

INFORME FINAL

CONVENIO 4800002397 DE 2007

**AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA,
AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ.
FORMULACIÓN DE PROPUESTAS DE GESTIÓN**

LIBRO II

**AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, AVENIDAS TORRENCIALES E
INUNDACIONES**

JULIO 2009

**AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA,
AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ.
FORMULACIÓN DE PROPUESTAS DE GESTIÓN**

INFORME FINAL

CONVENIO 4800002397 DE 2007

MEDELLÍN

Ejecución

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, Escuela del HABITAT

FACULTAD DE MINAS, Escuela de Ingeniería Civil y Escuela de Geociencias y Medio
Ambiente

Un Proyecto de

**MUNICIPIO DE MEDELLÍN
ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ
MUNICIPIO DE ENVIGADO
CORANTIOQUIA**

JULIO 2009

CRÉDITOS

AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ. FORMULACIÓN DE PROPUESTAS DE GESTIÓN

Un proyecto de

MUNICIPIO DE MEDELLÍN

Alonso Salazar Jaramillo

Alcalde

Carlos Hernando Jaramillo Arango

Director de Planeación

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Mauricio Facio Lince Prada

Director

Alejandro González Valencia

Subdirector Ambiental

MUNICIPIO DE ENVIGADO

José Diego Gallo Riaño

Alcalde

Juan Diego León Toro

Secretario de Planeación

CORANTIOQUIA

Luís Alfonso Escobar Trujillo

Director General

Juan Lázaro Toro Murillo

Subdirector (e) Ecosistemas

Ejecución

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN

Facultades de Arquitectura y Minas

Coordinador General

Ingeniero Geólogo José Humberto Caballero A.

Equipo de trabajo

Grupo de Amenaza por Movimientos en Masa

Coordinador

Ingeniero Geólogo Hernán Eduardo Martínez C.

Ingeniero Civil Jorge Esteban Alarcón G., Ingeniero Civil Robinson Andrés Giraldo Z.
Ingeniero Civil Gabriel Jaime Zapata G.

Grupo de Amenaza por Inundaciones y Avenidas Torrenciales

Coordinadores

Ingeniero Geólogo José Humberto Caballero A.

Ingeniero Geólogo Albeiro de Jesús Rendón R.

Ingeniera Geóloga Carolina García L., Ingeniero Geólogo Juan Fernando Giraldo G.
Ingeniero Geólogo Juan Carlos Ortiz, Ingeniera Geóloga Claudia Peláez

Grupo Vulnerabilidad y Riesgo

Coordinadora

Socióloga Françoise Coupé

Estudio de vulnerabilidad y formulación de propuestas de gestión

Antropóloga Elizabeth Arboleda G., Arquitecta Mónica E. Mejía Escalante, Arquitecta
Yonaira Lainez P.

Estudio de la vulnerabilidad

Economista Juan Guillermo Cardona B., Ingeniera Civil Lina María Vidal, Socióloga Olga
Elena Jaramillo G.

Supervisoras del censo

Arquitecta Luz Mayury Otálvaro M., Economista Cristina A. Henao M.

Sistema de Información Geográfica

Coordinador

Especialista en SIG Andrés Cardales B.

Ingeniero Mecánico Gustavo Adolfo López V., Ingeniera Forestal Mónica M. Cortés R.

Asesores
Ingeniero Geólogo Marco Fidel Gamboa R.
Abogado Germán Ríos A.

INTERVENTORES

MUNICIPIO DE MEDELLÍN

Ingeniero geólogo Mario Flórez Arroyave, Ingeniero Geólogo Martín Molina

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Ingeniero Geólogo Edier Vicente Aristizabal G.

CORANTIOQUIA

Ingeniero Geólogo Francisco Leoz M.

MUNICIPIO DE ENVIGADO

Ingeniera Civil Carmen Cecilia López

PORTADA

Fotografías:
Edier Aristizabal G.
Mario Florez A.
Hernando López
Humberto Caballero A.



Libro II CAPITULO I

ZONIFICACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DETONADOS POR LLUVIAS EN EL VALLE DE ABURRÁ.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	1
2.	METODOLOGIA DE TRABAJO	2
3.	REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)	4
3.1	ARQUITECTURA DEL MODELO	6
3.2	ENTRENAMIENTO	8
4.	INFORMACIÓN SECUNDARIA	9
4.1	GEOLOGÍA SUPERFICIAL	11
4.2	GEOMORFOLOGÍA	15
4.3	USOS DEL SUELO	19
4.4	PENDIENTES	22
4.5	PROCESOS MORFODINÁMICOS	
	25	
4.6	LLUVIAS	26
4.7	CURVATURA DEL TERRENO	26
5.	BASE DE DATOS	31
5.1	GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL TERRENO	31
5.2	GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DEL ATRIBUTO LLUVIA	38
5.2.1	Series de precipitación precedente y antecedente.	39
5.2.2	Análisis Estadísticos	39
5.2.3	Análisis Geoestadísticos	42
5.2.4	Origen, definición y objeto de estudio	43
5.2.5	Etapas del análisis geoestadístico	43
5.3	GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DEL ATRIBUTO PERMEABILIDAD	61
5.3.1	Generalidades	61
5.3.2	Campaña en campo	63
5.3.3	Modelo neuronal de permeabilidad	66
5.3.4	Determinación del mapa de permeabilidad	68
6.	MODELO NEURONAL DE AMENAZA	70
6.1	PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	70
6.2	ENTRENAMIENTO Y POS-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	73
7.	LIMITACIONES	81
8.	DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS QUE PRESENTAN AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA Y RESTRICCIONES PARA EL VALLE DE ABURRÁ.	82

8.1	CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES.	82
8.2	DESCRIPCIÓN DE ZONAS	83
8.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	84
8.3.1	Histogramas de frecuencia	84
8.4	ANÁLISIS DE LOS ESTADÍSTICOS	98
8.5	CONCLUSIONES DEL EJERCICIO	100
8.6	RESTRICCIONES	101
9.	REFERENCIAS	109

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Mapa de geología superficial del Área Metropolitana. Fuente: AMVA 2007c, AMVA 1999.	13
Mapa 2. Mapa de geología superficial del municipio de Medellín. Fuente: AMVA 2007c, AMVA 1999.	14
Mapa 3 Mapa de geomorfología del Valle de Aburrá. Fuente AMVA 2007c	17
Mapa 4. Mapa de geomorfología del municipio de Medellín. Fuente AMVA 2007c	18
Mapa 5. Mapa de usos del suelo del Valle de Aburrá. Fuente: AMVA, 2007c	20
Mapa 6. Mapa de usos del suelo del municipio de Medellín. Fuente: AMVA, 2007c	21
Mapa 7. Mapa de pendientes del Valle de Aburrá. Fuente: Cartografía SIGAME.	23
Mapa 8. Mapa de pendientes del municipio de Medellín. Fuente: Cartografía SIGAME	24
Mapa 9 Mapa de procesos morfodinámicos del Valle de Abu rrá. Fuente: SIMPAD Y AMVA 2008	27
Mapa 10. Mapa de procesos morfodinámicos del municipio de Medellín. Fuente: SIMPAD Y Municipio de Medellín 2008.	28
Mapa 11. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas del Valle de Aburrá	29
Mapa 12. Mapa de curvatura superficial para el municipio de Medellín.	30
Mapa 13 Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días para el Valle de Aburrá.	52
Mapa 14. Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agr egada a 3 días, para el municipio de Medellín.	53
Mapa 15 Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, para el Valle de Aburrá.	57
Mapa 16. Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregad a a 15 días, para el municipio de Medellín.	58
Mapa 17. Ubicación de los puntos de muestreo para el sector de Pajarito	64
Mapa 18. Ubicación de los puntos de muestreo para el resto del municipio de Medellín.	65
Mapa 19. Mapa de permeabilidad para el municipio de Medellín	69
Mapa 20 Mapa de amenaza de movimientos en masa en el Valle de Aburrá considerando la lluvia como factor detonante.	79
Mapa 21. Mapa de amenaza de movimientos en masa en el municipio de Medellín considerando la lluvia como factor detonante.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del modelo de interacción SIG-RNA.	4
Figura 2. Esquema de una neurona artificial (Modificado de Kasabov, 1996).	5
Figura 3. Función de error. El peso w^* es el objetivo a alcanzar partiendo de w	6
Figura 4. Algunas arquitecturas neuronales (Martínez, 2006).	7
Figura 5. Funciones de transferencia (a) Sigmoide y (b) Lineal truncada (The MathWorks, 2002).	8
Figura 6. Ejemplo de asignación de un valor de clase a una celda de trabajo con varias clases de un mismo atributo.	32
Figura 7. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo geología.	33
Figura 8. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo geomorfología.	34
Figura 9. Histograma de frecuencia para las categorías del atributo uso del suelo.	34
Figura 10. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo pendientes.	35
Figura 11. Esquema de la afectación de los procesos a una celda de trabajo.	36
Figura 12. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo procesos, analizado desde el punto de vista probabilístico.	37
Figura 13. Relación de las lluvias con los movimientos en masa (Montoya et al., 2002).	38
Figura 14. Esquema de cálculo de la lluvia antecedente y precedente para las series de precipitación.	39
Figura 15. Histograma de frecuencia de la serie de precipitación acumulada de 3 días para la estación Rionegro La Macarena (2308027000000).....	40
Figura 16. Histograma de frecuencia de la serie de precipitación acumulada de 15 días para la estación Rinegro La Macarena (2308027000000).....	40
Figura 17. Gráficos exploratorios para los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada a 3 días.	46
Figura 18. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 3 días.	47
Figura 19. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 3 días, excluyendo los 3 datos extremos.	48

Figura 20. Gráficos exploratorios para los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada a 15 días.	49
Figura 21. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 15 días.	50
Figura 22. Semi-Variograma experimental y teórico ajustado a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada de 3 días.	51
Figura 23. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, comparación de datos observados vs. datos predichos.	54
Figura 24. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, distribución de residuales.	55
Figura 25. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, Probabilidad observada Vs. Probabilidad teórica.	55
Figura 26. Variograma experimental y teórico ajustado a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada de 15 días.	56
Figura 27. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, comparación de datos observados Vs. datos predichos.	59
Figura 28. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, distribución de residuales.	60
Figura 29. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, Probabilidad observada Vs. Probabilidad teórica.	60
Figura 30. Ilustración del ensayo Porchet.	62
Figura 31. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos.	67
Figura 32. Partición del área de trabajo en celdas.	70
Figura 33. Coeficiente de correlación vs. Cantidad de neuronas.	74
Figura 34. Error vs. Cantidad de neuronas.	75
Figura 35. Grafica del proceso de entrenamiento para el Valle de Aburra	75
Figura 36. Grafica del proceso de entrenamiento para Medellín.	76
Figura 37. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos del Valle de Aburra.	77
Figura 38. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos de Medellín.	78
Figura 39. Proceso para determinar el área de la amenaza y	

de sus respectivas variables.	84
Figura 40. Histograma de pendientes- amenaza tipo 3.....	89
Figura 41. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días- amenaza tipo 3	89
Figura 42. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días- amenaza tipo 3	90
Figura 43. Histograma geología - amenaza tipo 3	90
Figura 44. Histograma de geomorfología - amenaza tipo 3	91
Figura 45. Histograma de usos del suelo- amenaza tipo 3	91
Figura 46. Histograma de pendiente- amenaza tipo 4	92
Figura 47. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia acumulada a 3 días- amenaza tipo 4	92
Figura 48. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia acumulada a 15 días- amenaza tipo 4	93
Figura 49. Histograma geología - amenaza tipo 4	93
Figura 50. Histograma geomorfología - amenaza tipo 4	94
Figura 51. Histograma usos del suelo - amenaza tipo 4	94
Figura 52. Histograma de pendientes - amenaza tipo 5.....	95
Figura 53. Histograma probabilidad de excedencia del umbral 3 días - amenaza tipo 5.	95
Figura 54. Histograma probabilidad de excedencia del umbral 15 días - amenaza tipo 5	96
Figura 55. Geología- amenaza tipo 5	96
Figura 56. Geomorfología- amenaza tipo 5	97
Figura 57. Usos del suelo- amenaza tipo 5.....	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorías de trabajo de geología superficial utilizadas en el proceso de zonificación.....	12
Tabla 2. Categorías de trabajo de la geomorfología superficial utilizadas en el proceso de zonificación.....	16
Tabla 3. Categorías de trabajo de usos del suelo utilizadas en el proceso de zonificación.....	19
Tabla 4. Categorías de trabajo de las pendientes utilizadas en el proceso de zonificación.....	22
Tabla 5. Clasificación de los procesos.....	25
Tabla 6. Categorías de los procesos utilizados para la zonificación.....	37
Tabla 7. Probabilidad de excedencia y no excedencia de los umbrales establecidos para la lluvia agregada de 3 y 15 días, para cada estación.....	41
Tabla 8. Base de datos suministrada por el SIG para el Valle de Aburrá.....	71
Tabla 9. Estructura final de la base de datos para entrenamiento del modelo neuronal de predicción de amenaza por movimientos en masa en el Valle de Aburrá.....	72
Tabla 10. Resultados del proceso de optimización de la RNA.....	74
Tabla 11. Categorías de probabilidad de movimientos en masa.....	82
Tabla 12. Categorías de trabajo para la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días.....	83
Tabla 13. Categorías de trabajo para la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días.....	83
Tabla 14. Resultados para amenaza tipo 3.....	85
Tabla 15. Resultados para amenaza tipo 4.....	86
Tabla 16. Resultados para amenaza tipo 5.....	87
Tabla 17. Comparación entre pendientes según la amenaza.....	98
Tabla 18. Comparación entre la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia a 3 días, según la amenaza.....	98
Tabla 19. Comparación entre la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia a 15 días, según la amenaza.....	99
Tabla 20. Comparación entre la geología, según la amenaza.....	99

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 21.	Comparación entre la geomorfología, según la amenaza	100
Tabla 22.	Comparación entre los usos del suelo, según la amenaza	100
Tabla 23.	Restricciones según tipo de amenaza	106

1. INTRODUCCION

En el marco del convenio establecido entre la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA y el municipio de Envigado cuyo objeto es la realización de una Zonificación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales; en este capítulo se presenta el informe técnico correspondiente al proceso de elaboración de la Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa, teniendo en cuenta como detonante principal la lluvia.

La metodología empleada está basada en una herramienta computacional conocida como redes neuronales artificiales (RNA), la cual está siendo cada vez más empleada en la solución de problemas que involucran gran cantidad de variables con bases de datos generosas y de difícil solución por métodos paramétricos o estadísticos convencionales.

Para efectos de dar la claridad suficiente al documento, se ha incluido una descripción general del método de las RNA's y, adicionalmente, una explicación detallada de la manera como fue incorporado el factor detonante (lluvia) en el análisis de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa y la forma como se introducen los factores pre-disponentes.

Partiendo de la existencia de un mapa de inventario de movimientos en masa, de otros factores pre-disponentes (geología, geomorfología, uso del suelo, topografía) y de las series de tiempo para los registros de lluvia en diversas estaciones distribuidas en todo el territorio de interés, se pretende establecer la relación entre éstos y la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. Dicha relación es el resultado de un proceso de entrenamiento del modelo de RNA, en el cual es indispensable incluir información relevante sobre los factores pre-disponentes más importantes, previa la ejecución de un proceso de acondicionamiento de la base de datos para verificar su cobertura, distribución y pertinencia.

Teniendo en cuenta lo anterior se pretende obtener como resultado un mapa que evalúe de manera probabilística la amenaza por movimiento en masa para el Valle de Aburrá, y refinar el modelo para el municipio de Medellín con el fin de obtener un mapa más detallado. Basta aclarar que para lograr dicho objetivo en el municipio de Medellín, se refinaron la base de datos, se agregaron las variables permeabilidad y curvatura, y se hizo uso de la metodología descrita anteriormente, con lo cual se obtuvo un mapa probabilístico de amenaza por movimiento en masa con un detalle de 1:5000.

2. METODOLOGIA DE TRABAJO

La metodología general de trabajo está basada en la herramienta computacional llamada Redes Neuronales Artificiales, la cual puede ser vista como una aproximación especial de estadística fundamentada, que consiste en un análisis de las relaciones funcionales entre factores pre-disponentes y la distribución de los movimientos de masa (Guzzeti et al., 1999).

Los diferentes pasos de la metodología usada se describen a continuación:

- A. Recopilación de información de factores pre-disponentes, detonantes y movimientos en masa.** Se recopiló toda la información disponible para los municipios del Valle de Aburrá sobre los siguientes temas: geología, geomorfología, usos del suelo, topografía y precipitación. Cada tema se encuentra representado en un mapa que cubre completamente todo el territorio de estudio. Todos los mapas fueron suministrados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, a partir de proyectos anteriores como los de microzonificación sísmica (AMVA, 2007c), planes de ordenamiento territorial de los municipios (AMVA, 2006), y otros estudios específicos como los de ordenamiento de cuencas (AMVA, 2007a). Por otra parte, se compiló información de los inventarios de movimientos en masa de los últimos 20 años, obtenida de los registros del SIMPAD y del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (DESINVENTAR). Dicha información sirvió para generar un mapa adicional llamado mapa de procesos o mapa de inventario de movimientos en masa el cual sirve, tal como se explicará en detalle en secciones posteriores, para calcular la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa y para indicar al modelo neuronal sobre dicha probabilidad en el proceso de entrenamiento. Posteriormente, con las series de lluvias se generaron dos mapas adicionales llamados mapas de probabilidad de excedencia de umbrales críticos de precipitación, los cuales sirven para indicarle al modelo neuronal si una región particular del territorio presenta escenarios de precipitación que puedan detonar o no movimientos en masa. Finalmente, se construyó un mapa de permeabilidad basado en pruebas de campo, que sirvió para el refinamiento del modelo de amenaza para el municipio de Medellín. Más adelante se explica en detalle la forma de generar dichos mapas.
- B. Creación de una base de datos para la modelación con RNA's.** Para generar la información necesaria que se suministró al modelo neuronal se dividió el territorio en una malla con elementos cuadrados de 100 m de lado para el Valle de Aburrá y elementos cuadrados de 50m para el municipio de Medellín . Este tamaño de celda de trabajo es considerado adecuado para el nivel de detalle en el que se trabaja (escala regional) debido a que el mapa final que se pretende obtener llamado mapa de amenaza por movimientos en masa, debe ser entendido como una herramienta de planificación regional del territorio con el cual las entidades de planificación puedan tener herramientas para gestionar la distribución de recursos, por ejemplo. El mapa final no deberá ser usado como herramienta para toma de decisiones puntuales, a nivel de manzana por ejemplo, relacionadas con aspectos comunes en el día-a-día de los funcionarios como podrían ser: desalojos puntuales

de viviendas por fenómenos de inestabilidad, entrega de pequeñas partidas presupuestales para mitigación de la amenaza a nivel de manzana, determinación del grado de estabilidad de pequeños lotes de terreno para efectos de reubicación temporal o definitiva de personas. Todos estos casos deberán ser tratados con criterios individuales tomando en cuenta las características puntuales de cada situación en la escala adecuada. Cada celda de trabajo es caracterizada con todas las variables predisponentes, de tal forma que al final del proceso se obtiene una matriz de dimensión **Nc** x **Na**, en la cual **Nc** es el número total de celdas del territorio estudiado (115545) y **Na** es el número de atributos considerados (33), éstos para el caso del Valle de Aburrá. Para la generación de esta matriz de información fue fundamental el uso de una herramienta de SIG, que se utilizó para exportar cada uno de los diferentes atributos de los distintos temas de información en formatos adecuados para su manipulación en forma de datos numéricos con formatos ASCII, compatibles con casi todos los códigos computacionales actuales. Este procesamiento de la información en el SIG se explica en detalle en el capítulo correspondiente.

