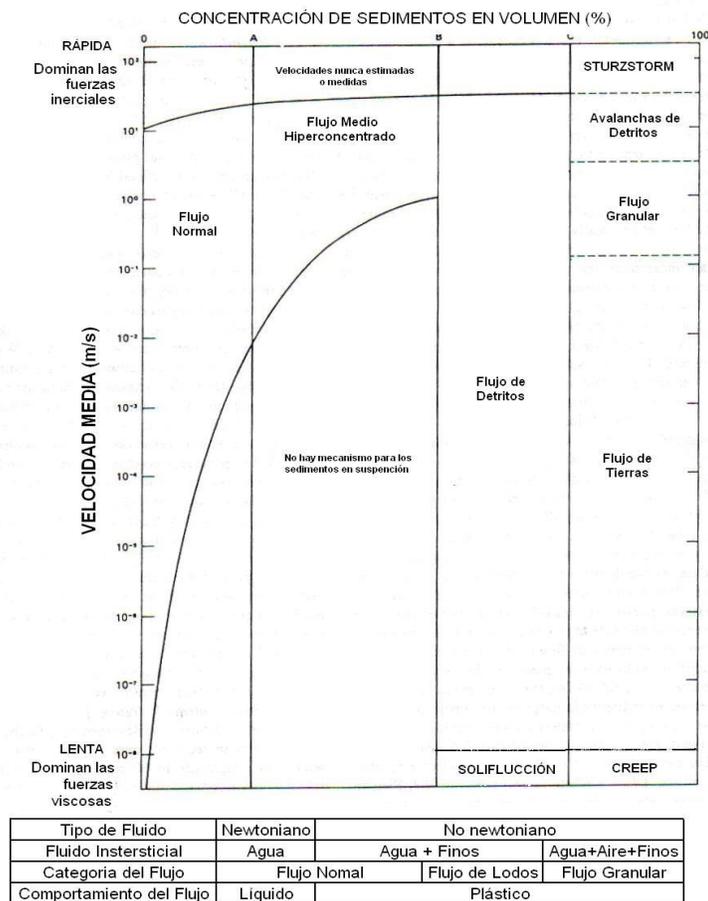


Figura 25 Nomenclatura apropiada para la clasificación reológica propuesta en la Figura 24 (Pierson & Costa, 1987)

(Cousot & Meunier, 1996) colocan a los flujos de detritos en un punto intermedio entre los deslizamientos y los flujos hiperconcentrados (carga de fondo intensa) debido a la transición de características bien definidas como celeridad, naturaleza y tipo de flujo; por ello a partir de un análisis donde comparan características de campo de los principales tipos de flujo y movimientos en masa en taludes de alta pendiente, proponen una clasificación general de movimientos en masa como una función de la fracción sólida y del tipo de material, esta clasificación se presenta en forma de elipse en la Figura 26. Los límites entre los diferentes movimientos en masa son sólo conceptuales y cualitativos, de hecho ellos pueden variar ampliamente dependiendo de la frontera específica, condiciones iniciales y propiedades físicas de los materiales. (Cousot, 1992), se ha propuesto criterios para algunos de esos límites: la transición de flujo de detritos a deslizamientos puede corresponder a la fracción sólida crítica y al tipo de material en el cual una fractura ocurre después de una deformación lo suficientemente grande; la transición de flujos hiperconcentrados a flujo de detritos podría corresponder a una fracción sólida crítica y tipo de material para el cual la caída de las partículas es omitible dentro del material durante un tiempo dado.

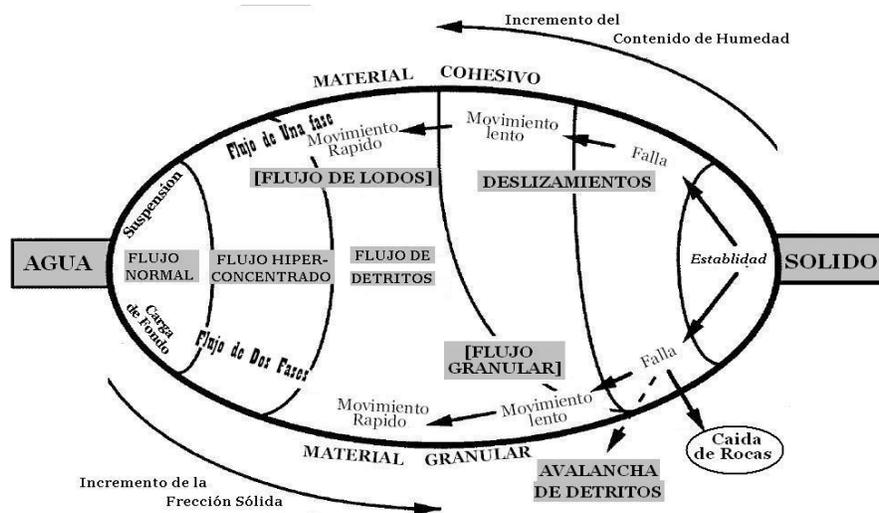


Figura 26 Clasificación de movimientos en masa sobre taludes como una función de la fracción sólida y el tipo de material (Cousot & Meunier, 1996)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	180
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Características de los flujos de lodo y detritos

Estas son características típicas de los flujos de detritos obtenidas de algunos registros y que fueron citadas en (Takahashi, 1981):

Las velocidades de los flujos de detritos varían ampliamente debido no solo a las características de los detritos, tales como concentración, distribución de tamaños de grano, sino también por la forma del curso de tránsito (ancho, pendiente, etc.). Las velocidades observadas están entre 0.5 m/s y 20 m/s. Las densidades volumétricas también varían caso a caso, han sido reportadas mediciones desde 1400 Kg/m³ hasta 2530 Kg/m³. Estas densidades son equivalentes a una concentración en volumen de material sólido desde un 25% hasta un 70 u 80%, respectivamente.

Este tipo de flujos produce enormes fuerzas de impacto sobre obstáculos en su camino; sin embargo después de que el flujo sale y se expande sobre un terreno más plano, su poder se pierde rápidamente, a tal grado de no es raro que una casa sea cubierta hasta el alero sin experimentar daños serios. Esto probablemente sugiere que el flujo es tenue y lento en el momento de su detención.

Cuando el flujo se ha establecido, la masa se desplaza sobre el canal natural o sobre uno formado por ella misma, produciendo ruidos intensos debido al choque entre los clastos y de éstos con las paredes del cauce, y algunas veces produce chispas por fricción contra los lechos rocosos. En esta etapa, toma la apariencia de concreto fresco, pero al alcanzar el reposo se seca transformándose en un concreto pobre con gran cantidad de grietas de desecación.

La erosividad de los flujos de detritos en el área de origen es severa, se puede ver que en el fondo de la garganta es completamente pulido hasta el lecho rocoso, pero cuando el flujo está totalmente cargado tiene poco efecto erosivo, esto se puede ver en pavimentos de carreteras los cuales no han sido averiados por el paso del flujo.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 181
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

5.2 METODOLOGÍA

Una vez realizado el estudio y análisis geomorfológico para las avenidas torrenciales, se procede a estimar la producción de sedimentos y/o volúmenes de suelo por:

- Procesos erosivos (procesos de arranque, transporte y depositación de partículas de suelo, siendo las principales fuerzas actuantes la de impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y la fuerza hidrodinámica provocada por la escorrentía); son función del clima, las propiedades geomecánicas del suelo, la topografía, la cobertura del suelo y la intervención antrópica; se presentan algunas generalidades de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo como el modelo más ampliamente difundido, el cual corresponde a una aplicación empírica que permite obtener datos de la pérdida de suelo de manera aproximada.
- Remoción de masa, causado por los procesos de inestabilidad de las laderas en el área de estudio; en este caso se realiza un enfoque a partir de las zonas críticas identificadas en el análisis geomorfológico.

5.2.1 Procesos Erosivos

A fin de presentar la formulación matemática del proceso, se debe entender que la erosión se inicia con el arranque mediante el impacto o la acción de fuerzas de tracción actuando sobre partículas individuales de suelo en la superficie, y que los factores que controlan tal proceso son la intensidad y duración de la precipitación, la rugosidad del terreno, la longitud y pendiente de la ladera, la erodabilidad inherente al suelo y el tipo de cobertura.

La formulación matemática que busca modelar el proceso de erosión–depositación, parte de una ecuación fundamental de conservación de masa que tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial qs}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t} = Dr + Di$$

Dónde:

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 182
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

- qs , carga de sedimentos
- x , distancia desde donde se inicia la escorrentía, medida sobre la cara del talud
- ρ_s , densidad de las partículas de suelo
- y , profundidad del flujo
- t , tiempo
- Dr , tasa de depositación en los canales de erosión
- Di , tasa de depositación entre canales
- q , Dr y Di son medidos por unidad de ancho.