- C. **Creación, entrenamiento y validación del modelo neuronal**. Este procedimiento comenzó con el pre-procesamiento de la base de datos para verificar su normalidad, cobertura y pertinencia. Lo primero tuvo que ver con verificar que todas las variables de la base de datos de entrada presentaran valores numéricos en el intervalo [0 1]. La cobertura tuvo que ver con la distribución de las variables dentro del espacio considerado. No es indispensable que todas las variables se encuentren homogéneamente distribuidas en el espacio pero si es conveniente conocer la forma como lo están. En algunos casos fue conveniente eliminar algunos puntos de regiones que estaban excesivamente representadas en contraste con otras cuyo grado de cobertura era deficiente. Finalmente, la pertinencia tuvo que ver con verificar la independencia lineal entre las diferentes variables consideradas, por ejemplo, no es conveniente incluir información sobre rangos de pendientes y geomorfología simultáneamente, sin antes verificar el grado de influencia de las pendientes en las unidades geomorfológicas. Si la dependencia es muy alta, una sola de las variables será suficiente, ya que incluir las dos puede generar confusión en el modelo en lugar de mejorar su desempeño de aprendizaje y validación. Posteriormente se crean varios modelos con diferentes arquitecturas y se verifica la evolución del desempeño de cada uno de ellos mediante el cálculo de sus errores de validación. El modelo que presenta el menor error se considera adecuado para resolver el problema planteado y sobre su arquitectura se adelantan nuevos procesos de entrenamiento con diferentes estrategias o funciones de aprendizaje. El modelo final es validado para medir su nivel de confianza y se produce una respuesta que es un valor numérico que indica la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en una porción del territorio.

Por último, con la información que se obtuvo de la RNA, el SIG produce un mapa de amenaza por movimientos en masa, el cual es sometido a varios niveles de validación antes de ser aceptado. En la Figura 1 se muestra un esquema de cómo es la combinación del SIG con las RNA's, dando una idea mas clara de cual es la función de cada una de las partes; el SIG organiza, distribuye, presenta y compila toda la información temática

disponible y genera nuevos mapas con la información producida; la RNA descubre las relaciones existentes entre todas las variables involucradas para cada una de las celdas del territorio, con el propósito de determinar la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en particular, que para el caso estudiado, fueron los movimientos en masa. En este proceso las RNA's hacen el trabajo que tradicionalmente estaba en manos de los grupos de expertos que mediante procedimientos convencionales de álgebra de mapas, muy susceptibles, producían los antiguos mapas de amenaza. La gran ventaja de la RNA es su imparcialidad inicial en relación a los niveles de importancia que las variables de entrada tienen en el proceso y la posibilidad de dar un paso adelante en el sentido de obtener no solamente una amenaza cualitativa (alta, media, baja), sino cuantitativa en términos probabilísticos.

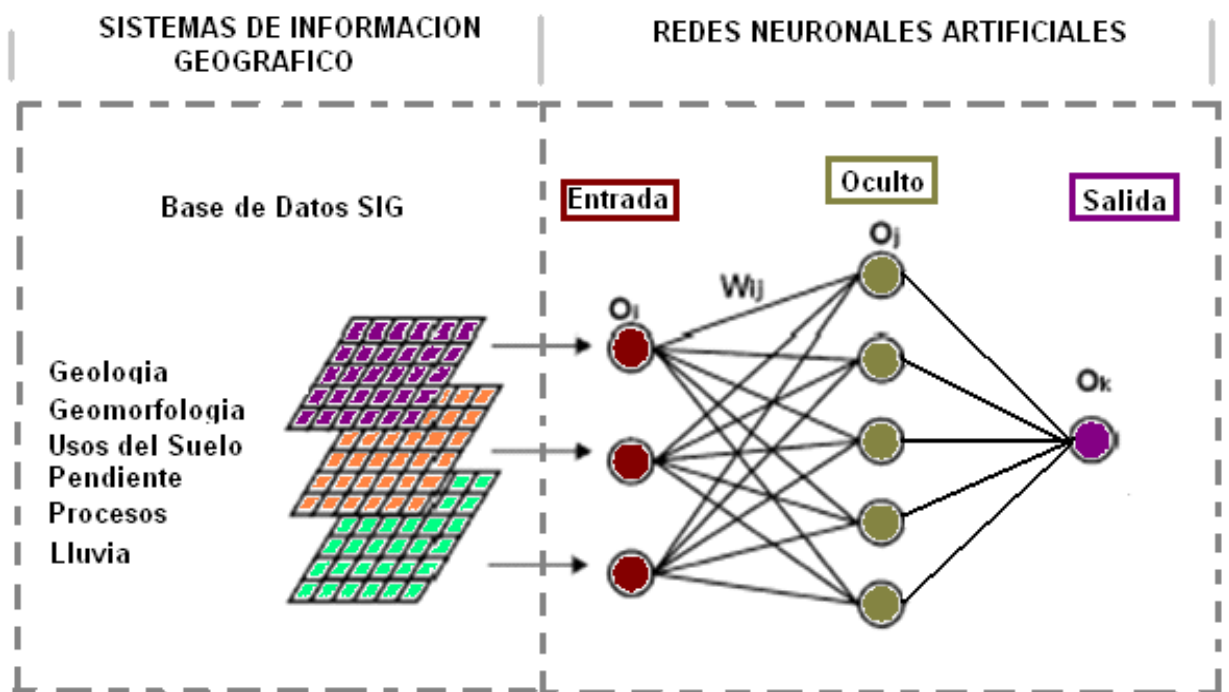


Figura 1. Esquema del modelo de interacción SIG-RNA.

3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)

Una red neuronal es un modelo computacional inspirado en la biología, formado por elementos procesadores (neuronas) y las conexiones entre ellas, constituyendo una estructura que mediante un proceso de entrenamiento, consigue estimar funciones matemáticas (Kasabov, 1996). La neurona como elemento básico de procesamiento de una RNA está conformada por las siguientes partes:

- Un conjunto de conexiones cada una de las cuales está caracterizada por un peso. Una señal x_j en la entrada, conectada a una neurona k es multiplicada por el peso w_{kj} .

Cada neurona posee una o más entradas paralelas cada una de las cuales es multiplicada por su respectivo peso (Ver Figura 2).

- Una función de activación (Σ) que es la suma de las entradas ponderadas por los pesos.
- Una función de transferencia (φ) que restringe la amplitud de la salida de la neurona. Ella limita el intervalo permisible de la señal de salida a un valor finito típicamente dentro de intervalos cerrados del tipo $[0, 1]$ o $[-1, 1]$.

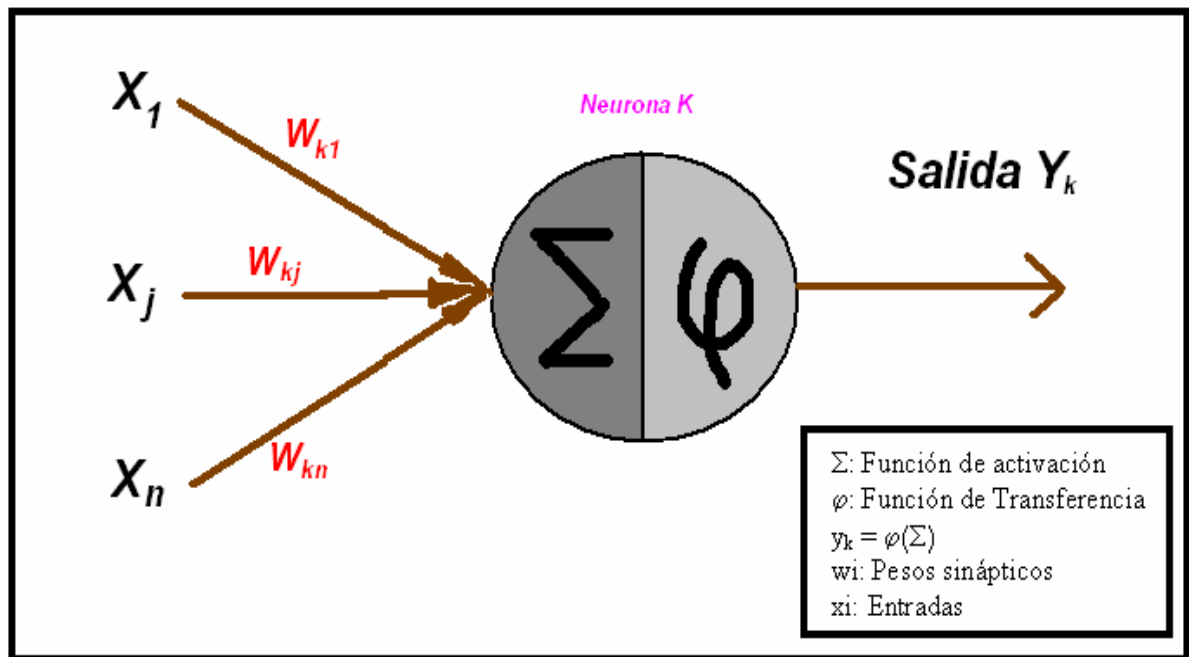


Figura 2. Esquema de una neurona artificial (Modificado de Kasabov, 1996).

Se denomina perceptron a las neuronas que pueden ajustar sus pesos en las entradas para minimizar el error en la salida mediante un proceso de aprendizaje. El algoritmo matemático que permite realizar el proceso de actualización de los pesos mediante el análisis de las señales de salida, es llamado retro-propagación del error.

Se trabajará con una estructura neuronal del tipo perceptron. El proceso empieza presentando un primer vector de entrada X . El perceptron calcula el vector de salida Y . Se compara el vector de salida deseado, O , con el vector producido por la red, Y . Se calcula entonces el error E . Se corrigen los pesos de las conexiones de tal forma que la próxima vez que se presente el vector de entrada X , la respuesta de la red esté más próxima de la respuesta deseada, O . Se repite esta secuencia de pasos hasta que la red alcance un punto de convergencia (Haykin, 1999), es decir de minimización del error. En la Figura 3 se muestra un esquema del proceso de optimización del error. La función de error depende de los valores de los pesos sinápticos en las conexiones de la red. El proceso de aprendizaje consiste en encontrar una combinación de pesos (w^*) que produzca un error mínimo.

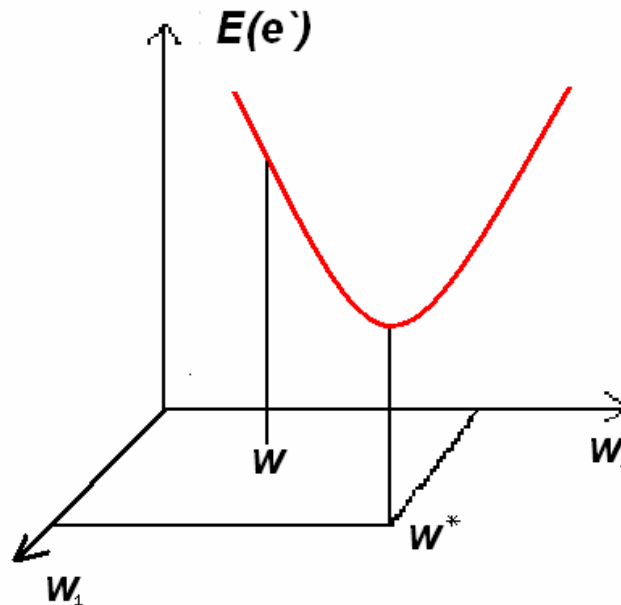


Figura 3. Función de error. El peso w^* es el objetivo a alcanzar partiendo de w .

3.1 ARQUITECTURA DEL MODELO

La definición de la arquitectura del modelo consiste en determinar el número de capas ocultas, el número de neuronas de cada capa, sus conexiones y la forma general de la red. No existe una arquitectura predefinida que sirva para solucionar un problema específico, en cada caso, se debe buscar la mejor combinación de capas y neuronas a partir de un procedimiento de ensayo – error. No obstante, existe una serie de arquitecturas típicamente usadas con las cuales se pueden resolver la mayoría de los problemas de clasificación, reconocimiento de caracteres e identificación de patrones. La Figura 4 es una representación de diferentes arquitecturas de RNA típicas.

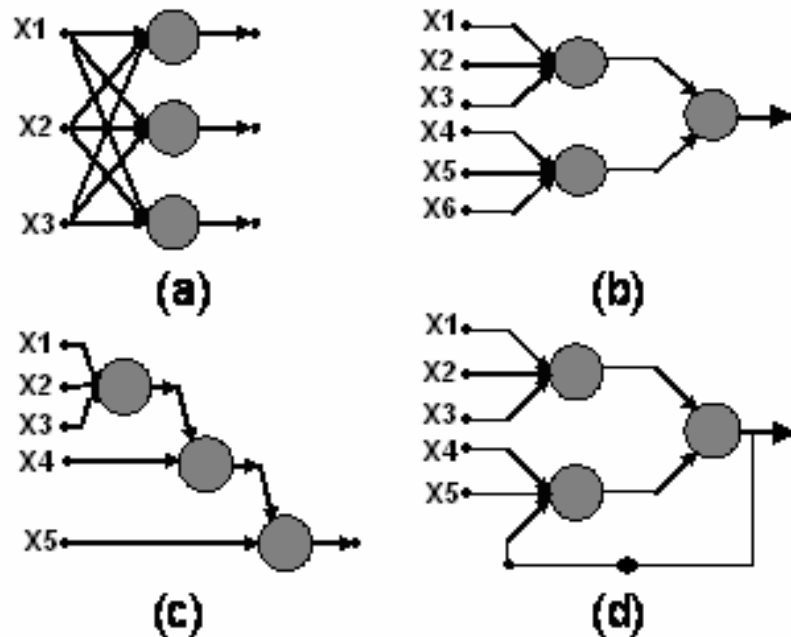


Figura 4. Algunas arquitecturas neuronales (Martínez, 2006).

En una RNA de una capa de neuronas sólo existe un nodo entre cualquier entrada y cualquier salida de la red (Figura 4.a), mientras que en redes de múltiples capas hay más de una neurona entre alguna entrada y alguna salida de la red, tal como se muestra en la Figura 4.b, c, d (Martínez, 2006).

Para la ejecución del presente trabajo se utilizaron redes neuronales del tipo perceptrón multi-capas las cuales fueron entrenadas con el algoritmo de retro-propagación de error implementado directamente en las funciones del programa computacional Matlab. La arquitectura óptima se obtiene mediante un proceso de ensayo y error en el cual se ponen a prueba varias arquitecturas verificando su desempeño por medio del coeficiente de correlación entre los datos obtenidos del modelamiento y los valores reales.

La función de transferencia usada en las capas ocultas de las redes fue la Sigmoides Logarítmica (Logsig), la cual realiza una transformación no lineal con forma de **S** y que presenta las siguientes características:

- Limitada, es decir, sus valores están restringidos entre dos fronteras, para nuestro caso será [0,1];
- Monótonamente creciente; continua y suave, es decir, derivable a lo largo de todo su dominio.

Para transferir la información a la neurona de salida se usó una función del tipo lineal escalonado (purelin), la cual tiene en común con la sigmoide el hecho de ser limitada, sin embargo su forma es fundamentalmente diferente presentando un tramo lineal alrededor

del origen y un truncamiento en los valores extremos. Ambas funciones son presentadas de la Figura 5.

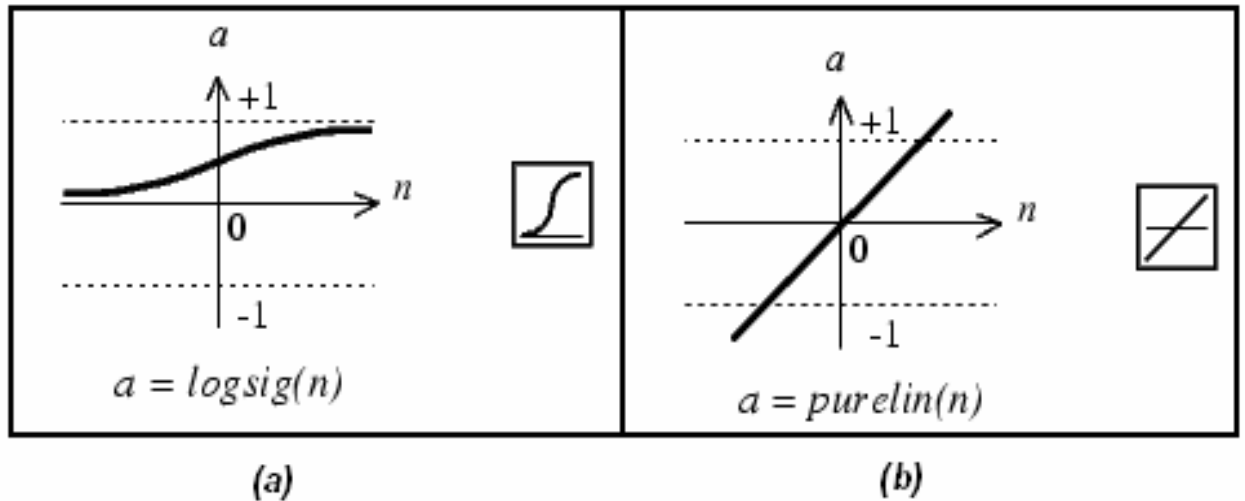


Figura 5. Funciones de transferencia (a) Sigmoide y (b) Lineal truncada (The MathWorks, 2002).

3.2 ENTRENAMIENTO

El entrenamiento de la red neuronal requiere, tal como se mencionó anteriormente, de implementar un proceso de optimización del error, el cual consiste en encontrar el conjunto óptimo de pesos sinápticos y sesgos en las conexiones de la red. Este proceso, se realiza mediante el cálculo, paso a paso, del gradiente de la función del error, para indicar a la red el sentido en el cual debe mover los pesos en la iteración siguiente de tal manera que el nuevo error sea más pequeño.

Existen muchos tipos de aprendizaje según el modo en que es realizado el ajuste de los pesos. Los algoritmos de entrenamiento están divididos principalmente en los siguientes grupos (Becerra, 2003).

- Aprendizaje supervisado. Se presentan los conocimientos en forma de pares de [entrada, salida deseada]. Si la entrada es distinta de la salida, se tendrá una red heteroasociativa; si la entrada es igual que la salida, se tratará de una red auto asociativa. Para lograr este tipo de aprendizaje, se alimenta a la red con una entrada de los datos de entrenamiento, se compara la salida de la red con la salida de los datos de entrenamiento; la diferencia se usa para calcular el error (cuadrático medio) de la respuesta de la red. Con un algoritmo apropiado es posible retocar los valores de los pesos sinápticos con el fin de reducir el error. Estas correcciones deben realizarse varias veces o ciclos, para todo el conjunto de entradas-salidas de los datos de entrenamiento.