$\frac{\partial qx}{\partial x}$ Representa el cambio en la carga de sedimentos a lo largo de la ladera

$\rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t}$ Representa la variación en la concentración de sedimentos con el tiempo

Realizando una simplificación, para flujos superficiales y gradualmente variados,

$\rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t}$, puede ser despreciado y por lo tanto:

$$\frac{\partial qx}{\partial x} = Dr + Di$$

Por otro lado, la carga de sedimentos siempre estará ligada a la capacidad de transporte de la escorrentía. Partiendo de este hecho, Foster y Meyer, proponen una función en la que el arranque y la depositación de material son proporcionales a la diferencia entre la capacidad de transporte y la carga de sedimentos, así:

$$Dr = C_1 * (Tc - qs)$$

Tc , capacidad de transporte

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 183
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

C_1 , constante en unidades de 1/L

La máxima capacidad de arranque Dre es proporcional a la capacidad de transporte

$$Dre = C_1 * Tc$$

Donde C_1 es función del tamaño de las partículas transportadas

(Foster & Meyer, 1975), relacionan la capacidad de transporte y la carga de sedimentos como sigue:

$$\frac{Dr}{Dre} + \frac{qs}{Tc} = 1$$

Por lo tanto, cuando la máxima capacidad de arranque es igual a la tasa de depositación, la carga de sedimentos es igual a cero. De igual forma, cuando la carga de sedimentos es igual a la capacidad de transporte, la tasa de depositación es igual a cero.

$\frac{Dr}{Dre}$, muestra la cantidad relativa de energía gastada en el arranque de sedimentos.

$\frac{qs}{Tc}$, muestra la cantidad relativa de energía gastada en el transporte de sedimentos.

5.2.1.1 Ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE)

La ecuación universal de pérdida de suelo proporciona una herramienta simple para determinar la cantidad de suelo erosionado como un promedio anual, en función de datos meteorológicos, características del suelo, topografía, cobertura e intervención antrópica.

La ecuación plantea una relación entre la pérdida de suelo medida en unidades de peso por unidad de área y por unidad de tiempo, y los seis factores que empíricamente han mostrado algún grado de correlación, cuatro de ellos

<p>VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO LAG</p>	<p>REVISO HBC</p>	<p>AVALÓ FSS</p>	<p>APROBO UT-PGR</p>	<p>Pág. 184</p>
---	------------------------	-----------------------	----------------------	--------------------------	---------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

adimensionales y los otros dos con unidades que representan por un lado la energía de la lluvia y por el otro la erodabilidad del suelo.

La forma de la ecuación universal de pérdida de suelo es la siguiente:

$$A = R * K * S * L * C * P$$

- A, Promedio espacial y temporal de pérdida de suelo expresada en las unidades del factor K y para el periodo de tiempo manejado en las unidades de R. En la práctica, usualmente es expresado en Ton / (Acre * Año) o en Ton / (Hectárea * Año).
- R, Factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía, expresado en (Pie * Ton) / Acre o en MegaJules / Hectárea.
- K, Factor de erodabilidad del suelo
- S, Factor de inclinación de la ladera
- L, Factor de longitud de la ladera
- C, Factor de cobertura
- P, Factor de prácticas de protección

Factor de erosividad, R

El valor numérico de R cuantifica el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, además de reflejar la cantidad y proporción de escorrentía. El factor no debe considerarse como un parámetro únicamente de energía ya que una tormenta de gran intensidad y poca duración, puede tener la misma energía total que una tormenta de poca intensidad pero larga duración. Así las cosas, el factor R debe ser visto como un factor de interacción que refleja la relación particular entre la energía total y la intensidad pico, lo cual, técnicamente refleja la capacidad de desprender las partículas del suelo, combinada con la capacidad de transporte.

En términos generales el factor R es calculado como sigue:

$$R = \sum E * I_{30}$$

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 185
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

E , Energía total

I_{30} , Intensidad máxima en 30 minutos

Por otro lado, la energía total se calcula como el producto de la energía cinética (e) por la precipitación (P):

$$E = e * P$$

La energía cinética (e) de una tormenta es función del tamaño de las gotas de lluvia y de la velocidad terminal con la que éstas impactan el suelo, variables que fueron relacionadas empíricamente por (Wischmeier & Smith, 1958) y (Renard, Foster, Weesies, McCool, & Yoder, 1997) con la intensidad de la lluvia, tal como lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$e = 916 + 331 * \log(i) \quad i \leq 3 \text{ pulgadas / hora}$$

$$e = 1074 \quad i > 3 \text{ pulgadas / hora}$$

$$e = 1099 * \left[1 - 0.72 * \exp^{(-1.27 * i)} \right]$$

Donde i en estas ecuaciones debe tener unidades de pulgadas / hora.

Para usos prácticos es usual realizar el análisis para hallar el valor de R , sólo sobre tormentas superiores a 0.5 pulgadas, además de las tormentas con una intensidad superior a 0.25 pulgadas en 15 minutos.

Para una tormenta dada, el factor R puede ser calculado a partir de una ecuación de la forma:

$$R = \frac{a_1 * P^{f(D)}}{D^{b_1}}$$

Donde a_1 y b_1 son constantes definidas por el tipo de tormenta (Cooley, 1980)

P , precipitación

D , duración de la tormenta y

$$f(D) = 2.119 * D^{0.0086}$$

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	186

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Factor de erodabilidad del suelo, K

La erodabilidad es un parámetro que muestra la respuesta del perfil del suelo al poder erosivo de las tormentas, es decir, relaciona la acción combinada de precipitación, escorrentía e infiltración, con las propiedades geomecánicas del suelo.

Estrictamente la erodabilidad es la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad pluvial y representa el efecto de las propiedades del suelo mismo y de las características del perfil estratigráfico sobre la pérdida de suelo.

Estudios previos han mostrado que la erodabilidad de un suelo es función de sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas y de la interacción entre ellas, lo que hace que las correlaciones existentes en la literatura, sean aplicables de manera estricta sólo a los suelos objeto de estudio y que cualquier extensión de sus resultados, debe ser realizada de manera prudente y entendiendo las limitaciones de tal práctica.

Las variables que mayor influencia tienen en el comportamiento de la erodabilidad pueden ser caracterizadas mediante la distribución granulométrica, el porcentaje de materia orgánica, la estructura y permeabilidad del perfil estratigráfico, las características de agregación de las partículas de suelo, la composición mineralógica y la densidad.

Existen correlaciones para estimar el valor del factor de erodabilidad entre las que se destacan el Nomograma de Weischmeier y las presentadas a continuación, todas ellas con las limitaciones que se mencionan.

Nomograma de Weischmeier

El nomograma de Weischmeier presentado en la Figura 27 fue desarrollado para suelos de textura media en zonas de clima templado, y permite encontrar el valor de K en función de la suma de los porcentajes de limo y arena fina, el porcentaje de arena media, el porcentaje de materia orgánica y la caracterización de la estructura del suelo y de su permeabilidad.

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 187
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------------

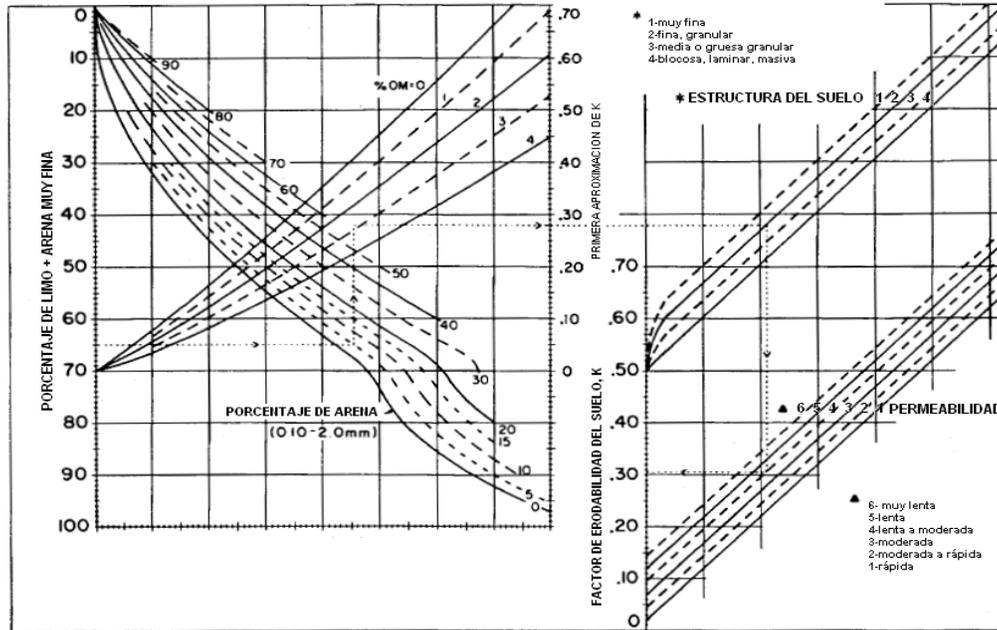


Figura 27. Nomograma de Weichmeier

El código de permeabilidad mostrado en la Tabla 61 y utilizado en el nomograma de Weichmeier está dado para la fracción de suelo de tamaño inferior a 2 mm, por lo que debe ser corregido considerando que la conductividad hidráulica se ve afectada por la presencia de partículas superiores al tamaño mencionado, como sigue:

$$kb = kf(1 - R_w)$$

Dónde:

R_w es el porcentaje en peso de las partículas mayores a 2 mm.