- Aprendizaje no supervisado. Durante este proceso de aprendizaje a la red no se la presenta la salida deseada. Los algoritmos de aprendizaje no supervisados son útiles cuando el usuario no sabe exactamente que clase de salidas se desean o se esperan. Como ejemplo se pueden citar el procesamiento digital de imágenes, en donde se presenta como entrada una imagen defectuosa y se desea restaurarla a la imagen original.
- Aprendizaje por refuerzo (entre los dos anteriores). El instructor o maestro exterior sólo indica cuando la salida es correcta o no, pero no indica en cuanto se diferencia de la salida buscada. Si se compara este paradigma con el supervisado, se observa que si bien el supervisado proporciona una información relativa a la dirección en la que se deben realizar los cambios en el sistema (ajuste de los pesos), en el caso de un aprendizaje por refuerzo no se tiene información acerca de la "dirección" del cambio, lo cual hace que su ámbito de aplicación sea mucho más reducido comparado con el modo supervisado, aunque presenta interés en la comunidad científica dedicada al estudio de las máquinas capaces de aprender.
- Aprendizaje híbrido. Se trata de una combinación del aprendizaje supervisado y del no supervisado. Parte de los pesos se ajustan por medio de un esquema de aprendizaje supervisado, y el resto se obtienen por medio de un aprendizaje no supervisado.

Se denomina una época cuando se presenta un conjunto completo de datos de entrenamiento a la red. Entre una época y otra, son corregidos los pesos para minimizar el error. Se considera que una RNA está entrenada cuando el error global de la red es considerado lo suficientemente pequeño de acuerdo a un criterio previamente definido.

El conjunto de datos debe dividirse en dos grupos principalmente: el primero (de entrenamiento) es usado para entrenar la RNA; el segundo (de validación) sirve para validar el desempeño de la RNA.

Para el desarrollo de este proceso se usó un aprendizaje supervisado en el cual se utilizó una función del tipo "gradiente conjugado" implementada en el Matlab, la cual permite el cálculo del gradiente en dos direcciones diferentes; una es la dirección de la iteración anterior y otra la dirección del gradiente máximo de la iteración siguiente. La dirección final en la que se moverán los pesos resulta de conjugar las dos direcciones anteriores, dando como resultado un proceso en el cual se minimiza la posibilidad de quedar bloqueada la red en un mínimo local.

4. INFORMACIÓN SECUNDARIA

En problemas relacionados con fenómenos de degradación del terreno, tal como lo son los movimientos en masa, es difícil alcanzar niveles de predicción aceptables debido a la complejidad involucrada y al elevado número de variables que intervienen. Encontrar la relación existente entre un amplio grupo de variables representativas de diferentes aspectos del terreno, y la probabilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno de

degradación, no es trivial, y se constituye en una labor compleja que difícilmente se resuelve usando algoritmos paramétricos basados en la combinación matemática o estadística de las variables involucradas. Además, los análisis realizados para la zonificación (análisis discriminantes y de regresión) requieren que los datos sean derivados de poblaciones normalmente distribuidas, hipótesis que generalmente es violada obteniéndose modelos de difícil y no muy confiable interpretación. Este problema puede enmendarse introduciendo en el modelo, solamente variables que sean claramente relevantes, o seleccionadas a partir de la evaluación previa de su influencia por medio de procedimientos de ensayo/error (García, 2004), incorporando análisis netamente físicos y matemáticos demandantes en presupuesto y tiempo o introduciendo análisis para los que no sean relevantes en la manera cómo influyen, dentro del fenómeno físico, las diferentes variables condicionantes.

Para el caso de este trabajo fueron escogidas las variables seleccionadas por García (2004), en el cual se realizó un procedimiento de ensayo/error para el municipio de Medellín, que puede asumirse válido y extensivo al resto del Valle de Aburrá debido a la proximidad geológica y geomorfológica principalmente. En el mencionado trabajo, el autor concluye que los factores pre-disponentes más relevantes para la generación de movimientos en masa son: la geología, el uso del suelo, la pendiente, la geomorfología y la altitud. De todos los factores mencionados, sólo la altitud fue descartada, puesto que su relevancia como elemento con cierto grado de control sobre la generación de movimientos en masa, se limita al territorio del municipio de Medellín, siendo poco probable que tenga la misma relevancia en todo el territorio del Valle de Aburrá. La pendiente además, parece un factor mas convencional y de uso mas generalizado en modelos no sólo de este tipo sino de algebra de mapas.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el propósito final es estimar la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, fue necesario introducir en el modelo, información que tuviera en cuenta de alguna manera los eventos ya ocurridos en un periodo considerable de tiempo. Esta información fue extraída del inventario de procesos morfodinámicos disponible en los registros del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (DESINVENTAR) y del SIMPAD; en ellos están consignados aproximadamente 20 años de reportes de ocurrencias de movimientos en masa en todos los municipios del Valle de Aburrá. Finalmente, el factor detonante introducido en el modelo fue la lluvia, que entró como una probabilidad de excedencia de un umbral crítico de lluvia establecido en investigaciones previas por Montoya et al, 2002.

Antes de empezar a describir cada una de las variables es pertinente aclarar que para todas ellas, con excepción de los procesos que se describirán mas adelante, la metodología en cuanto a toma de decisiones es realizada mediante la técnica del vecino más cercano. A continuación se describen cada uno de los factores tenidos en cuenta en el modelo de zonificación.

4.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

La geología superficial fue considerada como un factor predisponente primordial debido a que ella incluye información relevante sobre la naturaleza física de los materiales involucrados en el fenómeno, así como de sus propiedades y características de resistencia mecánica.

En la Tabla 1 se muestran las diferentes categorías tenidas en cuenta en el proceso de zonificación, las cuales fueron escogidas de acuerdo a criterios de homogeneidad en el comportamiento mecánico.

En el Mapa 1. Se presenta el mapa geológico con las diferentes unidades para el Valle de Aburrá, el cual corresponde al mapa generado por el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 2007c).

Asimismo para el caso del municipio de Medellín, se partió de la anterior base de datos de geología, y se refinó añadiendo depósitos antrópicos que dicho mapa no tenía registrados. Lo anterior en base al inventario personal del interventor del Municipio Mario Florez y al estudio de Instrumentación y Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 1999).

Los depósitos antrópicos que se añadieron se clasificaron en 3 grupos:

- Llenos estructurales, bien conformados y compactados
- Llenos o terraplenes no estructurales, adecuados técnicamente
- Llenos o depósitos no adecuados técnicamente

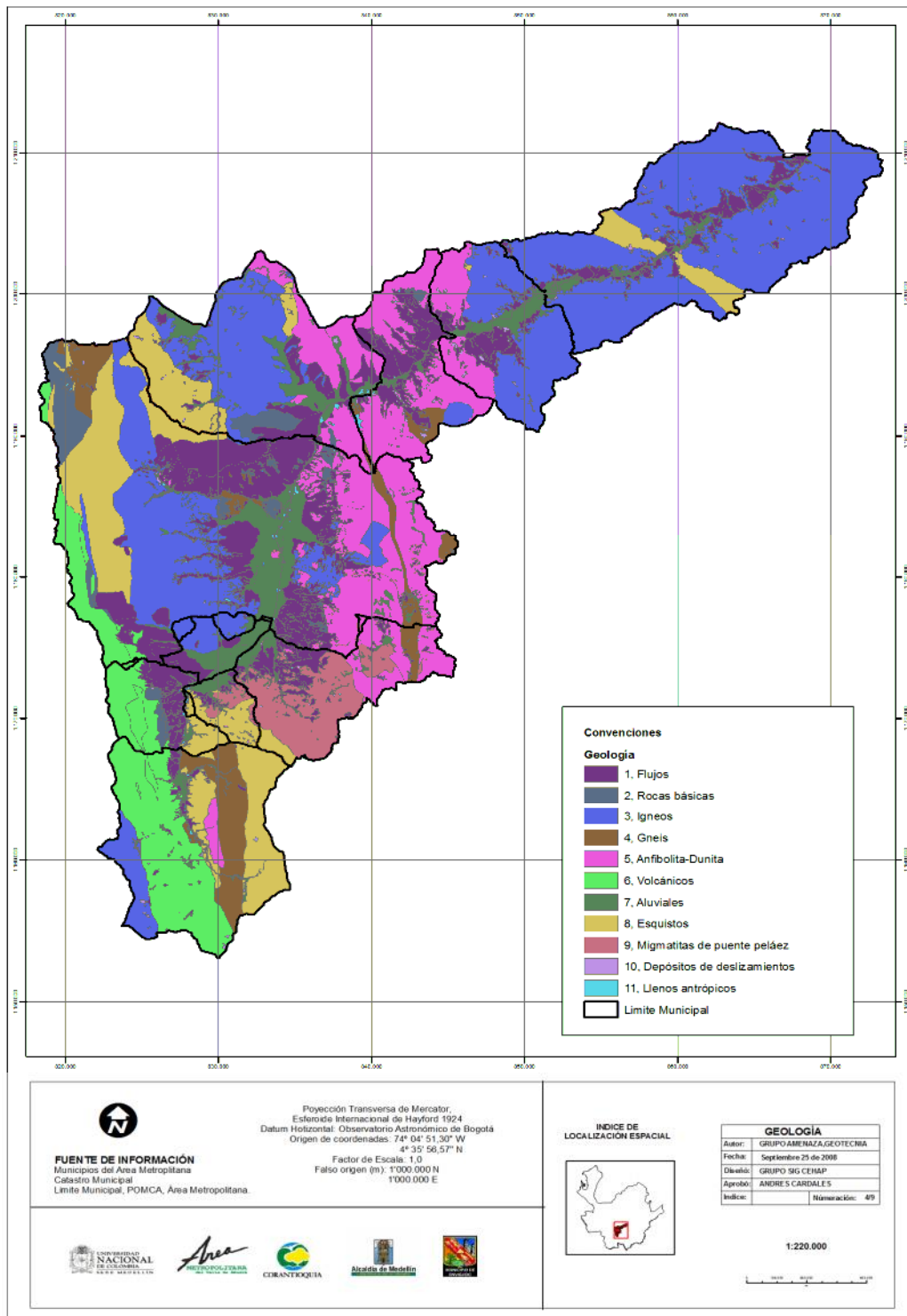
En base a lo anterior en el Mapa 2. Se muestra el mapa de geológico con las diferentes unidades geológicas para el municipio de Medellín.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 1. Categorías de trabajo de geología superficial utilizadas en el proceso de zonificación.

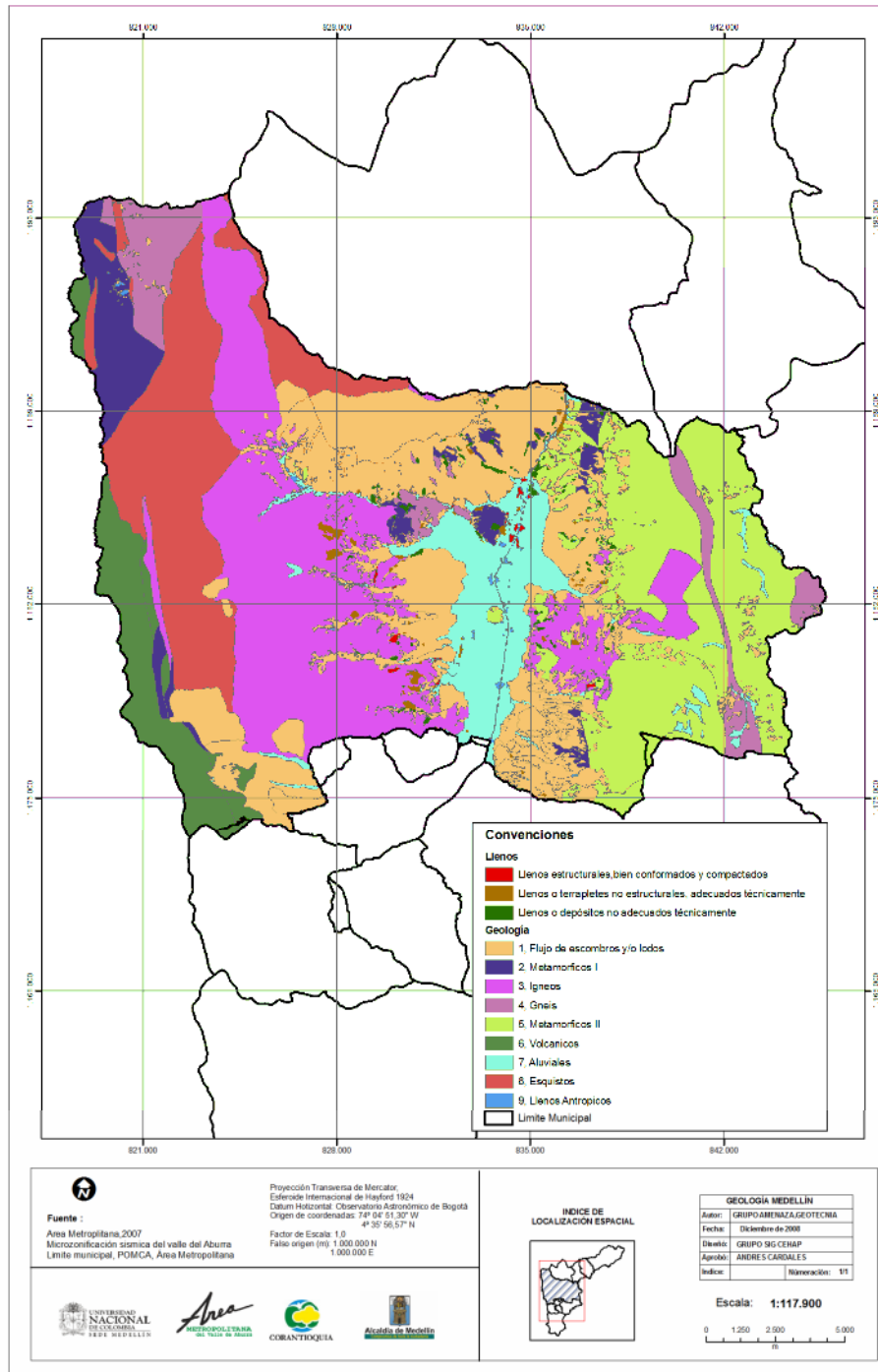
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CATEGORÍA
FLUJOS		
Flujos de escombros y/o lodos	F I	1
Flujos de escombros y/o lodos	F II	
Flujos de escombros y/o lodos	F III	
Flujos de escombros y/o lodos	F IV	
Flujos de escombros y/o lodos aislados	Fa	
Flujos de escombros y/o lodos	Fpre I	
ROCAS BASICAS		
Gabros de Romeral	JgR	2
Metagabro del Picacho	KmP	
Gabros sin diferenciar	Jg	
Peridotita de Romeral	JuR	
IGNEOS		
Stock de San Diego	JgSD	3
Batolito Antioqueño	KcdA	
Stock de Altavista	KdA	
Granodiorita de Amagá	TRgA	
GNEIS		
Gneis de La Iguaá	Knl	4
Gneis del Alto de Minas	PniAM	
Gneis de La Ceja	PRnLC	
Gneis Milonítico de Sajonia	PRnmS	
Gneis de Palmitas	PnP	
ANFIBOLITA-DUNITA		
Dunitas de Medellín (Emplazamiento)	KuM	5
Anfibolitas de Medellín	PRaM	
Anfibolitas Granatíferas de Caldas	PaG	
VOLCANICOS		
Miembro Volcánico de Quebradagrande	KvQG	6
Miembro Volcanosedimentario	KvsQG	
ALUVIALES		
Depósitos aluviales	Qal	7
Depósitos aluviotorrenciales	Qat	
Río Medellín	Río Medellín	
ESQUISTOS		
	Pes	8
MIGMATITAS DE PUENTE PELAEZ		
	PRmPP	9
DEPOSITOS DE DESLIZAMIENTO		
	Qd	10
LLENOS ANTROPICOS		
	QII	11

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 1. Mapa de geología superficial del Área Metropolitana. Fuente: AMVA 2007c, AMVA 1999.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 2. Mapa de geología superficial del municipio de Medellín. Fuente: AMVA 2007c, AMVA 1999.

4.2 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es un factor que muestra detalles interesantes de la estabilidad, ofreciendo características de inclinación y forma del paisaje, ayudando a distinguir tipos de movimientos en masa, además, de reflejar procesos físicos asociados. Un mapa de geomorfología puede reflejar bien las formaciones geológicas y las variaciones de las propiedades útiles en la ingeniería (Varnes D. J., 1984).

El mapa de unidades geomorfológicas usado en este estudio fue el generado por el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 2007c), respetando los nombres de las diferentes unidades pero agrupándolas en 7 categorías de acuerdo a criterios de semejanza en el comportamiento geotécnico. En la Tabla 2 se presentan los nombres de las diferentes unidades y las categorías correspondientes.