K_f , conductividad hidráulica de la fracción fina del suelo (< 2 mm)

Aproximación algebraica del Nomograma de Weischmeier:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	188
Fecha: 01/04/2015					

 Consorcio J & G	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	 Gobernación de UNDIMARCA Corporación Autónoma Regional del Guano <small>Comprometidos por Naturaleza</small>
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

La ecuación empírica mostrada a continuación, fue desarrollada para suelos con porcentaje de limo inferior o igual a 70%.

$$K = \frac{2.1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1.14} + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)}{100}$$

- OM*, porcentaje de materia orgánica
- M*, porcentaje de partículas entre 0.002 y 0.1 mm multiplicado por la suma de los porcentajes de limo y de arena
- S*, clase de estructura (Tabla 61)
- P*, código de permeabilidad (Tabla 61)

Tabla 61 Clase de estructura.

Clase	Descripción
1	Granular muy fino
2	Granular fino
3	Granular grueso
4	Aterronado o macizo

Tabla 62 Código de Permeabilidad.

Código	Descripción	Permeabilidad	
1	Arcilla, Arcilla limosa	Rápida	> 2.4 pulg/Hora
2	Materia orgánica arcillo limosa, Arena, Arcilla	Media a Rápida	0.8 – 2.4 pulg/Hora pulg/Hora
3	Materia orgánica arcillo arenosa o arcillosa	Moderada	0.2 – 0.8 pulg/Hora
4	Materia orgánica, Materia orgánica limosa	Baja a media	0.08 – 0.2 pulg/Hora
5	Arena mezclada con materia orgánica	Baja	0.04 – 0.08 pulg/Hora

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISO HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 189
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

6	Arena	Muy baja	< 0.04 pulg/Hora
---	-------	----------	------------------

Ecuación simplificada para la evaluación del parámetro K

Esta correlación es aplicable a los casos en los que no se cuente con el contenido de materia orgánica o en aquellos casos en los que la información sobre la distribución granulométrica sea incompleta.

$$K = 7.594 * \left\{ 0.0034 + 0.0405 * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log}(Dg) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\}$$

$$Dg = \exp[0.01 * \sum f_i * \text{Ln}(m_i)]$$

f_i , porcentaje de un tamaño de partículas dado.

m_i , media aritmética de los tamaños de las partículas

Factores topográficos L y S

El efecto de la topografía sobre la erosión es medido mediante el factor LS, considerando que la pérdida de suelo es directamente proporcional a la longitud y a la pendiente de las laderas.

La longitud de la ladera, λ , está definida como la longitud de la proyección horizontal medida desde el punto donde se inicia la escorrentía hasta el punto en donde ocurre la depositación o donde la escorrentía se concentra en un canal definido.

El factor L se evalúa como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{72.6} \right)^m$$

Donde,

λ , Proyección horizontal entre el punto donde se inicia la escorrentía y la zona de descarga o de depositación;

72.6, longitud unitaria en pies;

VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015	ELABORO LAG	REVISÓ HBC	AVALÓ FSS	APROBO UT-PGR	Pág. 190
---	-----------------------	----------------------	---------------------	-------------------------	--------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

m , exponente de longitud, el cual es función de la relación entre la erosión causada por la escorrentía o flujo y la ocasionada por el impacto de las gotas de lluvia al caer, el cual se puede calcular como:

$$m = \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right)$$

$$\beta = \left(\frac{\frac{\text{Sen}\alpha(\theta)}{0.0896}}{3.0 * (\text{Sen}\alpha(\theta))^{0.8} + 0.56} \right)$$

θ , Pendiente del talud.

El factor S se evalúa como:

$$S = 10.8 * \text{Sen}\alpha(\theta) + 0.03 \quad \text{pendiente} < 9 \%$$

$$S = 16.8 * \text{Sen}\alpha(\theta) - 0.50 \quad \text{pendiente} \geq 9 \%$$

Factor de cobertura, C

El factor C describe el efecto protector de la cobertura vegetal contra la pérdida de suelo, asignando un valor entre 0 y 1, como resultado de la comparación de las características de cobertura específicas del sitio de interés, frente a la situación de tener un suelo completamente desnudo en cuyo caso el factor C adquiere un valor de 1.0.

El factor C es función de variables tales como el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, el uso previo del suelo, la rugosidad superficial, la cantidad y características de la biomasa bajo la superficie del terreno y la humedad del suelo, entre otras.

La cantidad de variables que afectan el valor del factor C y la dificultad en su medición, han provocado el desarrollo de la Tabla 63 y la Tabla 64 que permiten la obtención del valor de C en función del tipo y porcentaje de cobertura, tanto a nivel de la superficie del terreno como la cobertura aérea.

Tabla 63 Factor C para zonas de bosque

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	191

 Consorcio J & G	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	 Gobernación de CUNDINAMARCA  Construye Paz  Corporación Autónoma Regional del Guano <small>Comprometidos por Naturaleza</small>
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Cobertura de árboles (%)	Porcentaje de Cobertura con Manto vegetal a nivel del suelo (%)	Manejo de la cobertura en los sectores sin manto vegetal	Factor C
100 – 75	100 -90	Controlado	0.001
		No Controlado	0.003 – 0.011
70 – 40	85 – 75	Controlado	0.002 – 0.004
		No Controlado	0.01 – 0.04
35 - 20	70 - 40	Controlado	0.003 – 0.009
		No Controlado	0.02 – 0.09

Los términos “Controlado” y “No Controlado” en la Tabla 63 deben entenderse como sigue:

Controlado: El sobre pastoreo y la ocurrencia de incendios se encuentran completamente controlados.

No Controlado: Zonas sujetas a sobrepastoreo o quemas continuas

Tabla 64 Factor C para zonas de pasto, tierras agrícolas o inactivas (Gray & Leiser, 1982)

Cobertura Aérea		Cobertura a nivel del suelo						
Tipo y altura de cobertura por encima del suelo	%	Tipo de Cobertura	Porcentaje					
			0	20	40	60	80	95 - 100
Sin cobertura apreciable		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
Cobertura de baja altura (h < 0.5 m)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.082	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.075	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.031	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.067	0.038	0.011
Cobertura de altura media (h	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.085	0.042	0.011

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	192
Fecha: 01/04/2015					

	<p style="text-align: center;">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p style="text-align: center;">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Cobertura Aérea		Cobertura a nivel del suelo						
Tipo y altura de cobertura por encima del suelo	%	Tipo de Cobertura	Porcentaje					
			0	20	40	60	80	95 - 100
< 2.0 m)	50	G	0.34	0.16	0.085	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.081	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		G	0.28	0.17	0.12	0.077	0.040	0.11
Árboles hasta de 4.0m de altura	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.085	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011

G: Cobertura tipo pasto o plantas semejantes al pasto o manto vegetal de espesor superior a 2 pulgadas.

W: Cobertura a nivel del suelo principalmente compuesto por plantas herbáceas con poco desarrollo radicular

Factor de prácticas de protección, P

Este factor sólo es aplicable a aquellas situaciones en las que se realice algún tipo de control de erosión mediante la ejecución de obras de protección o de preservación, caso en cual, la ecuación de pérdida de suelo, es afectada por un valor inferior a la unidad dependiendo del tipo y eficiencia de las obras realizadas.

5.2.2 Procesos de Remoción en Masa

Para efectos de los análisis de estabilidad de taludes y los procesos de remoción en masa generados, se realizó una amplia investigación incluida en el tomo de Análisis de Amenaza por Deslizamiento de este mismo proyecto; dicho estudio se realizó mediante el software SLIDE v5.0, el cual analiza los taludes y sus características principales (tipo de suelo, pendiente, nivel freático, entre otros) y simula el tipo de deslizamiento (incluyendo su volumen) que se podría generar.