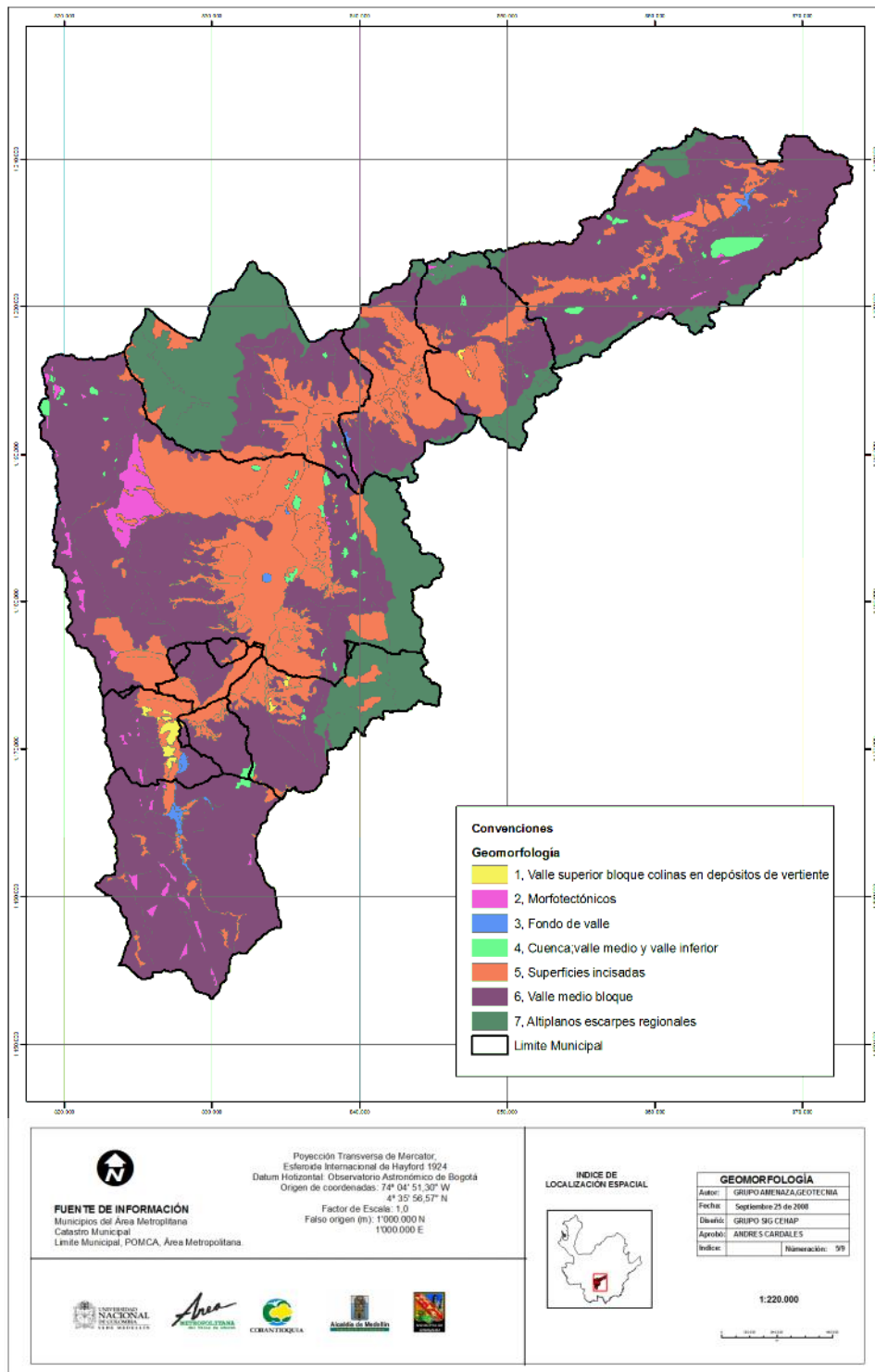
En el Mapa 3. Se presenta el mapa geomorfológico usado, con las diferentes unidades, el cual corresponde, tal como se mencionó anteriormente, al mapa generado por el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 2007c). También se usa este mismo mapa para evaluar la amenaza en el municipio de Medellín, en el Mapa 4. Se observa la geomorfología solo para el municipio de Medellín.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 2. Categorías de trabajo de la geomorfología superficial utilizadas en el proceso de zonificación.

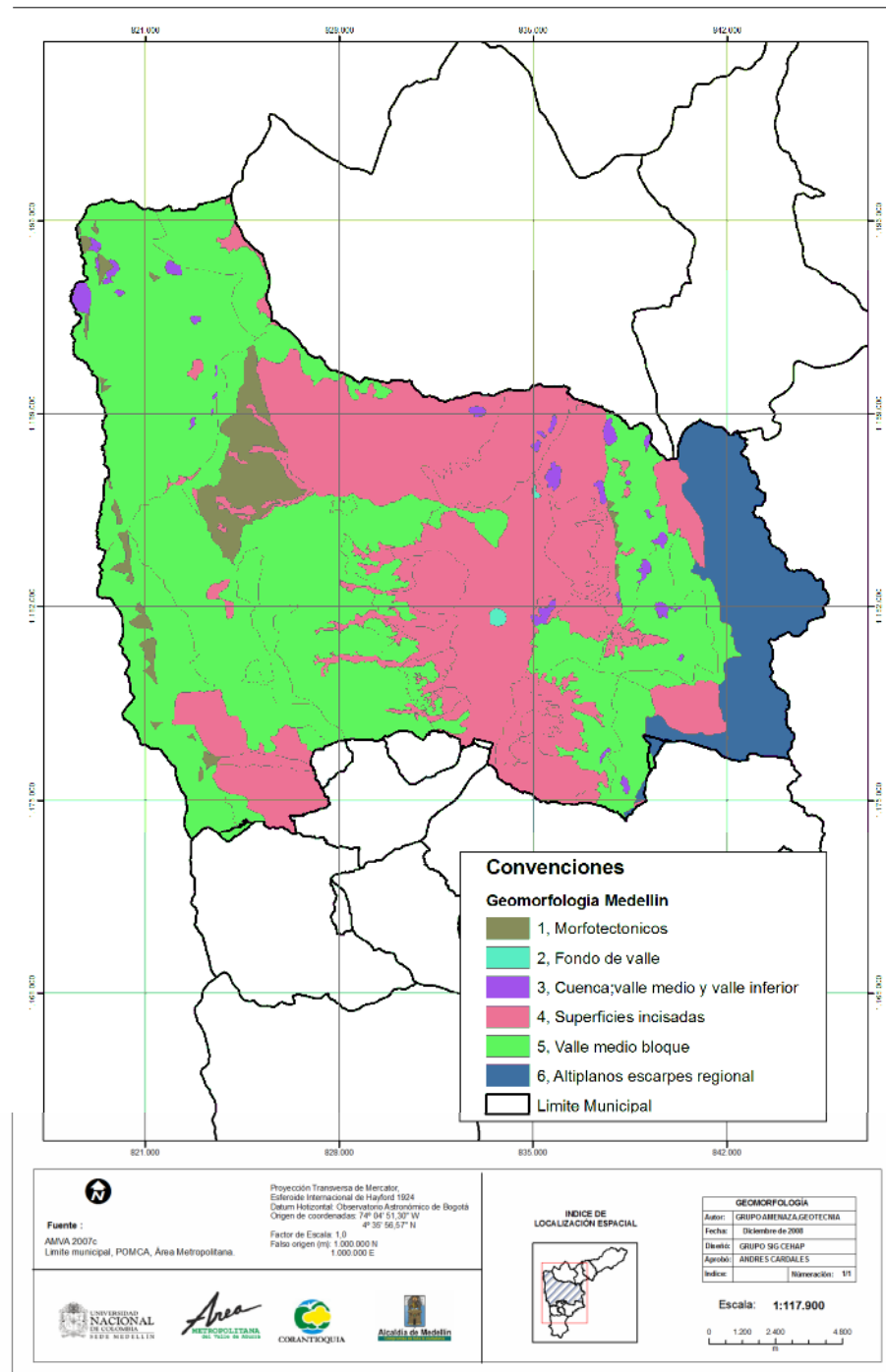
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CATEGORÍA
Valle superior bloque colinas en depósitos d e vertiente	CDV	1
Morfotectónicos	RMT	2
Fondo de valle		
Fondo de valle Terrazas aluviales	TA	3
Fondo de valle Llanura aluvial	LLA	
Fondo de valle geoforma antrópica	GA	
Fondo de valle colina aislada	CA	
Cuenca; Valle Medio y Valle inferior		
Cuenca; Valle Medio y Valle inferior	P	4
Cuenca; Valle Medio y Valle inferior con Peldaño	PÑ	
Superficies Incisadas		
Altiplanos superficie de erosión depósitos sin incisión	DSI	5
Superficies con baja incisión	SBI	
Superficies moderadas en depósitos moder adamente incisadas	SMDMI	
Superficies suaves en depósitos altamente incisados	SSDAI	
Superficies suaves en depósito moderadamente incisados	SSDMI	
Valle superior bloque Monterredondo superficie suaves por depositación altamente incisada	SSDPAI	
Superficies suaves en depósitos poco incisados	SSDPI	
Valle inferior bloque Hatillo Barbosa vertientes en suelo residuales poco incisadas	VRSPI	
Valle medio bloque Comuna Nororiental baja vertientes en suelos		5
Residuales moderadamente incisados	VSRMI	
Vertientes en suelo residual poco incisadas	VSRPI	
Valle Medio Bloque		
Valle medio bloque colinas en suelo residual	CSR	6
Valle medio bloque escarpe lineal superior	ELS	
Valle medio bloque escarpes semicirculares superiores	ESCS	
Valle medio bloque lomos	L	
Altiplanos escarpes regional		
Altiplanos, escarpes regional, lomos altos	LA	7
Altiplanos escarpes regional lomos bajos	LB	
Altiplanos escarpes regional lomerío	LR	

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 3. Mapa de geomorfología del Valle de Aburrá. Fuente AMVA 2007c

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 4. Mapa de geomorfología del municipio de Medellín. Fuente AMVA 2007c

4.3 USOS DEL SUELO

El uso del suelo es un factor importante en la dinámica del proceso de degradación del terreno, ya que es frecuentemente uno de los principales detonantes, teniendo como característica desfavorable el hecho de tener una variabilidad temporal mayor que los demás factores considerados.

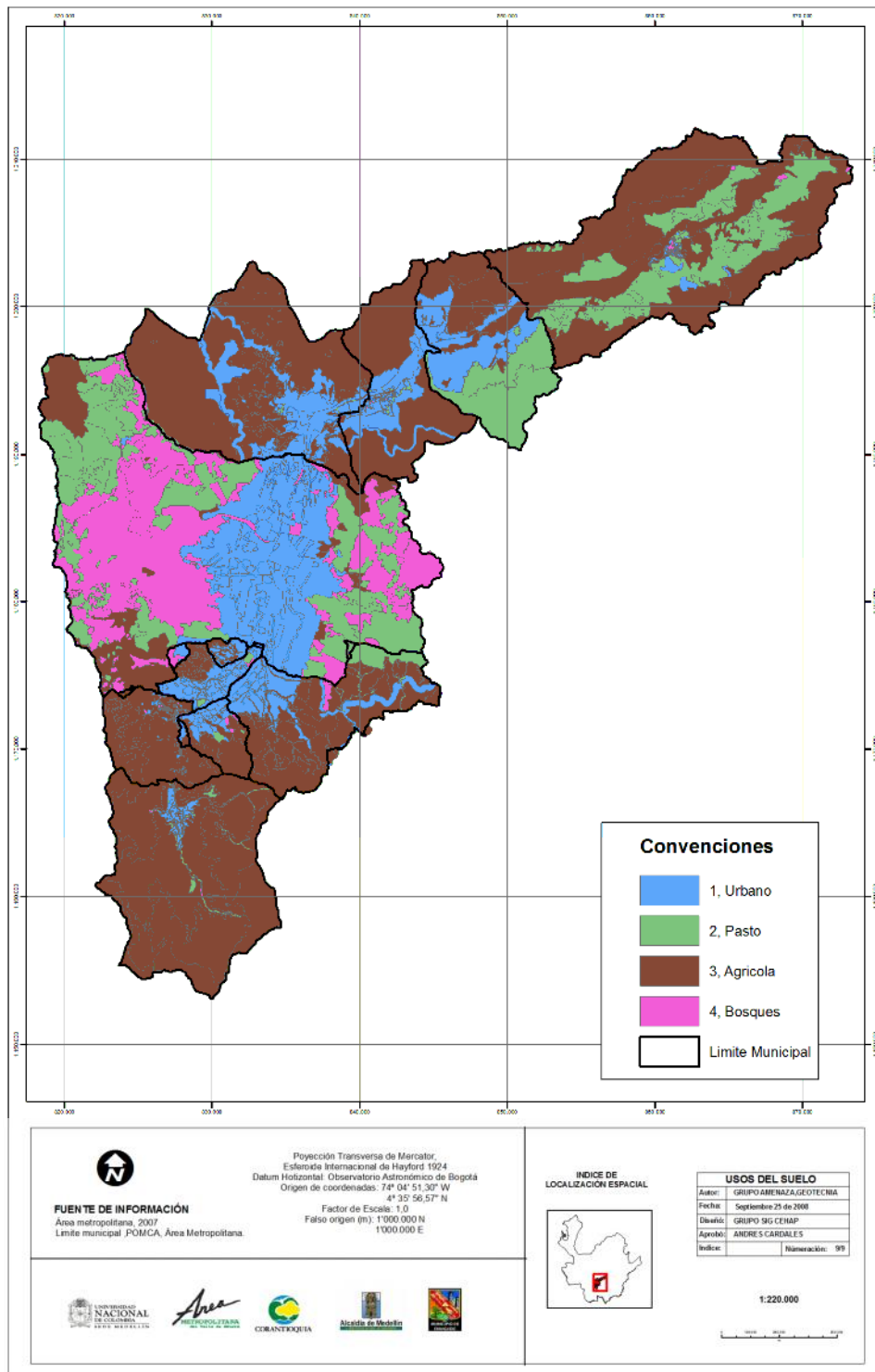
A partir de una compilación de información obtenida de los planes de ordenamiento territorial de los municipios y de información suministrada por el proyecto de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 2007c), el Área Metropolitana del Valle de Aburrá suministró un mapa de usos del suelo cuyas categorías fueron agrupadas en 4 tipos diferentes según su comportamiento geotécnico, tal como se muestra en la Tabla 3, siguiendo la sugerencia de García (2004).

Tabla 3. Categorías de trabajo de usos del suelo utilizadas en el proceso de zonificación.

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	AMVA	CATEGORÍA
URBANO	Comercial	COM	3	1
	Construcciones	CON	4	
	Expansión	EXP	6	
	Industrial	IND	7	
	Institucional	INS	8	
	Minería	MIN	9	
	Recreacional	REC	20	
	Residencial	RES	21	
	Residencial y comercial	RES-COM	22	
	Servicios	SER	23	
PASTO	Pastos	PAS	10	2
	Rastrojo	RAS	17	
	Rastrojo alto	RAS-ALT	18	
	Rastrojo bajo	RAS-BAJ	19	
	Zonas verdes	ZON	27	
AGRICOLA	Producción agropecuaria	PRO-AGR	11	3
	Producción agropecuaria	PRD-AGR	12	
	Protección	PRO	13	
	Protección	PRT	14	
	Protección producción	PRT-PRD	15	
	Protección producción	PRO-PRD	16	
	Suelo desnudo	SUE-DES	25	
	Uso agrícola	USO-AGR	26	
	Cuerpos de agua	CUE-AGU	5	
BOSQUES	Bosque natural	BOS	1	4
	Bosque plantado	BOS-PLA	2	
	Sin-uso	S-U	24	

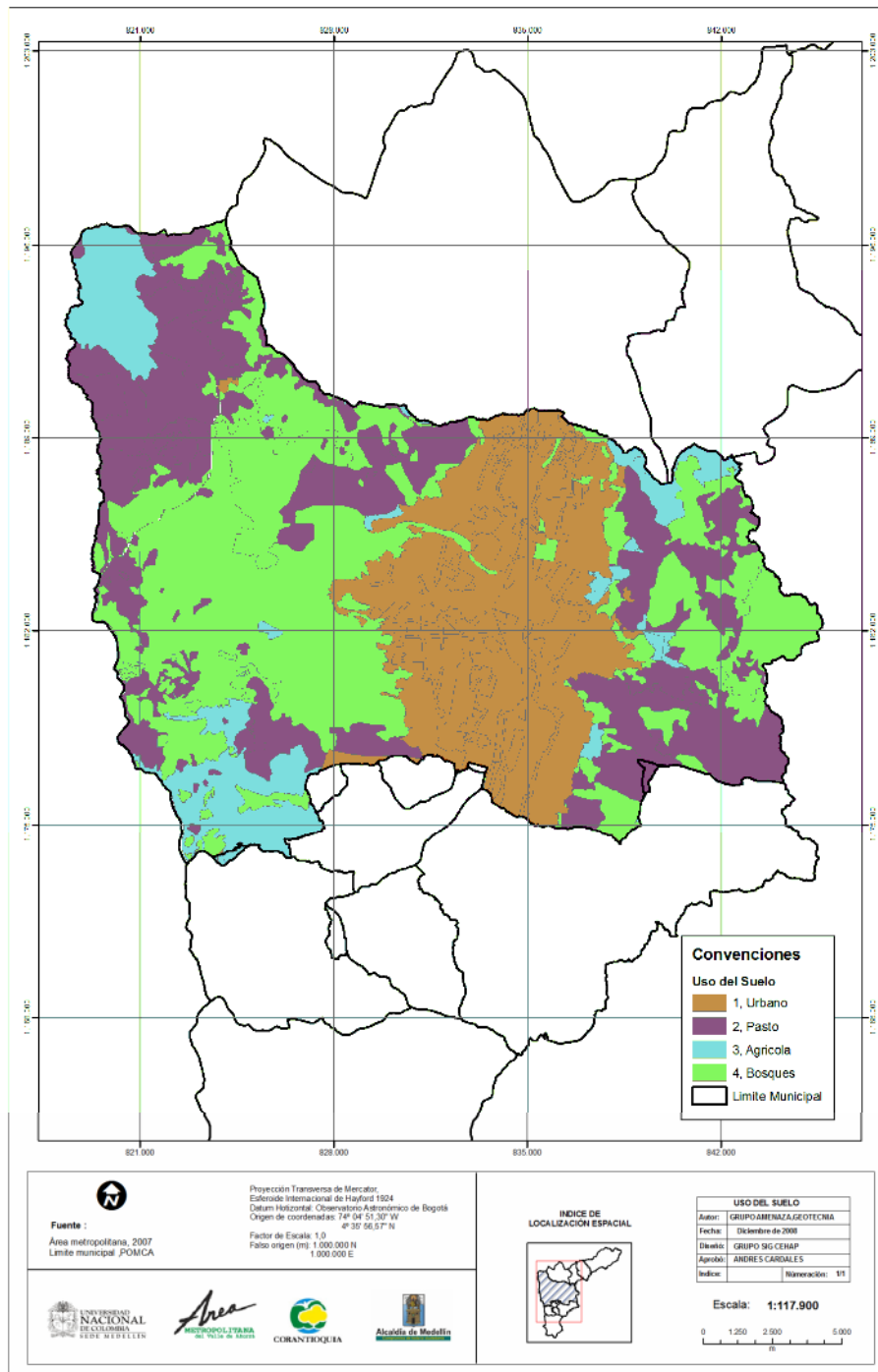
En los Mapas 5 y 6 se presentan las diferentes unidades para el Valle de Aburrá y Medellín, respectivamente, de acuerdo a como fueron suministradas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 5. Mapa de usos del suelo del Valle de Aburrá. Fuente: AMVA, 2007c

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 6. Mapa de usos del suelo del municipio de Medellín. Fuente: AMVA, 2007c

4.3 PENDIENTES

La pendiente es un factor determinante para la estabilidad de una ladera ya que suministra información sobre la magnitud de las fuerzas gravitacionales actuantes (Fuerzas Motoras) en ella. Además, lleva en cuenta características adicionales como, por ejemplo, espesor de la capa de suelo residual, ya que a mayor pendiente menor es su potencia, o profundidad del nivel freático. De lo anterior, se puede decir que no es necesariamente cierta la premisa de que “a mayor pendiente mayor es la probabilidad de ocurrencia del evento de movimiento en masa”, ya que debe existir un espesor de suelo suficiente, que comúnmente se presenta en pendientes intermedias (Lee et al., 2004).