Para el análisis de Avenidas Torrenciales, el aporte que realiza el estudio descrito en el párrafo anterior se centra en la identificación de los volúmenes de suelo (masa) que se pueden generar en los sitios críticos mencionados en el informe geomorfológico realizado para este estudio. Una vez identificados, se utilizan las

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	193

curvas propuestas por (Diaz-Granados, Ordoñez, & Deeb, 1986) para obtener los porcentajes de dicho volumen que llegan a un drenaje natural. (Ver Figura 28)

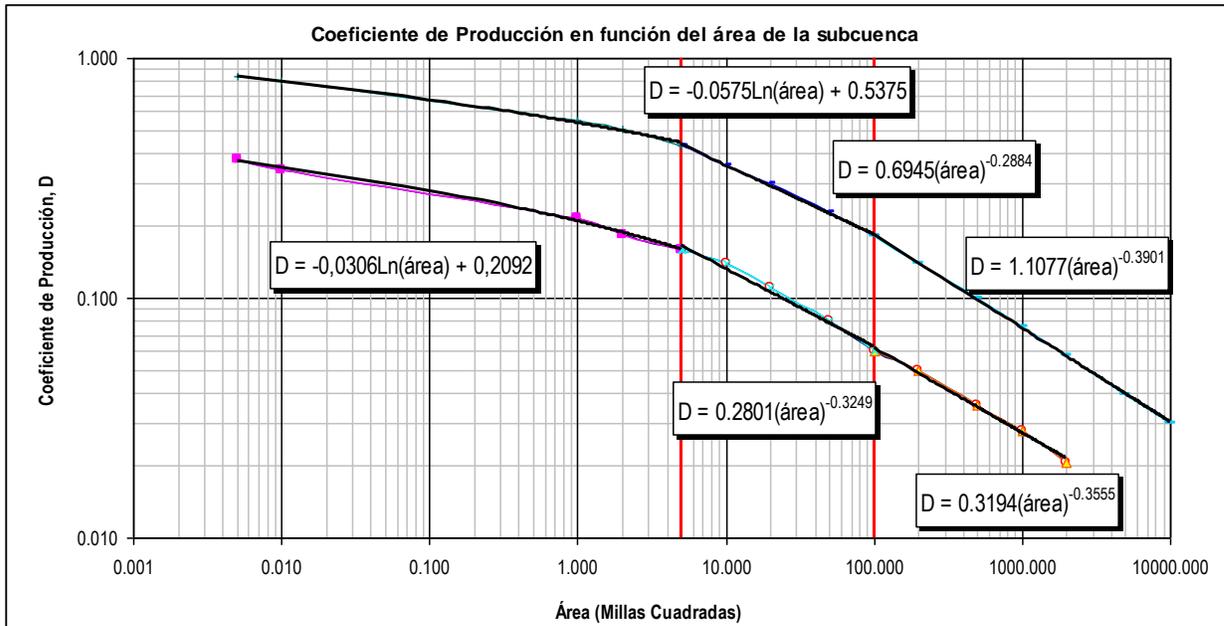


Figura 28 Variación del Coeficiente de Producción de Sedimentos en función del área. Fuente: (Diaz-Granados, Ordoñez, & Deeb, 1986)

5.2.3 Implementación del modelo mediante software FLO-2D

5.2.3.1 Introducción

FLO-2D es un software diseñado para realizar modelos de inundación a través de terrenos, canales, etc.; en el mismo se pueden incluir diferentes conceptos y elementos como lo son muros, puentes, alcantarillado, lluvia, infiltración, transporte de sedimentos, entre otros.

5.2.3.2 Esquematización del Modelo

Para poder desarrollar y simular el modelo de inundación por avenidas torrenciales dentro del software, se siguen los mismos pasos descritos para el análisis de inundación en el numeral 4.3.4.2, del presente informe.

<p>VOLUMEN B – REGIONAL Versión 3 Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO LAG</p>	<p>REVISÓ HBC</p>	<p>AVALÓ FSS</p>	<p>APROBO UT-PGR</p>	<p>Pág. 194</p>
---	------------------------	-----------------------	----------------------	--------------------------	---------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Adicionalmente una vez se ha generado la malla con sus respectivas elevaciones, se procede a definir qué elementos harán parte del análisis de inundaciones (canales, celdas con ingreso/salida de flujo, infiltración, lluvia, evaporación, entre otros). Para este estudio se definió usar la topografía como canal natural del transporte de flujo, adicionalmente en unas celdas específicas ubicadas en las zonas aguas arriba de las diversas corrientes se ingresó la información correspondiente a los hidrogramas generados previamente mediante el software HEC-HMS y se ingresaron los parámetros de flujo de sedimentos hiperconcentrados para el análisis de torrencialidad.

5.3 SIMULACIÓN Y MODELACIÓN

En este numeral se presentan los resultados de la modelación de los procesos que ocurren dentro de la cuenca durante los eventos de lluvia:

- Aporte de sedimentos por inestabilidad de laderas (remoción de masa)
- Análisis hidrológico
- Análisis de flujo mediante software FLO-2D

5.3.1 Aporte de Sedimentos por Inestabilidad de Laderas

Como se mencionó en el numeral 5.2.2, los procesos de inestabilidad generan volúmenes importantes dentro del análisis de sedimentos, una vez realizado dicho análisis mediante el software SLIDE v5.0, se obtuvo un volumen de referencia de acuerdo a la amenaza por remoción en masa, este valor se afecta por el coeficiente de producción de sedimentos mencionado en la metodología, de manera tal que se pueda, al igual que en el caso del aporte de sedimentos por erosión, obtener un valor de concentración volumétrica para la simulación en el software FLO-2D; a continuación se muestra la Tabla 65 con los resultados obtenidos.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	195

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p align="center">INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

Tabla 65 Porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes corrientes

Corriente	Área (mi ²)	Vol Q 2 años	Vol Q 5 años	Vol por Deslizamiento	Coefficiente de Producción (D)	Vol por Desliz Efectivo	% Vol Desliz 2 años	% Vol Desliz 5 años
Río Aves	35.628	203.10	391.80	660.37	0.100	65.946	24.51%	14.41%
Río Chipata	12.198	64.40	125.90	391.64	0.133	51.955	29.77%	29.21%
Río Blanco	11.780	55.30	111.90	41.35	0.134	5.530	9.09%	4.71%
Río Negro	47.227	8519.30	11300.70	444.10	0.091	40.519	0.47%	0.36%
Quebrada Negra	34.324	5332.10	7104.90	252.48	0.101	25.501	0.48%	0.36%
Río Sueva	52.641	221.20	458.10	1979.12	0.088	173.999	29.35%	27.53%
Río Zaque	20.995	155.90	267.90	124.89	0.116	14.493	8.51%	5.13%
Río Salinero	66.758	389.00	744.80	861.99	0.081	69.517	15.16%	8.54%
Río Chiras	17.921	395.60	616.40	484.62	0.121	58.585	12.90%	8.68%
Río Muchindote	42.146	173.60	292.60	534.45	0.095	50.624	22.58%	14.75%
Río Miraflores	140.261	1540.30	2660.40	2326.57	0.058	134.776	8.05%	4.82%
Río Guavio	9.157	293.40	440.50	256.16	0.141	36.231	10.99%	7.60%
Río Guavio 2	35.677	1445.20	2112.10	651.16	0.100	64.998	4.30%	2.99%
Quebrada Frijol	19.800	1110.50	1594.10	227.02	0.118	26.752	2.35%	1.65%
Río Chivor	35.893	1057.90	1605.90	938.90	0.100	93.547	8.12%	5.50%
Río Negro 2	33.278	1459.60	2137.20	390.34	0.102	39.795	2.65%	1.83%
Río Rucio	47.098	1609.00	2404.20	337.09	0.091	30.784	1.88%	1.26%
Río Trompeta	33.261	1917.80	2756.10	629.19	0.102	64.156	3.24%	2.27%
Quebrada El Calam	17.878	1232.20	1739.00	740.88	0.121	89.619	6.78%	4.90%
Río Gazajujo	18.142	1717.60	2365.00	488.48	0.121	58.868	3.31%	2.43%
Río Gazaunta	12.092	791.30	1124.10	11.88	0.133	1.579	0.20%	0.14%
Caño San Jesus	13.609	629.50	921.80	1.36	0.129	0.176	0.03%	0.02%
Río Gazaduje	23.630	2333.60	3202.70	764.39	0.112	85.938	3.55%	2.61%
Río Jagua	58.558	5256.60	7239.00	1439.53	0.085	121.866	2.27%	1.66%
Río Gasamumo	95.830	6653.90	9370.00	2745.72	0.070	191.061	2.79%	2.00%
Río Humea	95.205	6538.29	9254.60	1701.03	0.070	118.707	1.78%	1.27%
Río Guacavía	18.671	2329.90	3160.30	427.48	0.120	51.141	2.15%	1.59%
Río Piri	24.344	3377.10	4502.10	1208.06	0.112	134.717	3.84%	2.91%
Río Borrachero	49.269	1702.10	2534.80	1915.90	0.090	172.321	9.19%	6.37%
Río Guatiquia	43.987	4653.50	6388.40	525.06	0.093	49.047	1.04%	0.76%
Río Guavio 3	9.320	149.20	244.30	50.65	0.141	7.136	4.56%	2.84%
Quebrada Blanca	17.930	130.40	231.44	0.20	0.121	0.024	0.02%	0.01%
Río Bocachica	8.581	578.40	850.90	0.17	0.143	0.025	0.0043%	0.0029%
Río Teusaca	8.858	61.20	114.30	557.55	0.142	79.424	28.24%	27.33%