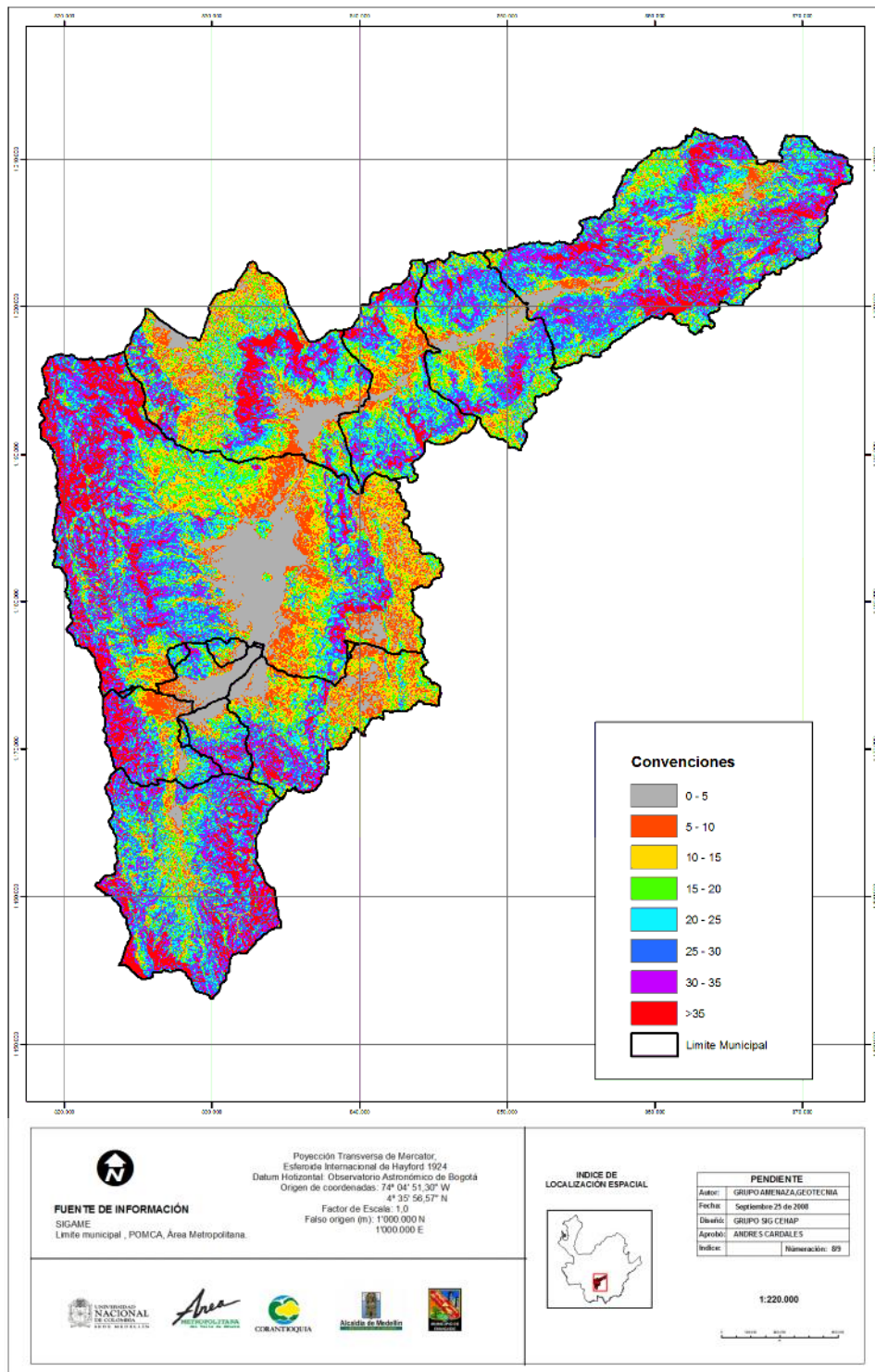
A partir de lo sugerido por García (2004), se adoptaron 8 intervalos de pendientes de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4. Nótese que para pendientes menores a 35° la subdivisión de las clases se hace de manera discriminada en múltiplos de 5°. A partir de 35° no se consideran subdivisiones adicionales por considerar el autor que a partir de esta inclinación el efecto en la generación de movimientos en masa es constante.

Tabla 4. Categorías de trabajo de las pendientes utilizadas en el proceso de zonificación.

TIPO	CATEGORÍA
Pendiente entre 0°-5°	1
Pendiente entre 5°-10°	2
Pendiente entre 10°-15°	3
Pendiente entre 15°-20°	4
Pendiente entre 20°-25°	5
Pendiente entre 25°-30°	6
Pendiente entre 30°-35°	7
Pendiente >35°	8

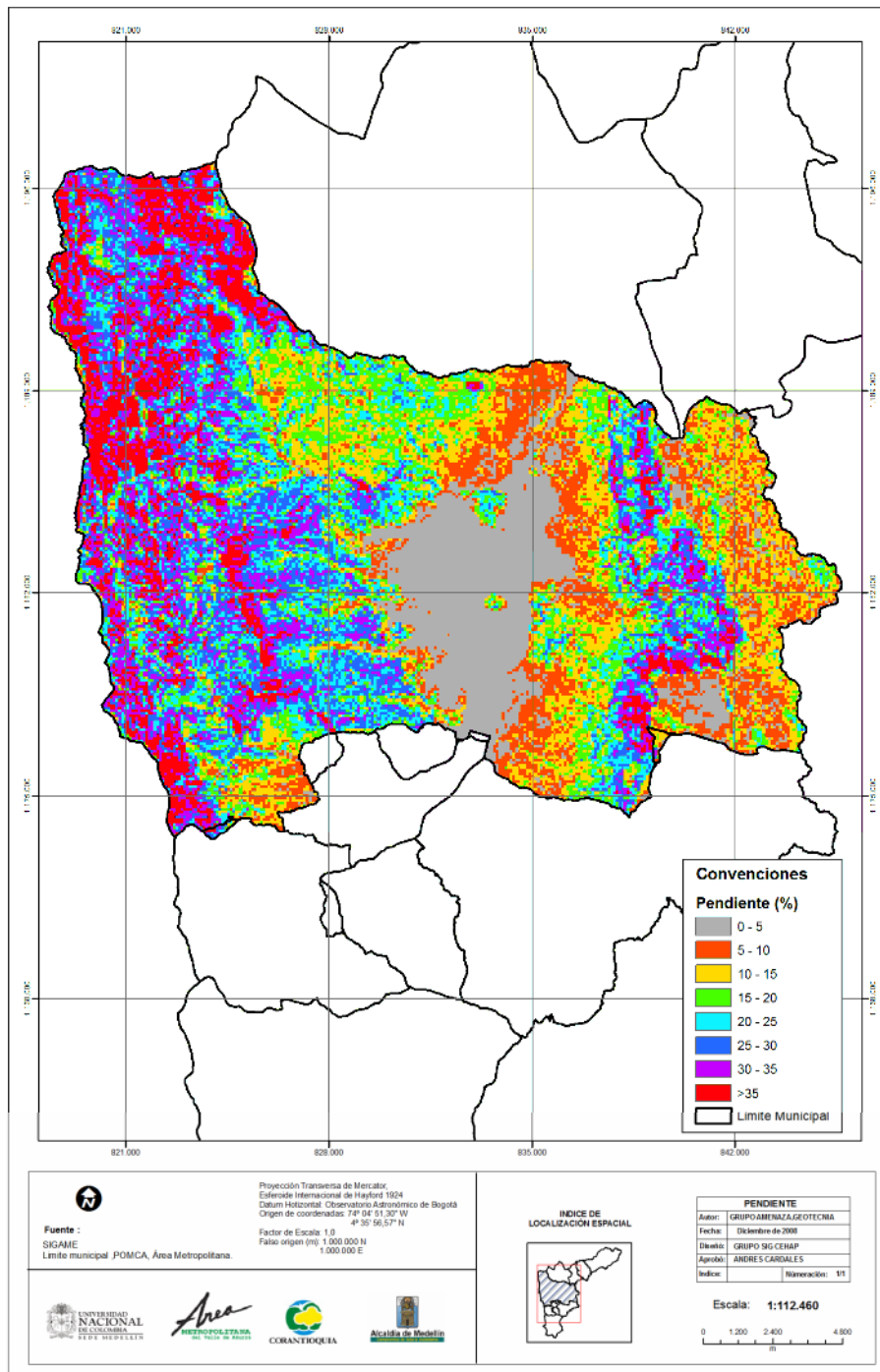
El mapa de pendientes considerado se presenta en el Mapa 7. Más adelante, en capítulos posteriores se presenta un análisis de esta información con el propósito de presentarla adecuadamente a la red neuronal. Asimismo, se toma esta información para el municipio de Medellín, lo cual se aprecia en el Mapa 8.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 7. Mapa de pendientes del Valle de Aburrá. Fuente: Cartografía SIG AME.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 8. Mapa de pendientes del municipio de Medellín. Fuente: Cartografía SIGAME

4.4 PROCESOS MORFODINÁMICOS

El inventario de procesos morfodinámicos, sin duda alguna, es uno de los factores más importantes, ya que muestra la presencia o no de algún tipo de inestabilidad en el tiempo, lo cual es de gran utilidad en la metodología que pretenda hacer una aproximación probabilística de la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

La base de datos de procesos suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene la información digitalizada de tres formas distintas: áreal, lineal y puntual, dependiendo del tipo de proceso al cual se esté haciendo referencia. Esta forma de representación sólo tiene significado físico en la medida en que pueda indicar la extensión del área de influencia del proceso en cuestión, no obstante es más una simple forma de representación cartográfica. En la Tabla 5 se presentan los tipos de procesos tenidos en cuenta en este trabajo, de acuerdo con las denominaciones dadas en los inventarios presentados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Tabla 5. Clasificación de los procesos.

TIPO AREAL
Deslizamiento de rocas
Movimiento de masa activo
Movimiento de masa antiguo
TIPO LINEAL
Movimiento de masa activo
Movimiento de masa inactivo
TIPO PUNTUAL
Deslizamiento

En este punto es importante destacar que dada la cobertura geográfica del proyecto ; el cual se circunscribe a todos los municipios el Valle de Aburrá, y la diferencia substancial entre los inventarios levantados en diferentes municipios, especialmente los inventarios de Medellín en contraste con los inventarios de los municipios restantes, se hizo necesario conformar una base de datos de movimientos en masa a partir de la información de dos fuentes diferentes. Para el municipio de Medellín se usó la información registrada en los inventarios del SIMPAD, mientras que para el resto de los municipios se usó la información de la base de datos del proyecto DESINVENTAR (AMVA, 2008).

Teniendo presente que el objeto de estudio son los movimientos en masa, fueron descartados de los inventarios aquellos procesos de tipo erosivo o claramente antrópicos. No fueron considerados procesos identificados en trabajos puntuales del tipo: tesis de grado, informes técnicos, estudios de micro-cuencas, planes de ordenamiento territorial etc, debido a que esta información no se distribuye de manera homogénea en el territorio estudiado. Existen zonas intensamente estudiadas y en contrate, otras que carecen de cualquier tipo de referente académico o estudio previo. Este desbalance genera un sesgo difícil de manejar, no sólo en modelos de RNA`s, sino en cualquier tipo de modelo de zonificación. En el Mapa 9. Se presenta los diferentes procesos considerados, todos ellos

movimientos en masa ocurridos en un intervalo de tiempo de aproximadamente 20 años comprendidos entre 1985-2006.

Para el municipio de Medellín, se consideraron los anteriores inventarios y se complementaron con el mapa de procesos morfodinámicos añadiendo procesos. Lo anterior en base al inventario personal del interventor del municipio Mario Florez y al estudio de Instrumentación y Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 1999), lo cual se observa en el Mapa 10.

4.5 LLUVIAS

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá proporcionó la base de datos de precipitación del proyecto; esta información ya había sido utilizada en un trabajo llamado *Red Río Fase II* (AMVA, 2007b) el cual contiene los registros de precipitación diaria de 39 estaciones pluviométricas ubicadas en todo el Valle de Aburrá. En el Mapa 11. Se presenta la ubicación de las estaciones. Los registros completos de precipitación se presentan en medio magnéticos en el DVD anexo bajo la carpeta llamada Lluvia_BD. Antes de su presentación al modelo neuronal, esta información debió ser procesada de tal forma que incluyera de manera adecuada los umbrales de lluvia conocidos como generadores potenciales de movimientos en masa. Este procesamiento se explica en detalle en la sección 5.2 de este informe.

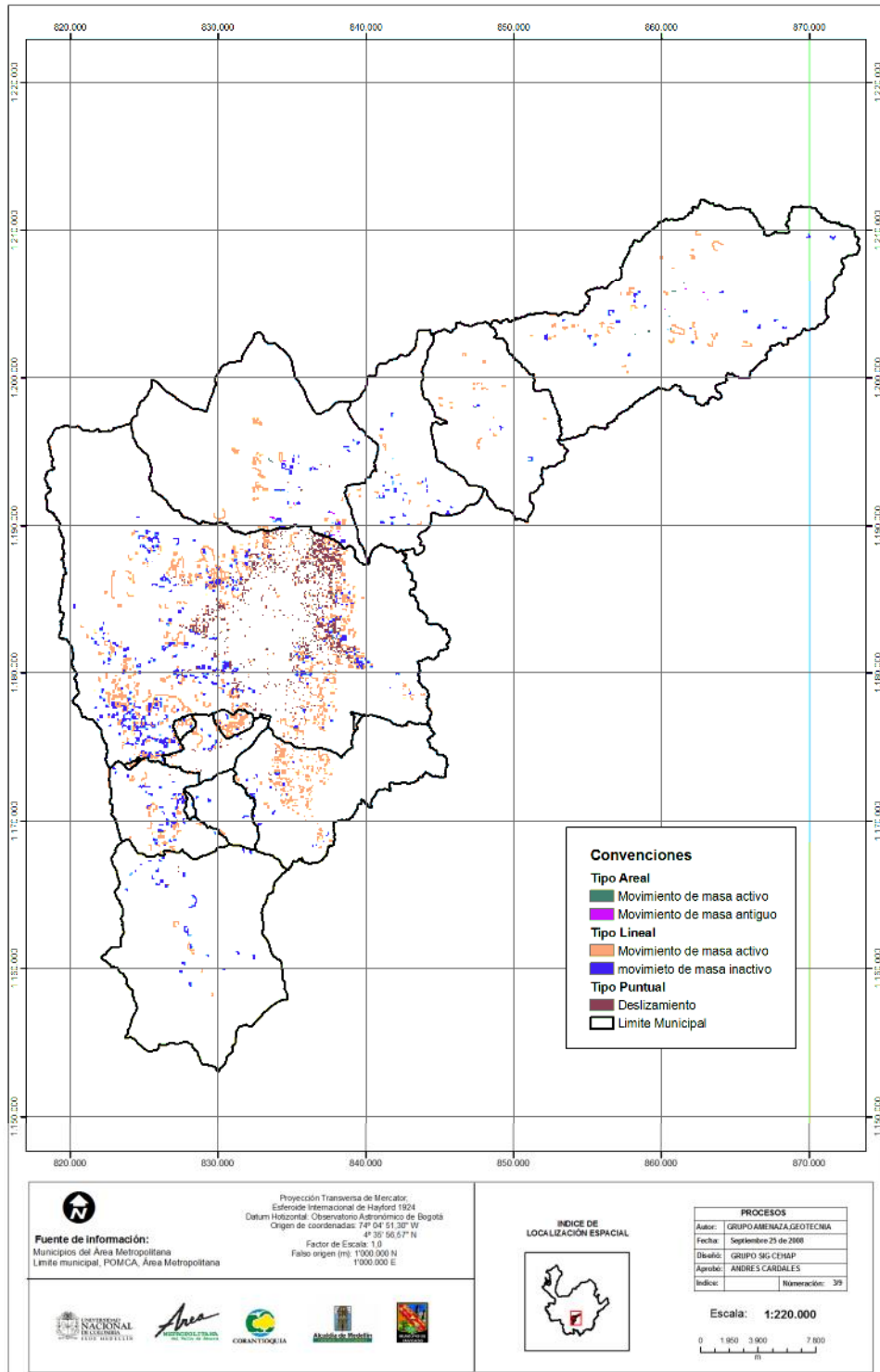
4.6 CURVATURA DEL TERRENO

Es un producto derivado de la topografía, es considerada como un factor predisponente para la ocurrencia de movimientos en masa ya que ofrece información sobre la estabilidad y sobre la susceptibilidad al fenómeno de la lluvia de una ladera. Esta variable solo será considerada para el caso del municipio de Medellín. Cuantos más negativos son los valores, más cóncava es la superficie; cuanto más positivos sean los valores, más convexa es la superficie; cuanto más cercano ha cero se encuentren los valores la superficie es más recta, se agruparon los valores de curvatura en los siguientes 5 grupos:

- Muy cóncava : superficie de curvatura fuertemente cóncava (-5 a -1)
- Concava: superficie de curvatura moderadamente concava (-1 a -0.25)
- Plana: Superficies de curvaturas rectas (-0.25 a 0.25)
- Convexa: Superficie de curvatura moderadamente convexa (0.25 a 1)
- Muy convexa: Superficie de curvatura fuertemente convexa (1 a 5)

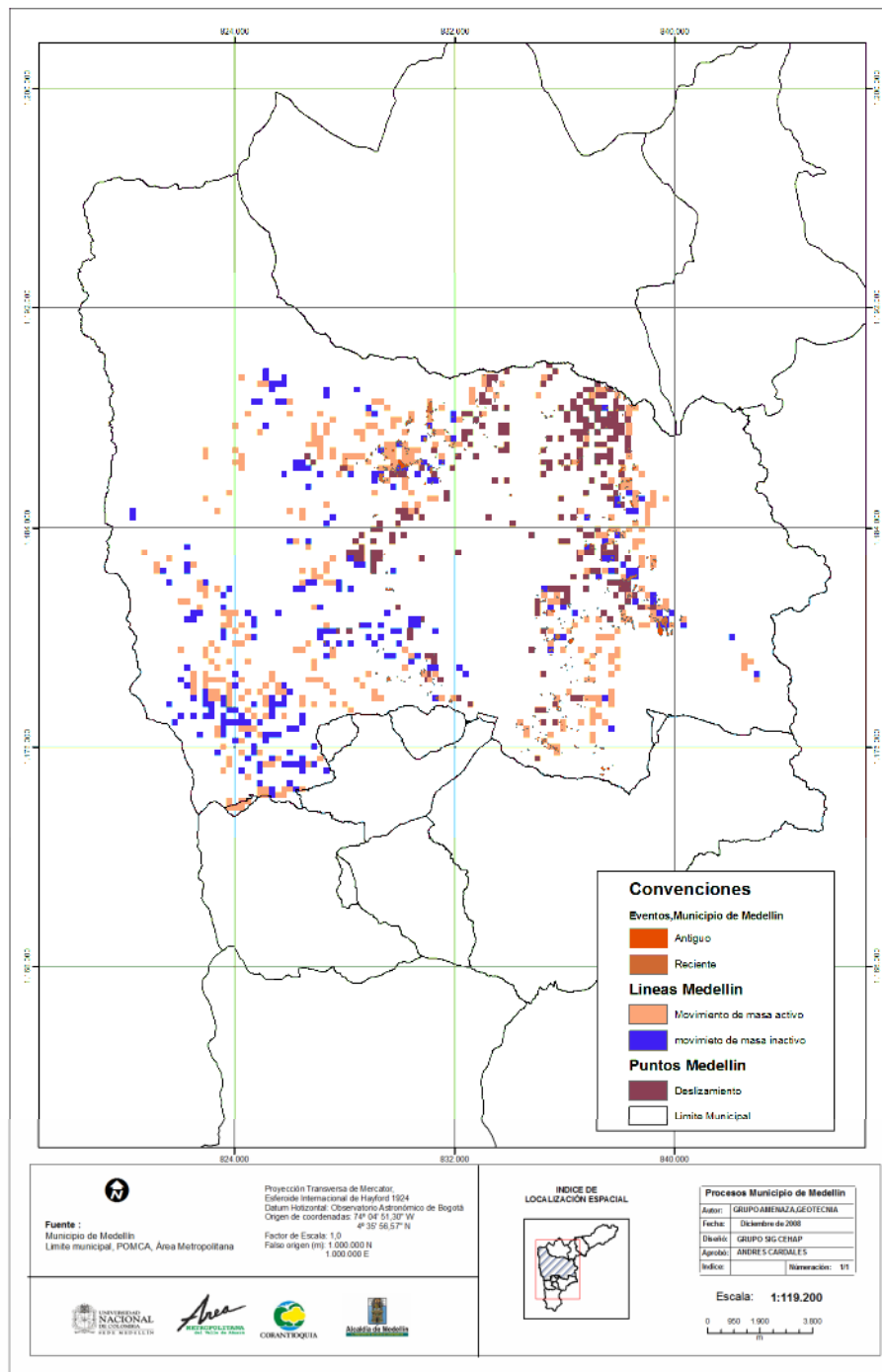
En Mapa 12. Se muestra el mapa de curvatura superficial del municipio de Medellín.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