Los volúmenes críticos se presentan para el periodo de retorno de 2 años, debido a la presencia de un volumen de agua mucho menor; para considerar un escenario crítico, se asume un valor de 30% (0.30 como valor de concentración volumétrica) como referencia en el pico del hidrógrama obtenido en el estudio hidrológico para la modelación en FLO-2D.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	196

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

5.3.2 Análisis Hidrológico

Para determinar la afectación por avenidas torrenciales, se tomó como referencia el análisis hidrológico realizado para el Estudio de Amenaza para la región del Guavio, del cual este tomo hace parte integral; del mismo se obtienen los caudales acumulados por corriente y periodo de retorno simulados a partir del software HEC-HMS (ver Tabla 66).

Tabla 66 Caudales acumulados en las diferentes corrientes para periodos de retorno determinados

Q _{Acumulado} Corrientes	Periodos de Retorno	
	2 Años (m/s)	5 Años (m/s)
Río Aves	203.1	391.8
Río Chipata	64.4	125.9
Río Chiguanos	36.2	78.7
Río Blanco	55.3	111.9
Río Jaboncillo	70.2	147.2
Río Negro	8519.3	11300.7
Quebrada Negra	5332.1	7104.9
Río Chorreras	62.4	165.3
Río Sueva	221.2	458.1
Río Zaque	155.9	267.9
Río Salinero	389	744.8
Río Chiras	395.6	616.4
Río Muchindote	173.6	292.6
Río Miraflores	1540.3	2660.4
Río Guavio	293.4	440.5
Río Guavio 2	1445.2	2112.1
Quebrada Frijol	1110.5	1594.1
Río Chivor	1057.9	1605.9
Río Negro 2	1459.6	2137.2
Río Rucio	1609	2404.2
Río Trompeta	1917.8	2756.1
Río Garagoa	820.3	1203.2
Quebrada El Calam	1232.2	1739
Río Gazajujo	1717.6	2365
Río Gazaunta	791.3	1124.1
Caño San Jesus	629.5	921.8
Río Gazaduje	2333.6	3202.7

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	197

Q _{Acumulado} Corrientes	Periodos de Retorno	
	2 Años (m/s)	5 Años (m/s)
Río Jagua	5256.6	7239
Río Gasamumo	6653.9	9370
Río Humea	6538.3	9254.6
Río Guacavia	2329.9	3160.3
Quebrada Blanca	1376.8	1857
Río Piri	3377.1	4502.1
Río Borrachero	1702.1	2534.8
Río Guatiquia	4653.5	6388.4
Río Guavio 3	149.2	244.3
Quebrada Blanca 2	130.4	231.44
Río Bocachica	578.4	850.9
Río Teusaca	61.2	114.3

Los hidrogramas correspondientes se pueden observar y consultar en el tomo mencionado.

5.3.3 Análisis de flujo mediante software FLO-2D- Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo de avenidas torrenciales en FLO-2D se pueden observar a través del módulo gráfico denominado Mapper++, el cual se encuentra en el menú File (Figura 29).

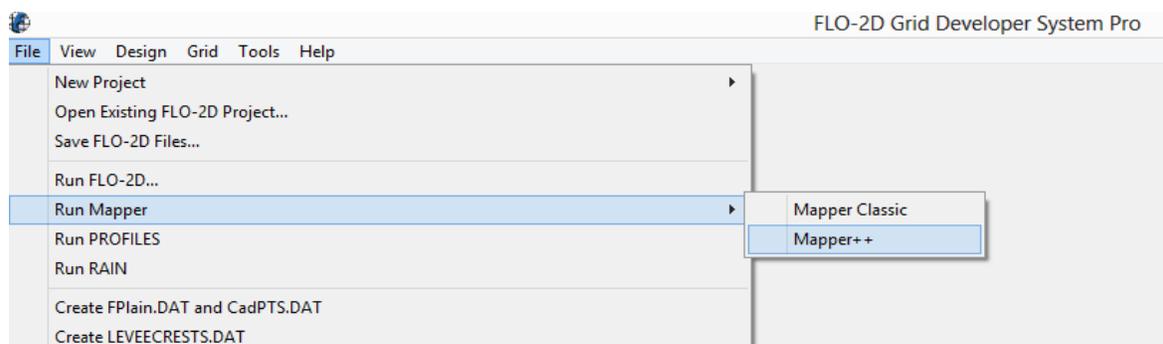


Figura 29 Proceso para cargar el módulo Mapper++

Una vez se encuentra cargado el módulo se procede a buscar el proyecto creado en el paso anterior (Figura 30); a partir de éste, se pueden graficar los diferentes resultados (velocidad Figura 31, profundidad del flujo de inundación Figura 32, entre otros), cada uno de estos puede ser exportado como un archivo tipo shapefile), de manera que se pueda manejar en un SIG y adecuar a otros mapas específicos de la región analizada.

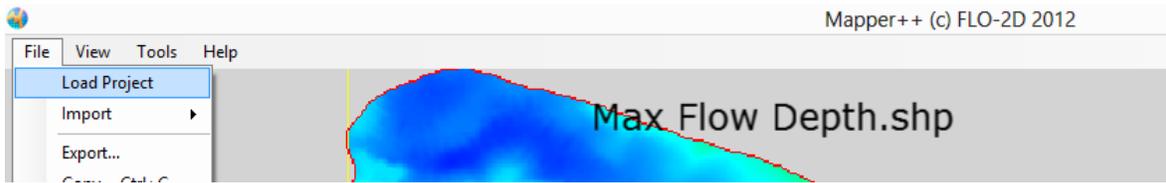


Figura 30 Proceso de carga modelo generado en FLO-2D

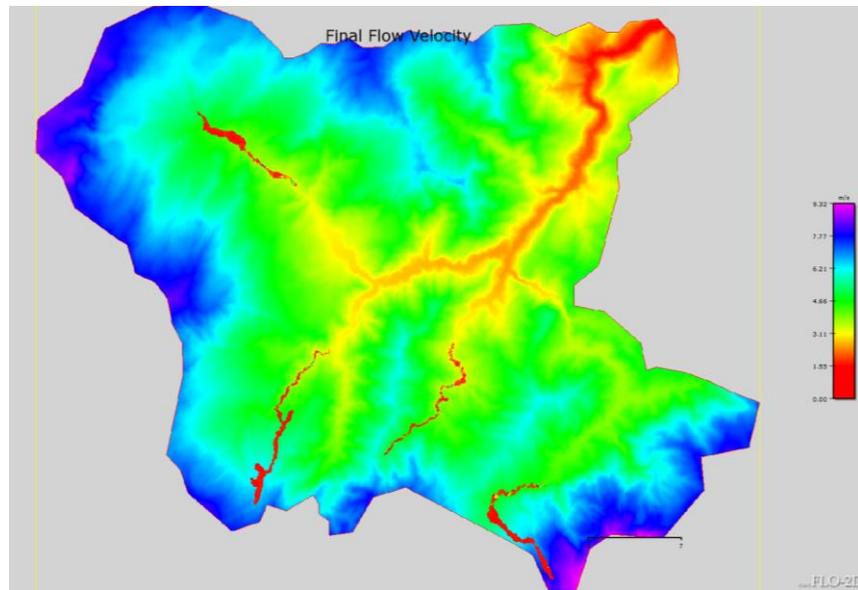


Figura 31 Velocidad generada en FLO-2D (de referencia)

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	199
Fecha: 01/04/2015					

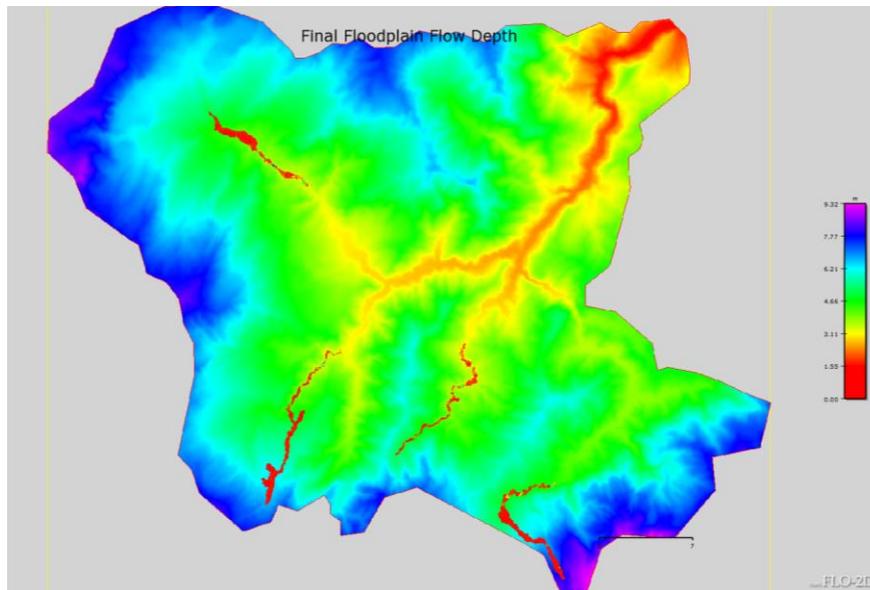


Figura 32 Solicitación (Profundidad de flujo) Simulada en FLO-2D (de referencia)

Los modelos que se simulan en FLO-2D corresponden a los valores de hidrógramas con periodos de retorno de 20, 5 y 2 años de manera que se pueda observar el comportamiento de las corrientes con los diferentes caudales.

Los resultados se muestran en los planos y mapas de Velocidad del Flujo, Solicitación (Profundidad del Flujo) y Amenaza por flujo torrencial (asociada a los periodos de retorno, es decir, es alta para el periodo de retorno menor – 2 años, media para el periodo de retorno de 5 Años y baja para el periodo de retorno de 20 años, ver Tabla 68) dentro del Anexo Geodatabase. Así mismo, dentro de este Anexo también se encuentran los mapas de las velocidades o solicitudes por torrencialidad para los periodos de retorno de 2, 5 y 20 años.

5.3.4 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo de avenidas torrenciales en FLO-2D, permitió la generación de los mapas de solicitud por avenidas torrenciales, en los cuales la topografía, el volumen de flujo y los porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes corrientes influyen en los resultados obtenidos, debido a que si se combinan estos parámetros se puede

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p> <p>Versión 3</p> <p>Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO</p> <p>LAG</p>	<p>REVISO</p> <p>HBC</p>	<p>AVALÓ</p> <p>FSS</p>	<p>APROBO</p> <p>UT-PGR</p>	<p>Pág.</p> <p>200</p>
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

intuir comportamientos diferentes en las corrientes, i.e. si las pendientes son importantes el comportamiento con volúmenes altos es diferente al obtenido con volúmenes bajos (mayor velocidad, mayor energía de arrastre, entre otros).

Cabe resaltar que para el periodo de retorno de 2 años, muchas cuencas no presentaron zonas de avenidas torrenciales importantes, es decir, no presentan desbordamientos en sus cauces naturales de manera notable (área de influencia), ni en su profundidad (valores alrededor de los 10 cm); las cuencas de los Ríos Humea, Gasamumo, Jagua, Negro, Chivor, Guavio y Guatiquia presentan aguas arriba en este mismo periodo de retorno, un incremento en la profundidad entre los 50 cm y los 2 m por lo que al presentarse caudales mayores (en periodos de retorno altos) serán zonas que deberán monitorearse con especial atención. (Ver Ilustración 24) (Ver anexo 1 Planos, AMENAZA_AV_TORRENCIAL, AMENAZA_POR_AV_TORRENCIAL_2ANOS)(Ver Ilustración 25) (Ver anexo 1 Planos,AMENAZA_AV_TORRENCIAL,AMENAZA_POR_AV_TORRENCIAL_5ANOS) (Ilustración 26) (Ver anexo 1 Planos, AMENAZA_AV_TORRENCIAL, AMENAZA_POR_AV_TORRENCIAL_20ANOS)

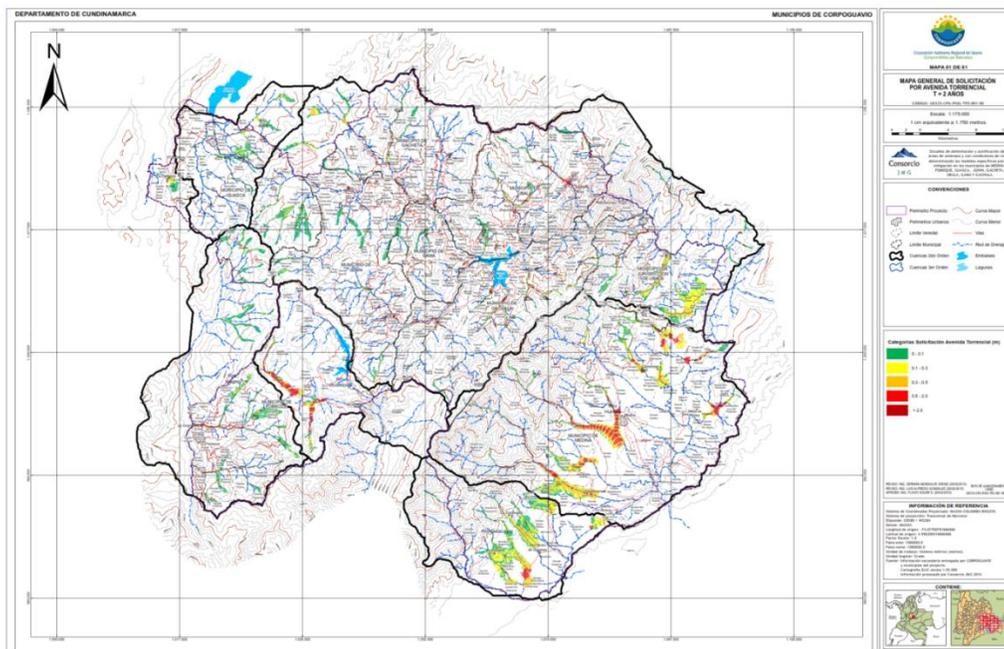


Ilustración 24. Mapa general de solicitud por avenidas torrenciales – PR_2 años.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	201

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

5.4 DETERMINACION DE LA AMENAZA

Para la evaluación de los resultados por fenómeno de avenidas torrenciales se utilizó la misma metodología que para las inundaciones, descrita en el numeral 4.4 del presente informe y que se resume en la Tabla 67 y Tabla 68.

Tabla 67. Nivel de amenaza por Avenida Torrencial

INTENSIDAD	Alta			
	Media			
	Baja			
FRECUENCIA		Alta	Media	Baja
Periodo de Retorno		2	5	20
Probabilidad de Ocurrencia		50%	20%	5%

Tabla 68. Categorización de Amenaza por Fenómeno de Avenida Torrencial

GRAVEDAD RELATIVA	PERIODO DE RETORNO	DESCRIPCIÓN
I Bajo	20	El evento de flujo torrencial puede ser concebible pero únicamente bajo circunstancias excepcionales. Los eventos ocurrirían con un período de retorno mayor o igual a 20 años.
II Medio	5	La ocurrencia de un fenómeno de flujo torrencial durante el término de un tiempo de vida es poco probable, pero es posible que ocurra bajo condiciones adversas. Los eventos ocurrirían con un período de retorno de 5 años.
III Alto	2	El fenómeno de flujo torrencial puede ser inminente. Los eventos ocurrirían con un período de retorno menor a 2 años.

Los resultados obtenidos se muestran en los planos anexos Mapa general de Amenaza por avenidas torrenciales total (Ilustración 23), es de resaltar que en la mayoría de corrientes analizadas, el nivel de amenaza es alto en las zonas correspondientes al cauce central de las corrientes, aguas arriba, es decir, las profundidades de flujo son mayores a 1m y/o el valor de la velocidad * profundidad es mayor a 0.5; se encuentran en el rango entre 0.4 y 1 m, y/o el resultado del cálculo de multiplicar la velocidad y la profundidad está entre 0.08 y 0.5.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	203

	<p align="center">ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p align="center">CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p align="center">INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

La avenida torrencial afecta usualmente un área pequeña a lo largo del cauce, pero una vez la pendiente disminuye en la zona de transición, el área afectada se incrementa debido a que se genera la depositación del material arrastrado formando los llamados conos o abanicos de depositación. Aunque es factible delimitar estos abanicos por las características geomorfológicas de la zona, no es posible definir un rumbo preciso para el flujo torrencial, ya que las obstrucciones y zonas de deposición que se producen durante el evento ocurren con un rumbo inestable e impredecible.