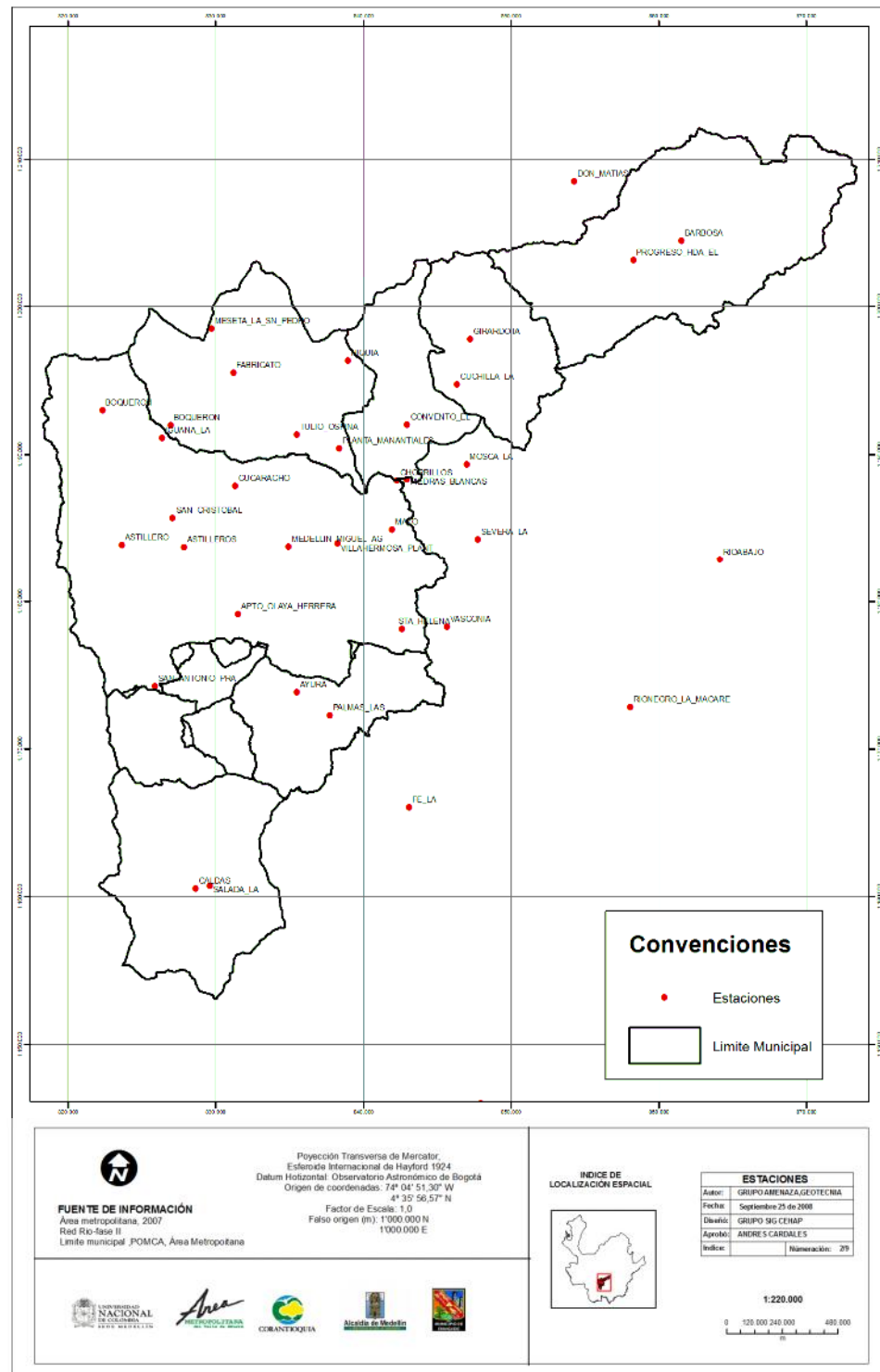
Mapa 9 Mapa de procesos morfodinámicos del Valle de Aburrá. Fuente: SIMPAD Y AMVA 2008

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



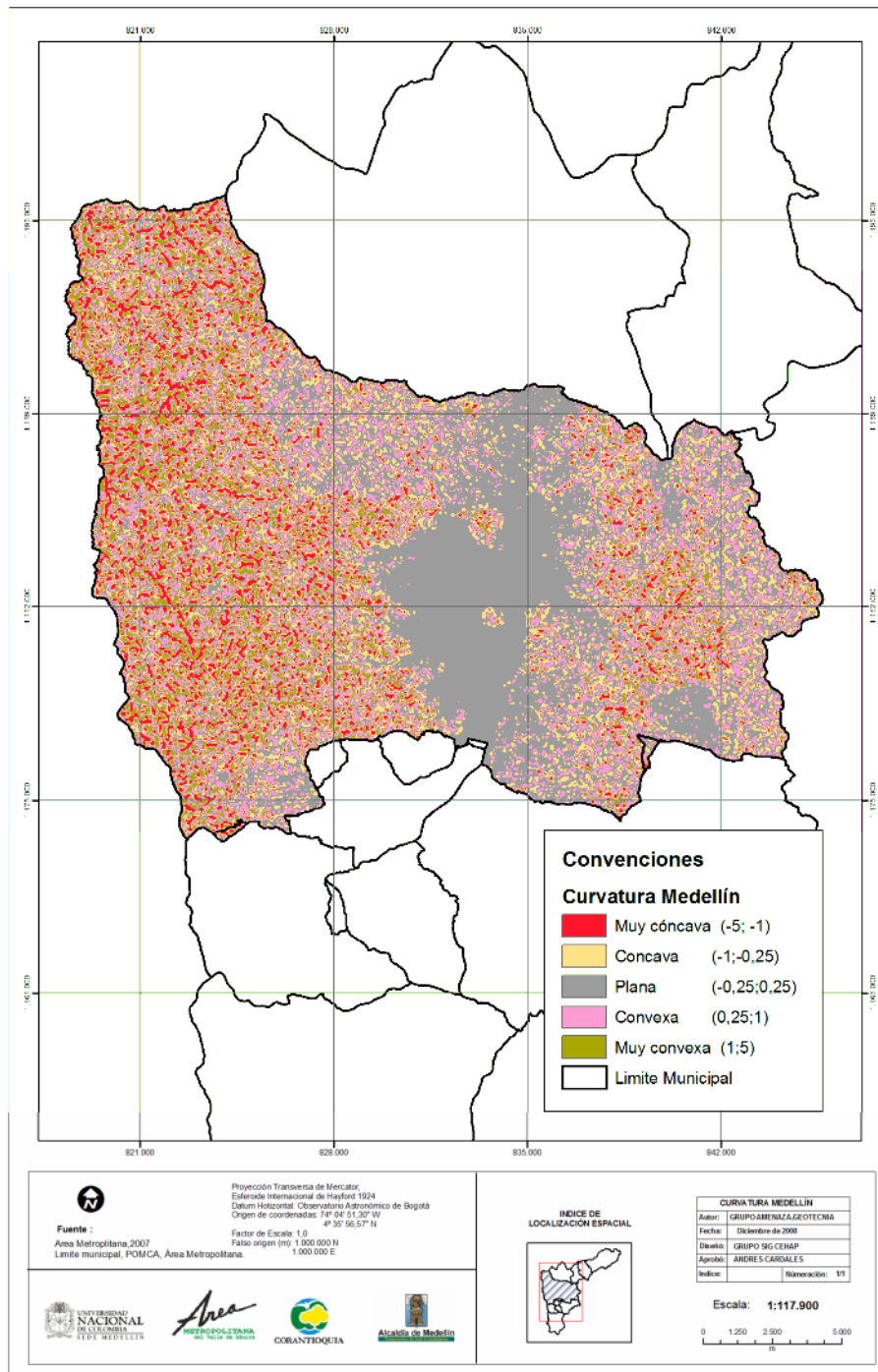
Mapa 10. Mapa de procesos morfodinámicos del municipio de Medellín. Fuente: SIMPAD Y Municipio de Medellín 2008.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 11. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas del Valle de Aburrá

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 12. Mapa de curvatura superficial para el municipio de Medellín.

5. BASE DE DATOS

Con la información secundaria básica suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la cual fue descrita en la sección anterior, se procedió a crear una base de datos tendiente a alimentar el modelo de zonificación. Inicialmente se realiza un procedimiento de división del territorio en unidades de trabajo cuadradas de 100 m y 50m de lado para el Valle de Aburra y el Municipio de Medellín respectivamente. Esta celda de trabajo se constituye en la unidad básica a la cual se le asignan atributos que corresponden a características del territorio relevantes para el modelo de zonificación. Considerado el tamaño del territorio estudiado, no es conveniente generar celdas de trabajo menores puesto que la cantidad resultante sería exagerada para ser manejada con agilidad durante el pre-procesamiento de los datos y durante la propia fase de entrenamiento. Como resultado de esta división se contabilizaron 115545 y 115136 celdas para el Valle de Aburrá y Medellín respectivamente, cada una de las cuales contiene información de los atributos a considerar, los cuales fueron descritos en la sección anterior.

A continuación se explica la metodología de generación de la base de datos para los atributos del terreno (geología, geomorfología, uso del suelo, pendientes, curvaturas y procesos). Luego se mencionará el procedimiento ejecutado para la generación del atributo lluvia y permeabilidad.

5.1 GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL TERRENO

La metodología de asignación del valor para cada celda se basa en el principio del vecino más próximo, el cual consiste en atribuir como valor único del parámetro en cuestión la categoría que tenga mayor influencia según los porcentajes de área ocupados por las diferentes clases en la celda. En la Figura 6 se presenta el ejemplo de una celda con cuatro clases de un atributo determinado. El valor de la celda corresponde a la clase 4 que es la que tiene más preponderancia por área ocupada en la celda estudiada. Con este procedimiento se crearon las bases de datos de todos los atributos considerados, con excepción de los procesos morfodinámicos, los cuales se explican mas adelante.

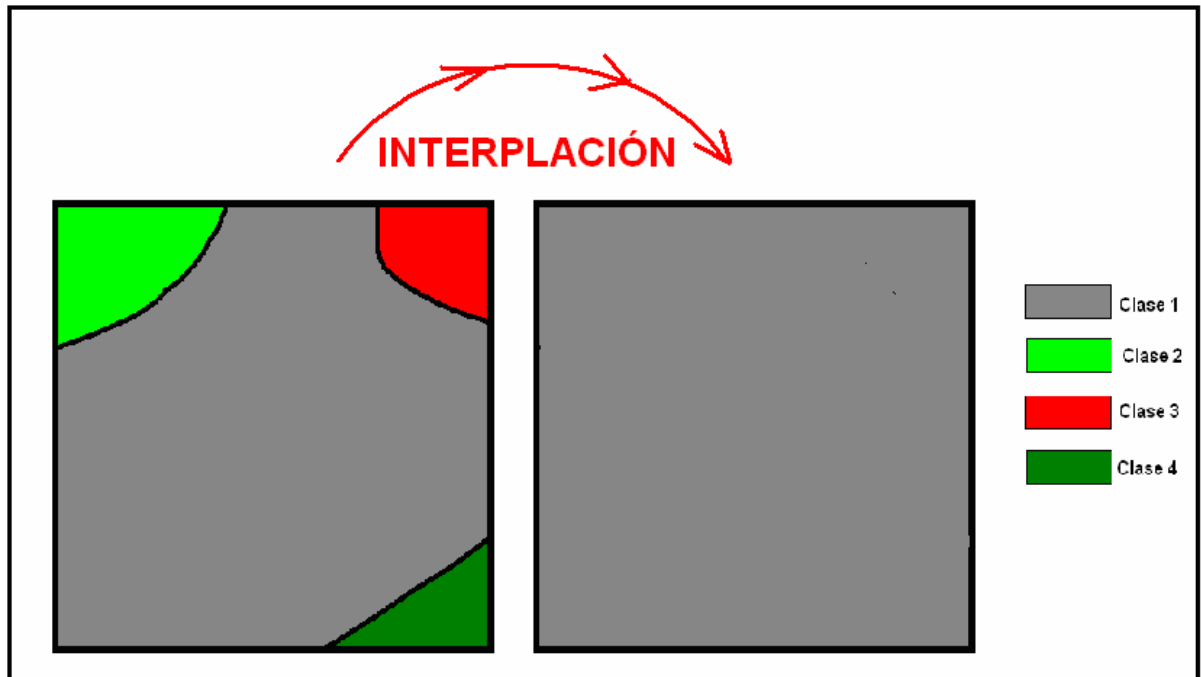


Figura 6. Ejemplo de asignación de un valor de clase a una celda de trabajo con varias clases de un mismo atributo.

Una vez realizado el procedimiento de calificación de cada celda, se deben revisar las coberturas de las categorías para cada uno de los atributos considerados. Esto se hace de manera simple mediante la observación de los histogramas de frecuencia que son calculados teniendo como población al número total de celdas de trabajo resultante.

En la Figura 7 se muestra el histograma de frecuencias de la geología cuando es clasificada en las once categorías de trabajo. Nótese la preponderancia de algunas categorías, como la 1, 3, 5 y 8, sobre las demás, y otras categorías pobremente representadas en relación al total, como la 10 y la 11. Aunque esta distribución no tiene, a priori, ninguna influencia en el potencial de predicción del modelo neuronal, debe ser tomada en cuenta durante el proceso de selección de la base de datos de entrenamiento, para la cual deberá tenerse la precaución de conservar, en el mayor grado posible, una distribución similar. Esta observación es válida para el resto de los atributos, al menos en las fases iniciales de entrenamiento del modelo. Otras alternativas de entrenamiento menos convencionales, parten de la selección de la base de datos de entrenamiento, según criterios de igualdad en términos de ocurrencia-no ocurrencia de movimientos en masa. Este tipo de alternativas, entre otras, serán objeto de estudio en fases subsiguientes del proyecto.

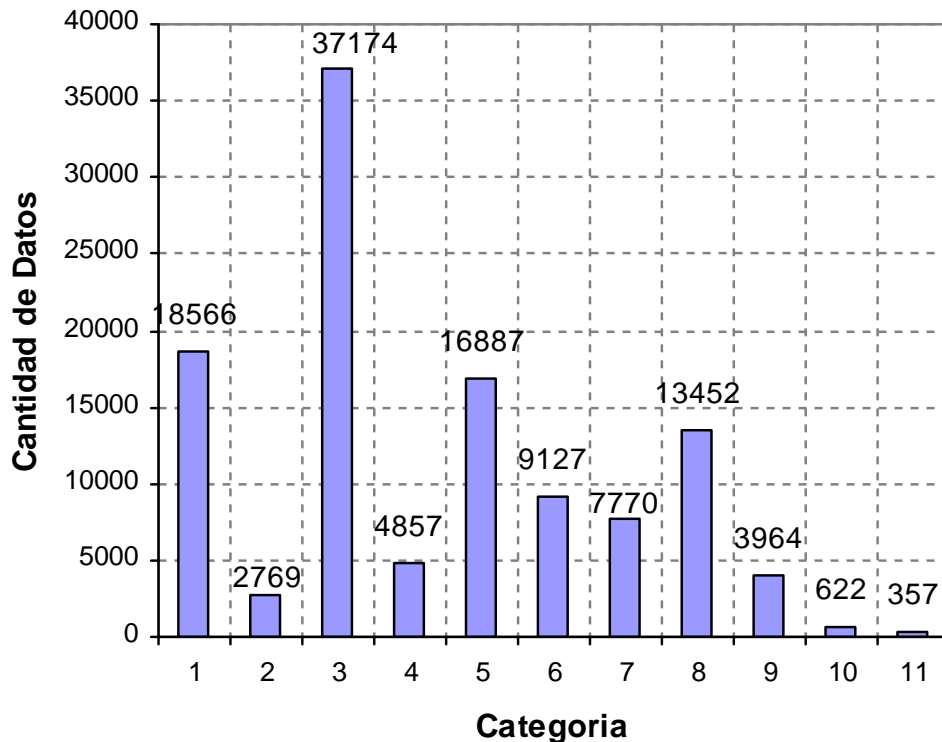


Figura 7. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo geología. Las categorías están discriminadas en la Tabla 1.

En la Figura 8 se muestra el histograma de frecuencias de las categorías correspondientes a la geomorfología; notándose un dominio de las categorías 5, 6 y 7, correspondientes a las denominadas “superficies incisadas”, “valle medio” y “escarpes”, las cuales, coincidentemente, concentran el mayor número de eventos de movimientos en masa. Esta característica potencia la importancia de la geomorfología como factor influyente en el proceso de predicción de ocurrencias de movimientos en masa.

La Figura 9 presenta el histograma de frecuencias de las categorías de los usos del suelo. Aunque existe un dominio de la categoría 3 (agrícola), éste no es muy grande en comparación con las otras tres categorías. Técnicamente se puede considerar que todas las categorías están igualmente representadas en el territorio estudiado. Un fenómeno similar ocurre con las categorías de pendiente, tal como se puede observar en el histograma presentado en la Figura 10.