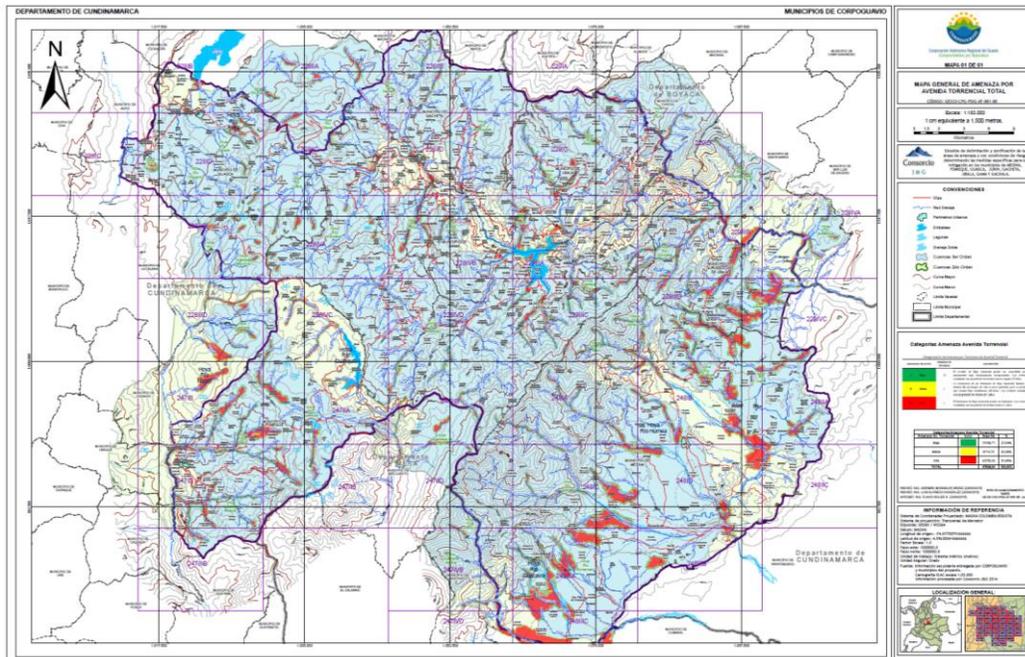


Ilustración 27 Mapa general de Amenaza por Avenidas Torrenciales Total

5.5 CONCLUSIONES

El mapa de amenaza por avenida torrencial (Ilustración 27), permite observar las principales cuencas que drenan en la región del Guavio, presentándose la posibilidad de ocurrencia de una avenida torrencial a partir de sus características hidrológicas e hidráulicas. Ver Anexo 1 Planos, AMENAZA_AV_TORRENCIAL, GE333-CPG-PSIG-AT-001-00

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	204

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Se discrimino el nivel de amenaza de acuerdo a los periodos de retorno, encontrándose tres niveles de amenaza. Las zonas con niveles de amenaza alto, se ubican en el cauce central de las corrientes aguas arriba, en el oriente y sur occidente del territorio principalmente en los municipios de Ubalá, Medina, Gachalá y Fómeque, además en las áreas cercanas al embalse de Guavio.

En la zona de montaña en caso de una avenida torrencial, las corrientes pueden alcanzar grandes velocidades de flujo y afectar zonas estrechas alrededor del cauce y generar algunas pequeñas áreas inundables.

En las zonas de transición, al llegar a la planicie aluvial desde las montañas aledañas, las corrientes cambian de régimen, su velocidad disminuye al igual que la carga transportada y la capacidad de arrastre, por lo que las zonas de deposición aumentan y con ello su área. Esto se genera porque la pendiente disminuye y se presenta una distribución de la lámina de agua hacia sus márgenes, ocupando una llanura de inundación de algunos metros, de tal forma que la lámina adquiere una forma ovalada, conformando abanicos o conos aluviales, donde se presentan topografías más planas y hay una transición gradual entre la ladera y la llanura aluvial sea esta del río o de la quebrada donde se presentan los abanicos o conos recientes, son las zonas con mayor probabilidad de resultar afectadas por inundaciones tras un evento de lluvias de gran intensidad.

En términos generales la avenida torrencial afectan usualmente un área pequeña a lo largo del cauce, pero una vez la pendiente disminuye en la zona de transición, el área afectada se incrementa debido a que se genera la depositación del material arrastrado formando los llamados conos o abanicos de depositación. Aunque es factible delimitar estos abanicos por las características geomorfológicas de la zona, no es posible definir un rumbo preciso para el flujo torrencial, ya que las obstrucciones y zonas de deposición que se producen durante el evento ocurren con un rumbo inestable e impredecible

Los niveles de amenaza por eventos torrenciales se discriminan aproximadamente así:

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	205

 Consorcio J & G	ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ CONTRATO No 200-12-3-391	 Gobernación de CUNDINAMARCA  Construye Por  Corporación Autónoma Regional del Guavio <small>Comprometidos por Naturaleza</small>
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Tabla 69 Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por avenidas torrenciales.

Amenaza Avenida Torrencial Total		
Amenaza	Área (Ha)	%
Alta	24755.4	51.96%
Media	9714.7	20.39%
Baja	13169.7	27.64%
Total	47639.8	100.00%

De acuerdo a lo anterior un 51.96% de la zona afectada por avenidas torrenciales se encuentra nivel de amenaza alto, 20.39% en medio y 27.64% en bajo.

Teniendo en cuenta la distribución geográfica del área de estudio, correspondiente a los municipios jurisdicción de la corporación autónoma regional del Guavio y en consecuencia con las manchas de afectación por avenidas torrenciales, resultado del análisis regional a escala 1:25.000, a continuación se relacionan las áreas y porcentaje de cada nivel de amenaza por fenómeno de avenidas torrenciales, para cada municipio (Ver Tabla 71).

Tabla 70. Áreas y Porcentajes de cada nivel de amenaza por avenidas torrenciales área de estudio

Amenaza Avenida Torrencial Total		
Amenaza	Área (Ha)	%
Alta	21277.4	52.21%
Media	8144.2	19.98%
Baja	11332.8	27.81%
Total	40754.5	100.00%

Tabla 71 Áreas de cada nivel de amenaza por fenómeno de avenidas torrenciales por municipio.

Área (Ha)	Amenaza por Avenidas Torrenciales Por Municipio			Total
	Alta	Media	Baja	
Fómeque	3060.72	1421.25	1869.95	6351.92
Gachalá	1246.27	874.62	1137.51	3258.41
Gachetá	373.81	231.85	316.26	921.93
Gama	380.15	218.02	290.97	889.14
Guasca	885.03	471.66	717.57	2074.26
Junín	614.65	387.03	515.69	1517.37
Medina	10861.96	2954.64	4258.98	18075.58

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	206
Fecha: 01/04/2015					

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Área (Ha)	Amenaza por Avenidas Torrenciales Por Municipio			Total
	Alta	Media	Baja	
Ubalá	3854.84	1585.17	2225.91	7665.91
Total (Ha)	21277.43	8144.24	11332.85	40,754.51
Total (%)	52%	20%	28%	100%

El estudio detallado del análisis por Avenidas torrenciales a nivel local, para municipios y centros poblados podrá verificarse en el Volumen C, Tomo I, II, III, IV, V, VI, VII y VIII, en cumplimiento de los términos contractuales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ayala, C. (2009). Metodología para determinar riesgos por inundación debida al desbordamiento de un cauce aluvial. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

CVC; Univalle. (2010). Proyecto Midas - Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Aparicio, J. (2003). Lluvias e inundaciones. Recuperado el 24 de febrero del 2012 de la Web: <http://www.iaem.es/GuiasRiesgos/Lluviaseinundaciones.pdf>

Rodríguez, J.J. y O'Brien, J.S. (2001). Metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta por R. García.

Jojoa, J.I. and Rodríguez, D. (2011) Estudio y evaluación de alternativas para la restauración de la hidrodinámica de la laguna de Sonso, 96th ed. Cali, Colombia: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela EIDENAR.

Baeza, C. (1994). *Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Tesis Doctoral.* Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía ETSECCPB-UPC.

Bravo Mendoza, Ó., & Sánchez Celis, M. (2012). *Gestión Integral de Riesgos. Cuarta Edición.* Bogotá, D. C.: Bravo y Sánchez, EU.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	207

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

Caballero, H., & Mejía, I. (1988). *Algunos comentarios acerca del evento torrencial de la quebrada Ayurá (Envigado) del 14-04-1988 y sus implicaciones en la evaluación de la amenaza al municipio*. Medellín: Memorias 2da Conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburrá.

Castro, J. (2007). Deslizamientos y Avenidas Torrenciales. *Cosmos*, Año 10, No. 41, p. 3.

Chang, M., Roth, F., & Hunt, E. (1982). Sediment Production under Various Forest-site conditions. *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, 13-22.

Cooley, K. (1980). Erosivity Values for Individual Design Storms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)* 106, 136-145.

Cousot, P. (1992). *Rheology of Debris Flows - Study of Concentrated Dispersions and Suspensions*. Ph.D. Thesis. Grenoble: INPG.

Cousot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews* No. 40, 209-227.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslides Types and Processes*. National Research Council.

Díaz-Granados, M., Ordoñez, J., & Deeb, A. (1986). Determinación de Coeficientes de Producción de Sedimentos en Cuencas Extensas. *Memorias XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (IAHR)*. Sao Paulo, Brasil.

Durán, J., Elízaga, E., Garzón, G., Lamas, J. L., & Prieto, C. (2008). *Geología y prevención de daños por inundaciones*. Instituto Geológico Minero de España.

Feria Domínguez, J. M. (s.f.). *El riesgo de mercado: su medición y control*. Sevilla, España: Delta Publicaciones.

Firth, D. (1993). Bias Reduction of Maximun Likelihood. *Biometrika*, Vol 1 No. 1 pp. 27 - 38.

Flórez, A., & Suavita, M. (1997). Génesis y manifestación de las inundaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía, Vol. VI, No. 1-2.*, p. 60-110.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	208

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

- Foster, G., & Meyer, L. (1975). Transport of particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE* 15, 99–102.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- González G., A. J. (1990). *Conceptos sobre la Evaluatoria de Riesgo por Deslizamientos. VI Jornadas Geotécnicas*. Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Gray, D., & Leiser, A. (1982). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Guzzetti, F. (2005). *Landslide Hazard and Risk Assessment. Erlangung Des Doktorgrads*. Perugia, Italy: Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Hang Chok, Y. (2008). *Modelling the effects of soil variability and vegetation on the stability of natural slopes*. Doctoral Thesis. The University of Adelaide. School of Civil, Environmental and Mining Engineering.
- Heinze, G. (2014). *Firth's bias reduced logistic regression*. Obtenido de <http://cran.r-project.org/web/packages/logistf/logistf.pdf>
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience Vol VII No 3*, 221-238.
- Jimeno, C. L., Fariñas de Alba, J. L., Gómez Prieto, R., Mataix González, C., García Bermudez, P., Llopis Trillo, G., y otros. (1999). *Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes*. Madrid: Entorno Grafico, S.S.
- Jones, F., Embury, D., & Peterson, W. (1961). Landslides along the Columbia River Valley, Northeastern Washington. *U.S. Geol. Surv Prof. Paper*, 367, 98.
- Lee Hua, J., Mak Chee, M., & Chin Wen, C. (2006). Web Based Fuzzy Multicriteria Decision Making Tool. *International Journal of The Computer, the Internet and Management*, 14 (2) 1-14.

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p> <p>Versión 3</p> <p>Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO</p> <p>LAG</p>	<p>REVISO</p> <p>HBC</p>	<p>AVALÓ</p> <p>FSS</p>	<p>APROBO</p> <p>UT-PGR</p>	<p>Pág.</p> <p>209</p>
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FOMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

- Margottini, C., Canutti, P., & Kyoji, S. (2013). *Landslide Science and Practice: Volume 3. Spatial Analysis and Modelling*. Springer-Verlag.
- Moser, M. Y., & Hohensinn, F. (1983). Geotechnical aspects of soils slips in Alpine Regions. *Engineering Geology*, 19; 185-211.
- Mulder, H. (1991). *Assessment of Landslide Hazard*. University of Utrecht: Nederlandse Geografische Studies. PhD Thesis. .
- OSSO – La Red. (2003). *DESINVENTAR*. Recuperado el Dic de 2007, de <http://www.desinventar.org/sp/metodologia/DesInventar>
- Oyagi, N. (1984). Landslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: a state-of-the-art report. *4th Int. Symp. On Landslides, Toronto*, 3, 1-31.
- Ozelim, L., Cavalcante, A., Pacheco de Assis, A., & Ribeiro, L. (2013). Analytical Slope Stability Analysis Based on Statistical Characterization of soil primary properties. *Int. J. Geomech*, 1943-5622.
- Piedrahíta, I. (1996). *Estudio preliminar por eventos torrenciales en la vertiente occidental del Río San Juan, suroeste antioqueño*. Universidad EAFIT.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheological classification of subaerial sediment-water flows. *Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*.
- Pierson, T. C., & Scott, K. M. (1985). Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research Vol. 21*, 1511-1524.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook No 703*, 24-25.
- Rendón, G. (1997). La Hidráulica Torrencial. *DYNA*, vol. 22. p. 23 -31.
- Rickson, R., & Morgan, R. (2005). *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. Taylor & Francis e-Library.

<p>VOLUMEN B – REGIONAL</p> <p>Versión 3</p> <p>Fecha: 01/04/2015</p>	<p>ELABORO</p> <p>LAG</p>	<p>REVISO</p> <p>HBC</p>	<p>AVALÓ</p> <p>FSS</p>	<p>APROBO</p> <p>UT-PGR</p>	<p>Pág.</p> <p>210</p>
---	---------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------------

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
<p>INFORME DE AMENAZA REGIONAL</p>		

- Rodriguez, E., Godínez, F., Ariza, F., & Reyes, R. (2010). Estimadores ridge en regresión logística cuando hay separación en los datos y colinealidad. *Foro Nacional de Estadística*, 19-23.
- SafeLand. (2011). Recommended Procedures for Validating Landslide Hazard and Risk Models and Maps. *Living with landslide risk in Europe*.
- Salazar, A. (2012-2013). *Modelos de respuestad discreta en R y aplicación con datos reales*. Granada: Universidad de Granada.
- Santoso, A., Phoon, K.-K., Asce, F., & Quek, S.-T. (2009). Reliability Analysys of infinite Slope using subset simulation. *Contemporary Topicd in Situ testing, Analysis, and Reliability of Foundations*, 278-285.
- Schmidt, K., Roering, J., Stock, J., Dietrich, W., Montgomery, D., & Shaub, T. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.*, 38: 995-1024.
- Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Ed. Chichester, John & Wiley.
- Suarez Díaz, J. (2009). Deslizamientos. . En *Análisis Geotécnico Vol. 1 Capítulo 4. Análisis de Estabilidad*. Bucaramanga, Colombia: U.I.S Escuela de Filosofía.
- Suarez Díaz, J. (2009b). Deslizamientos. En *Análisis Geotécnico Vol. 1 Capítulo 4. Análisis de Estabilidad*. Bucaramanga, Colombia: U.I.S Escuela de Filosofía.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Capítulo 3. Esfuerzo y Resistencia al Cortante*. Bucaramanga, Colombia.: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Suarez, J. (2009). Deslizamientos. En *Volumen 2. Técnicas de Remediación. Capítulo 9. La Vegetación y los Deslizamientos*. Bucaramanga, Colombia: U.I.S Escuela de Filosofía.
- Takahashi, T. (1981). Debris Flow. *Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 13*, 57-77.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	211

	<p>ESTUDIOS DE DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE AMENAZA Y CON CONDICIONES DE RIESGO, DETERMINANDO LAS MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA SU MITIGACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE MEDINA, FÓMEQUE, GUASCA, JUNÍN, GACHETÁ, UBALÁ, GAMA Y GACHALÁ</p> <p>CONTRATO No 200-12-3-391</p>	
INFORME DE AMENAZA REGIONAL		

Urrea, H., & Vásquez, G. (1996). *Caracterización, cartografía y estrategias de manejo de las cuencas hidrográficas torrenciales del municipio de Guatapé*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Varnes, D. (1978). Slope Movement types and processes. *Landslides, Analysis and Control, Special Report 176*, 11-33.

Vásquez, G. (1993). *El problema constante de las cuencas torrenciales, a propósito del desastre del río Tapartó (Ant.)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Wischmeier, W., & Smith, D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *American Geophysical Union Transactions* 39, 285-291.

VOLUMEN B – REGIONAL	ELABORO	REVISO	AVALÓ	APROBO	Pág.
Versión 3 Fecha: 01/04/2015	LAG	HBC	FSS	UT-PGR	212