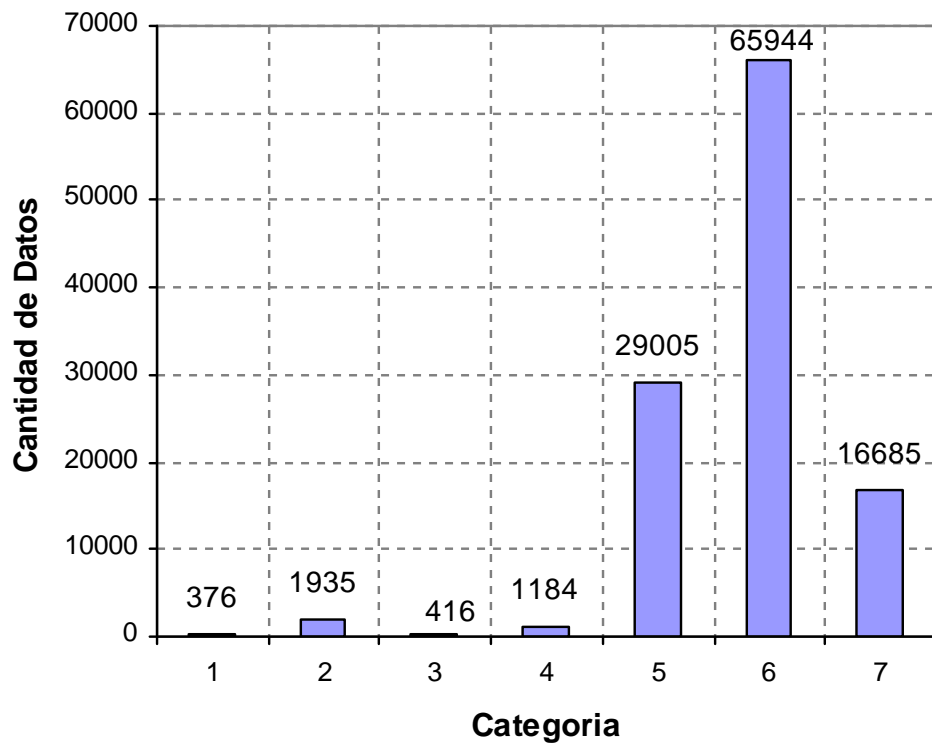


Figura 8. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo geomorfología .
Categorías en tabla 2.

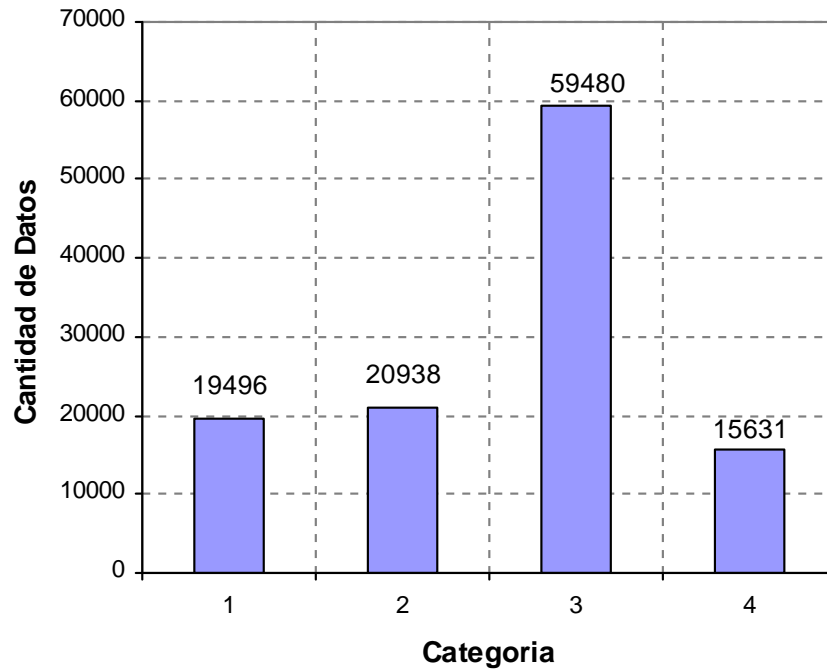


Figura 9. Histograma de frecuencia para las categorías del atributo uso del suelo. Categorías en Tabla 3.

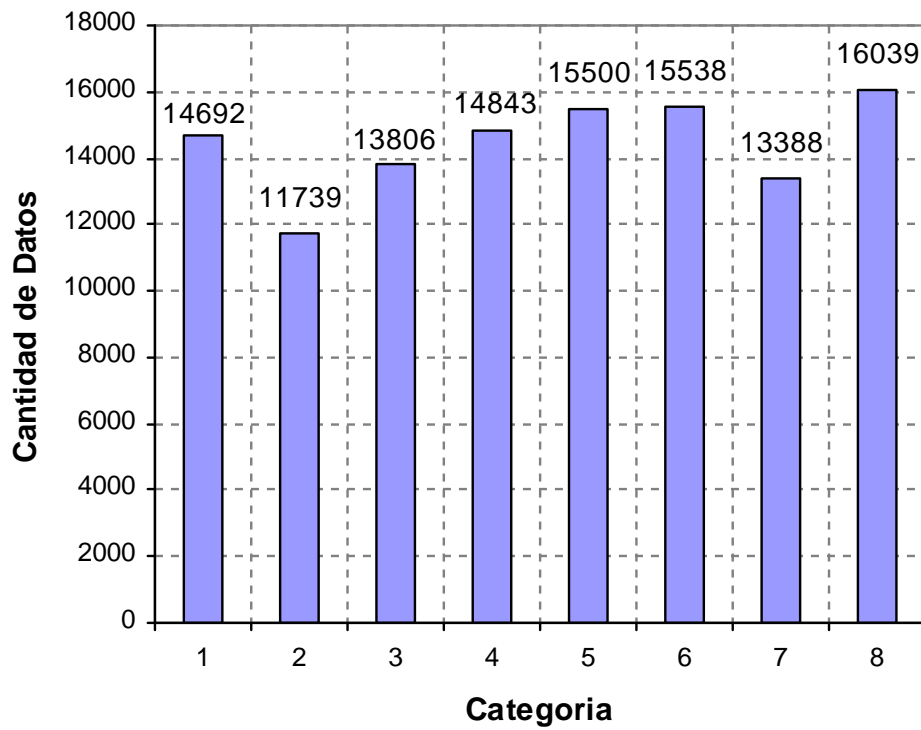


Figura 10. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo pendientes. Categorías en Tabla 4

Para complementar la base de datos es necesario introducir información relacionada con el inventario de procesos del cual se mencionó en la sección anterior. Dicho inventario ofrece la posibilidad de ser tenido en cuenta de dos formas diferentes a saber:

- A. Mediante un sistema binario en el cual cada celda que tenga uno o más procesos es calificada con el número 1, mientras que las celdas sin procesos son calificadas con el número 0.
- B. Mediante un sistema de indicador probabilístico de la ocurrencia de movimientos en masa. En este caso se estima la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa asociada a cada celda. Teniendo en cuenta que para algunos lugares del territorio estudiado se presentaban hasta dos eventos por año, se considera adecuado estimar la probabilidad semestral. El indicador asociado a cada celda se obtiene entonces de dividir el número de eventos registrados entre 40, es decir, entre el número de semestres de cobertura de registros de la base de datos. Una vez asignado el indicador probabilístico a cada celda, se procedió a verificar la distribución estadística de este atributo, encontrándose que para tres o más eventos el número de datos era muy bajo, a diferencia de las demás categorías, por lo cual se consideró viable agrupar en un solo grupo, aquellas celdas con dicha cualidad, asignándole un valor ponderado 14.5% y 11.5% de probabilidad

semestral de ocurrencia de un movimiento en masa para el Valle de Aburra y Medellín respectivamente.

En la Figura 11 se muestra un esquema que indica la forma como es realizado el conteo de procesos para una celda de trabajo. Se observa que la celda en cuestión está afectada por dos procesos de área, tres puntuales y dos lineales, dando como resultado un índice probabilístico de 0.175, o 17.5 % (7/40).

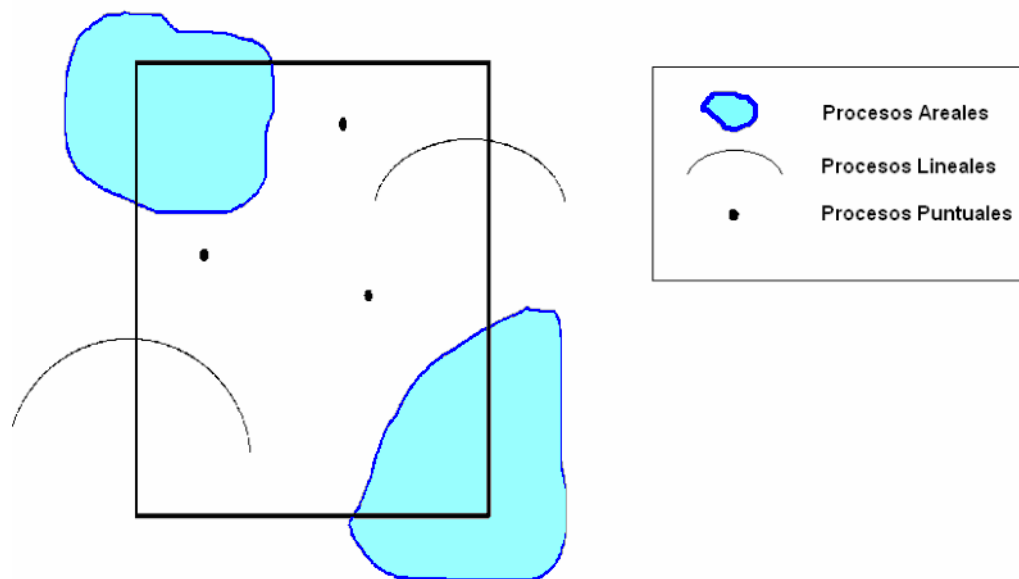


Figura 11. Esquema de la afectación de los procesos a una celda de trabajo.

Para el cálculo de la probabilidad ponderada de celdas con tres o más procesos, se utiliza la Ecuación (1). En la Tabla 6 se muestran los valores del índice de probabilidad usados.

$$P = \frac{\sum (C_i * PI_i)}{\sum C_i} \quad (1)$$

Donde:

- P: Probabilidad ponderada
- PI_i : Probabilidad de ocurrencia del movimiento en masa para celdas con i procesos.
- i : Numero de procesos en la celda, $i \geq 3$.
- C_i : Cantidad de celdas con i procesos.

Tabla 6. Categorías de los procesos utilizados para la zonificación.

Descripción	Categoría	Índice de Probabilidad
Celda sin procesos	1	0
Celda con un proceso	2	0,025
Celda con dos procesos	3	0,050
Celda con tres o mas procesos	4	0,145 (V.A.) 0.116 (MED)

En la Figura 12 se muestra el histograma de frecuencias de las categorías para el índice de probabilidad de las celdas de trabajo. Se nota un predominio de la categoría 1, es decir, aquella que corresponde a celdas sin procesos o con probabilidad nula. De las 115.545 celdas del Valle de Aburra, sólo 7.130 presentan reporte de haber sufrido movimientos en masa, es decir, apenas el 6% del territorio presenta algún valor de probabilidad de ocurrencia asociado.

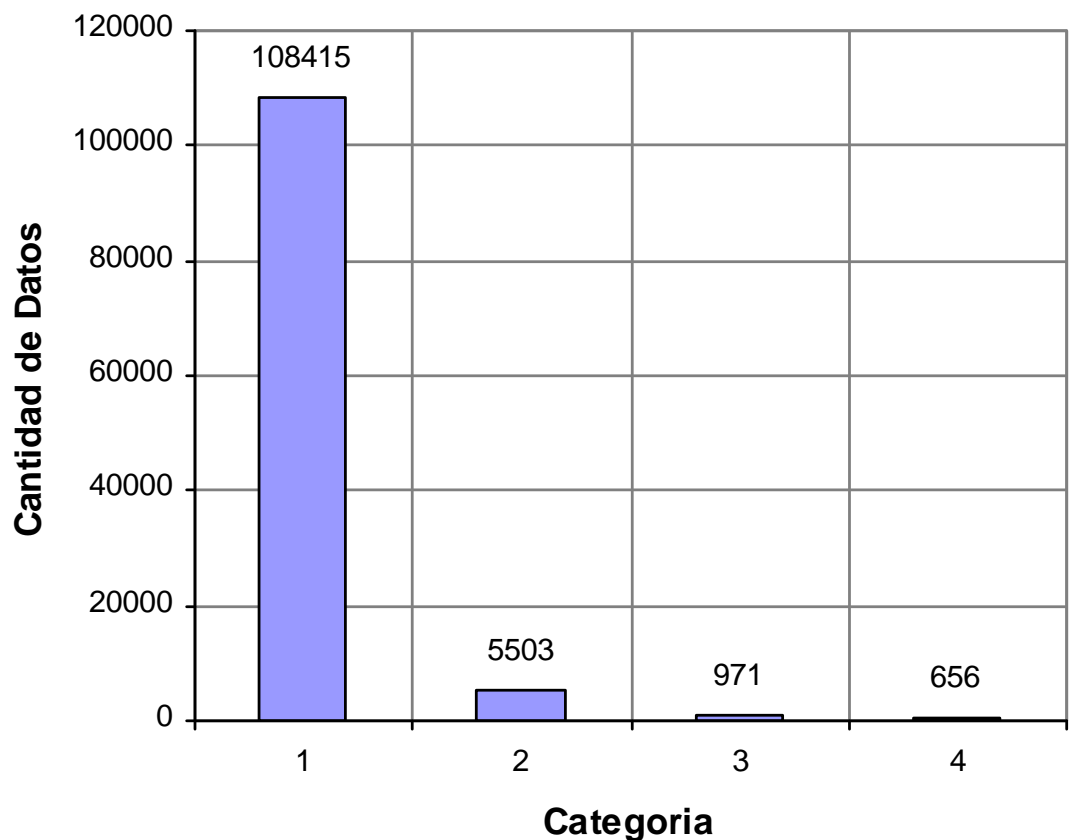


Figura 12. Histograma de frecuencias para las categorías del atributo procesos, analizado desde el punto de vista probabilístico en todo el Valle de Aburrá. Categorías en Tabla 6.

La información binaria de los procesos se usa finalmente para construir un vector que, en el conjunto de entrenamiento del modelo, indique si en la celda ha sufrido o no movimientos en masa en el pasado. Por otra parte, la información suministrada por el índice de probabilidad sirve como vector de comparación o vector de salida en el proceso de entrenamiento del modelo neuronal.

5.2 GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DEL ATRIBUTO LLUVIA

Dado que en el presente estudio se pretende evaluar la amenaza incorporando la lluvia como factor detonante; se considera que la cantidad de agua presente en el suelo está relacionada con las precipitaciones inmediatas (antecedentes) y acumuladas (precedentes) a la fecha de ocurrencia de un deslizamiento (Montoya et al. 2002).

Las lluvias antecedentes relacionadas a un evento de un movimiento en masa, se caracterizan por tener una mayor frecuencia aunque una menor intensidad lo que genera una mayor disposición del suelo a la infiltración de agua (Montoya et al. 2002), generando la formación de humedad en el suelo, que se acumula a medida que aumenta la frecuencia de la lluvia; lo anterior tiene como efecto la elevación de las presiones de poros en el suelo y la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante, generando inestabilidad (Álvarez y Alarcón 2004).

Montoya et al (2002) plantean una relación de ocurrencia de movimientos en masa con la lluvia antecedente (inmediata de 3 días) y acumulada (15 días), para el departamento de Antioquia (Colombia), de acuerdo a lo mostrado en la Figura 13. En esta figura, los autores indican dos umbrales que definen zonas con mayor y menor probabilidad de detonación de movimientos en masa. Los umbrales en cuestión son 75 mm para la lluvia antecedente (3 días) y de 150 mm para la lluvia precedente (15 días).

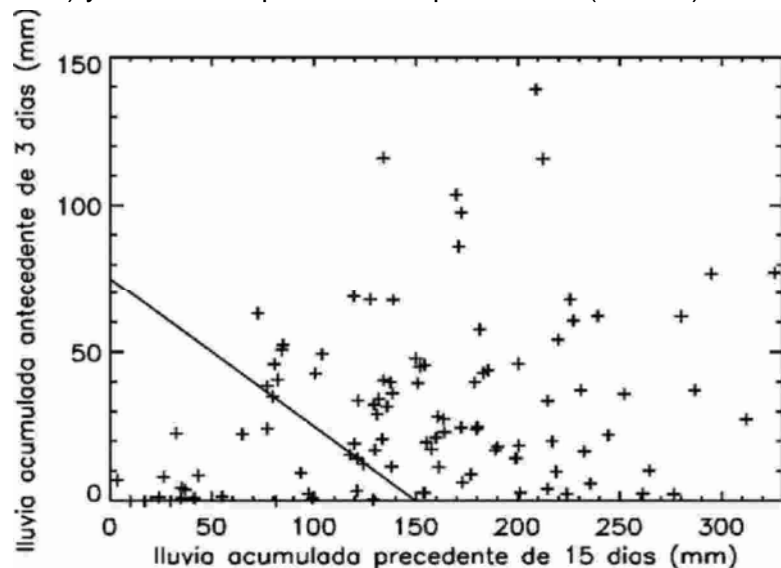


Figura 13. Relación de las lluvias con los movimientos en masa (Montoya et al., 2002).

Teniendo en cuenta lo anterior, la información de precipitación debe ser procesada de tal manera que permita determinar cual es la probabilidad de excedencia de los umbrales indicados para cualquier celda de trabajo. Los párrafos siguientes describen el proceso adelantado para conseguir este propósito y generar la base de datos de lluvia, adecuada para el entrenamiento del modelo neuronal.

5.2.1 Series de precipitación precedente y antecedente.

Inicialmente se genera una nueva serie de precipitación mediante la suma de la precipitación de tres días consecutivos, comenzando por el día 1 de la serie original. La Figura 14 ilustra este procedimiento. El primer valor de la serie nueva corresponde a la precipitación acumulada de los tres días antecedentes, de igual forma se calcula el segundo valor de la serie y así sucesivamente hasta el último registro de la serie original. Cuando aparecen días sin información, situación común en las series originales, se descarta la sumatoria correspondiente. De manera similar se construyó la serie de precipitación precedente o de 15 días.

DIA	1	2	3	4	5	....	N-2	N-1	N
PRECIPITACIÓN	Σ 25	Σ 15	Σ 34	12	10	....	Σ 55	4	12
ANTECEDENTE (3 DIAS)			74	61	56	....			71

Figura 14. Esquema de cálculo de la lluvia antecedente y precedente para las series de precipitación.

5.2.2 Análisis Estadísticos

Una vez obtenidas las series de lluvia acumulada de 3 y 15 días utilizando todo el registro histórico para cada una de las estaciones, se procedió a realizar el análisis estadístico de las mismas, ésto con el propósito de obtener la probabilidad de excedencia de los umbrales de precipitación críticos.

Como primer paso se organizó un resumen estadístico para las series de lluvia anteriormente citadas, que contiene entre otros estadísticos la media, la moda, máximos etc. (Ver DVD Anexo en la carpeta *Resumen estadístico R.*). Se realizó la construcción de los histogramas de frecuencia de las series de 3 días y de 15 días para cada una de las estaciones (Ver DVD Anexo en la carpeta *Histogramas de frecuencia*) La Figura 15 muestra un histograma típico para la serie de 3 días de la estación Rionegro La Macarena (2308027000000). La Figura 16 presenta el histograma correspondiente para 15 días en la estación 2308027000000.

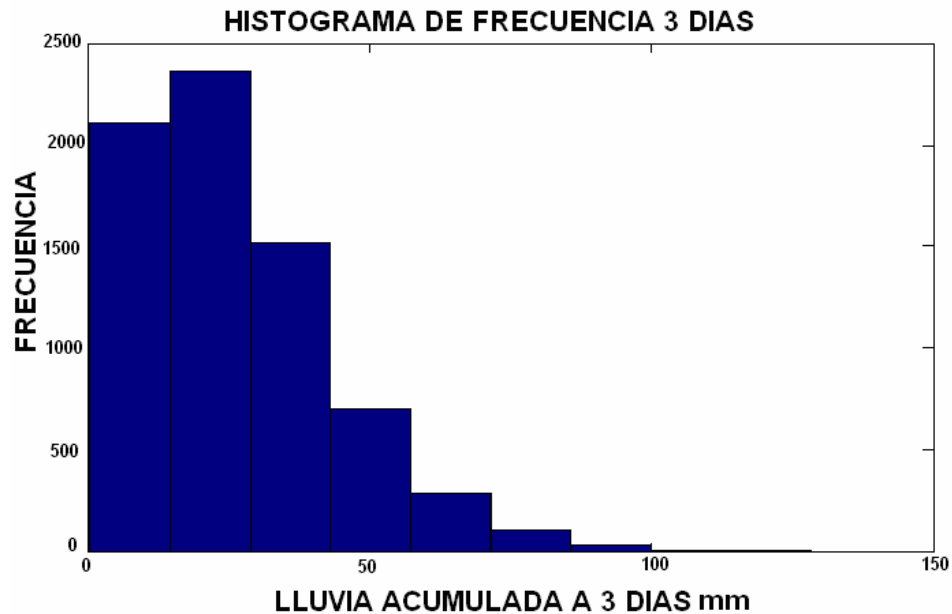


Figura 15. Histograma de frecuencia de la serie de precipitación acumulada de 3 días para la estación Rionegro La Macarena (2308027000000).

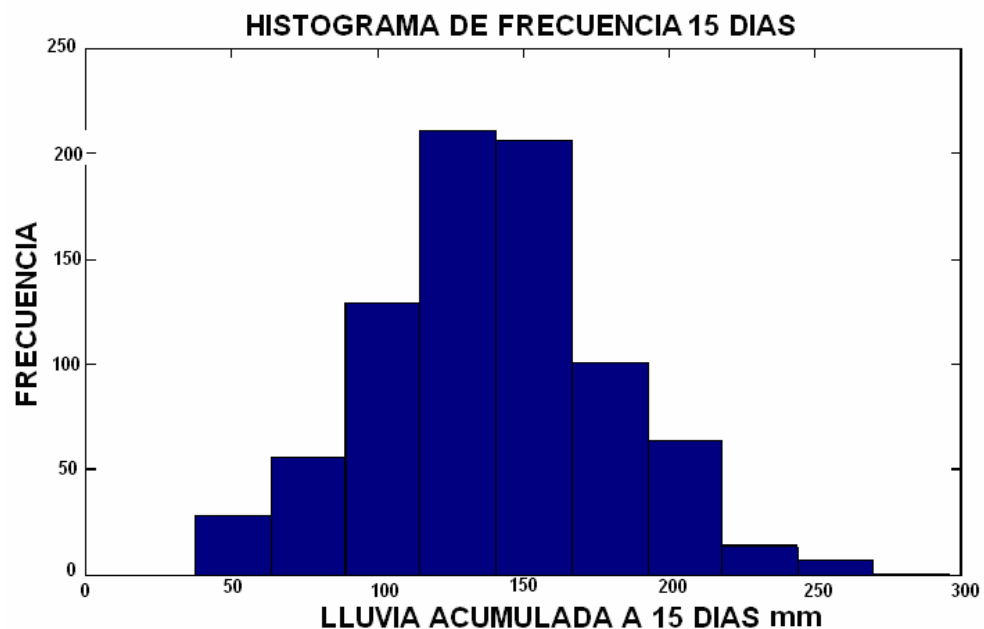


Figura 16. Histograma de frecuencia de la serie de precipitación acumulada de 15 días para la estación Rionegro La Macarena (2308027000000).

En general se observa que para las series de lluvia acumulada de 3 días hay un comportamiento sesgado hacia la izquierda con una moda promedio de 26 mm, es decir,

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

bastante alejada del umbral crítico de 75 mm. En contraste, las series de lluvia acumulada de 15 días presentan un comportamiento normal o gaussiano con una moda promedio de 154 mm, es decir, prácticamente coincidente con el valor de umbral crítico. Por otra parte, también se encontraron estaciones con comportamientos bimodales, atribuibles a dos periodos de lluvias, ambos de larga duración pero uno menos intenso que el otro.

Los histogramas anteriormente hallados dan una idea general de la distribución de los datos, sin embargo, para obtener la probabilidad de excedencia de lluvias para 3 y 15 días es necesario obtener la curva de función de densidad de probabilidad de cada una de las series en todas las estaciones. El área por debajo de la curva de probabilidad a la derecha del valor del umbral corresponde a la probabilidad de excedencia buscada. En el DVD anexo bajo la carpeta *Funciones de probabilidad*, se presentan las curvas de las funciones de probabilidad de las estaciones analizadas; las memorias de cálculo para obtener las probabilidades de excedencia se presentan en la carpeta llamada *Determinación de probabilidad de excedencia*.

En la Tabla 7 se presentan los valores de probabilidad de excedencia y no –excedencia de los dos umbrales considerados (3 y 15 días) para todas las estaciones analizadas.

Tabla 7. Probabilidad de excedencia y no excedencia de los umbrales establecidos para la lluvia agregada de 3 y 15 días, para cada estación.

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACION	Probabilidad de no excedencia (0-1)		Probabilidad de excedencia (0-1)	
		3 días	15 días	3 días	15 días
		P[X<75mm]	P[X<150mm]	P[X>75mm]	P[X>150mm]
2308021000000	LA FE	0,95	0,45	0,05	0,55
2308022000000	LA SEVERA	0,96	0,5	0,04	0,5
2308023000000	LAS PALMAS	0,97	0,39	0,03	0,61
2308024000000	VASCONIA	0,93	0,23	0,07	0,77
2308026000000	LA MOSCA	0,96	0,43	0,04	0,57
2308027000000	RIONEGRO_LA_MACARE	0,97	0,6	0,03	0,4
2308034000000	RIOABAJO	0,95	0,48	0,05	0,52
2618009000000	EL BUEY	0,93	0,48	0,07	0,52
2701034000000	MAZO	0,96	0,43	0,04	0,57
2701035000000	CHORRILLOS	0,97	0,46	0,03	0,54
2701036000000	CALDAS	0,94	0,35	0,06	0,65
2701037000000	FABRICATO	0,96	0,54	0,04	0,46
2701038000000	SAN_ANTONIO_PRA	0,96	0,46	0,04	0,54
2701045000000	VILLAHERMOSA_PLANT	0,98	0,6	0,02	0,4
2701046000000	SAN_CRISTOBAL	0,97	0,53	0,03	0,47
2701047000000	MEDELLIN_MIGUEL_AG	0,98	0,87	0,02	0,13
2701051000000	EL BOTON	0,97	0,65	0,03	0,35
2701056000000	GIRARDOTA	0,96	0,48	0,04	0,52
2701057000000	BARBOSA	0,92	0,49	0,08	0,51
2701062000000	BOQUERON	0,92	0,6	0,08	0,4
2701065000000	DON_MATÍAS	0,91	0,36	0,09	0,64

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACION	Probabilidad de no excedencia (0-1)		Probabilidad de excedencia (0-1)	
		3 días	15 días	3 días	15 días
		P[X<75mm]	P[X<150mm]	P[X>75mm]	P[X>150mm]
2701066000000	GABINO	0,85	0,2	0,15	0,8
2701076000000	NIQUIA	0,96	0,49	0,04	0,51
2701078000000	BOQUERON	0,87	0,39	0,13	0,61
2701080000000	MESETA_LA_SN_PEDRO	0,96	0,66	0,04	0,34
2701081000000	STA_HELENA	0,85	0,24	0,15	0,76
2701082000000	LA CUCHILLA	0,92	0,1	0,08	0,9
2701093000000	AYURA	0,97	0,52	0,03	0,48
2701106000000	PLANTA_MANANTIALES	0,96	0,73	0,04	0,27
2701111000000	ASTILLEROS	0,93	0,29	0,07	0,71
2701112000000	LA IGUANA	0,93	0,55	0,07	0,45
2701114000000	CUCARACHO	0,96	0,63	0,04	0,37
2701115000000	ASTILLERO	0,94	0,39	0,06	0,61
2701122000000	EL CONVENTO	0,98	0,78	0,02	0,22
2701507000000	APTO_OLAYA_HERRERA	0,97	0,74	0,03	0,26
2701509000000	TULIO_OSPINA	0,95	0,57	0,05	0,43
2701512000000	PIEDRAS_BLANCAS	0,96	0,44	0,04	0,56
2701515000000	PROGRESO_HDA_EL	0,95	0,24	0,05	0,76
2701526000000	LA SALADA	0,94	0,27	0,06	0,73

En promedio para todas las estaciones, la probabilidad de excedencia del umbral de 75 mm es de apenas el 5%, mientras que la probabilidad de excedencia del umbral de 150 mm es del 52%, siendo esta estimación consistente con lo observado en las modas de los histogramas, tal como se anotó anteriormente. Una vez calculadas las probabilidades mencionadas, se procede a un análisis geoestadístico de esta información para poder extrapolarla a cada una de las celdas de trabajo en todo el territorio estudiado.

5.2.3 Análisis Geoestadísticos

En el campo de las geociencias es común encontrar variables distribuidas espacialmente. Para el estudio de estas variables se utilizan diversos procedimientos geoestadísticos de estimación y/o simulación. Esto es, a partir de un conjunto de muestras tomadas en localizaciones del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar y consideradas representativas de su realidad, que por lo general es siempre desconocida; estos procedimientos permiten la descripción o caracterización de las variables con dos fines diferentes, primero, proporcionar valores estimados en localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales (Cuador,2001). A continuación se presenta una breve descripción teórica del procedimiento geoestadístico empleado para el análisis de la información pluviométrica del proyecto, tendiente a generar información útil para el proceso de entrenamiento del modelo neuronal.

5.2.4 Origen, definición y objeto de estudio

En los años 60, Matheron acuñó el término de *Geoestadística*. Reconocido como el padre de esta disciplina, formalizó y generalizó matemáticamente un conjunto de técnicas desarrolladas por D. G. Krige (1941) que explotaban la *correlación espacial* para hacer predicciones en la evaluación de reservas de las minas de oro en Sudáfrica. Él definió a la Geoestadística como "la aplicación del formalismo de las *funciones aleatorias* al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales" (Viera, 2002).

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo, tales como: ley de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante, etc. (Viera, 2002).

5.2.5 Etapas del análisis geoestadístico

Actualmente, la geoestadística es un conjunto de técnicas usadas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo. En contraposición con la estadística clásica o convencional, tales valores no se consideran independientes ; por el contrario se suponen de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir que existe una dependencia espacial. Intuitivamente esto indica que mientras más cercanos estén situados dos puntos están más correlacionados y mientras más separados hay menos relación entre estos (Viera, 2002).

El proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial es conocido como "análisis estructural". Una vez realizado el análisis estructural, la predicción de valores en puntos no muestrales se puede hacer aplicando la técnica de interpolación "kriging" o simulándolos a través de "simulaciones condicionales". En resumen, un análisis geoestadístico está compuesto por tres etapas (Viera, 2002):

- El análisis exploratorio de los datos.
- El análisis estructural (estimación y validación del semi-variograma).
- Las predicciones (kriging o simulaciones).

La primera etapa consiste sustancialmente en el estudio de la variabilidad estadística de los datos, la segunda consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada, es decir, en dependencia de las características de estacionalidad del fenómeno se modelará la función de semi-varianzas (Cuador, J., 2003) y la última en la generación del modelo continuo, producto de la interpolación e inferencia del valor de una variable en un punto en el espacio en el que no hay dato.

Como se mencionó anteriormente, es necesario validar el semi-variograma ya que esta función es determinante para obtener una buena interpolación de los datos, por lo cual a continuación se presenta una introducción del método de validación *leave one out*.

♦ **Método leave one out**

Un método para la validación del variograma que resulta atractivo por su sencillez y eficiencia es el *leave one out* que consiste en sacar un elemento de la muestra y estimar el valor en ese punto usando Kriging con el modelo del variograma obtenido. De forma análoga se actúa para el resto de los elementos de la muestra. Como resultado se obtiene un mapa de las diferencias $Z(x_i) - Z^*(x_i)$, $i=1,2,\dots,n$ entre el valor real y el estimado. De tal manera que si el modelo del variograma refleja adecuadamente la estructura espacial implícita en el conjunto de los datos, entonces los valores estimados deben ser cercanos a los observados (Viera, 2002).

Esta cercanía puede ser caracterizada usando como herramienta los siguientes estadígrafos:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z^*(x_i)\} \quad \text{Debe estar cercano a 0} \quad (2)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z^*(x_i)\}^2 \quad \text{Debe ser pequeño} \quad (3)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma_i} \right\}^2 \quad \text{Debe ser cercano a 1} \quad (4)$$

La correlación muestral de $Z(x_i)$ y $Z^*(x_i)$ debe ser cerca na a 1

$$\text{La correlación muestral de } Z(x_i) \text{ y } \left\{ \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma_i} \right\}^2 \text{ debe ser cercana a 0}$$

En donde:

$Z(x_i)$: son los valores muestrales de la propiedad en el punto x_i .

$Z^*(x_i)$: son los valores estimados de la propiedad en el punto x_i .

σ_i : es la desviación estándar de la estimación en el punto x_i .

Idealmente, todos los estadígrafos anteriores deben satisfacerse simultáneamente.

Para el presente caso de estudio, se plantea seguir este mismo derrotero o proceso con el fin de obtener los mapas de probabilidad de excedencia de los umbrales de precipitación para la lluvia agregada de 3 y 15 días, cabe citar que este mismo procedimiento ya lo había utilizado Alarcón (2007) para integrar diversa información geotécnica del Valle de Aburrá a un SIG.

◆ **Análisis Exploratorios de los Datos**

Con el fin de realizar un análisis sobre la variabilidad de los datos de lluvia, se aplican varios procedimientos estadísticos para los datos de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia para tres y quince días respectivamente.

Para empezar se observa como es la distribución espacial de los datos de lluvia en el sector de estudio, lo cual se puede apreciar en el Mapa 11 (mostrado anteriormente); de lo anterior se puede decir que existe una buena distribución de datos en todo el área de estudio, lo cual es favorable a la hora de realizar la interpolación de los datos de probabilidades del umbral de lluvia.

La Figura 17, muestra las gráficas exploratorias asociadas a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para el caso de la lluvia agregada a 3 días; con estas gráficas se puede observar la variabilidad espacial de los datos.

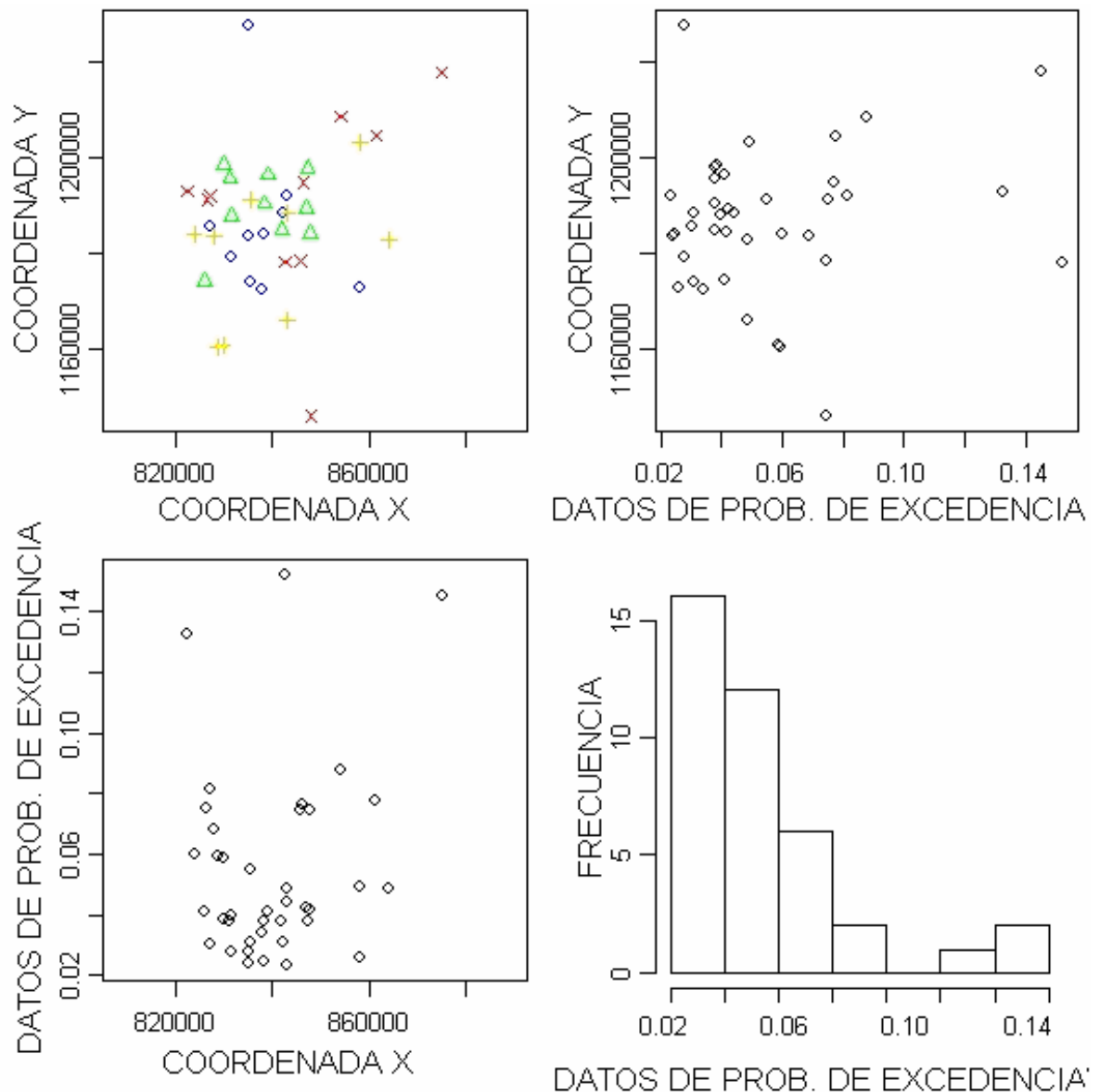


Figura 17. Gráficos exploratorios para los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada a 3 días.

En el gráfico del extremo superior izquierdo los ejes de las ordenadas y abscisas representan a las coordenadas Y, X respectivamente, y se muestra la distribución de los datos en el espacio y los clasifica según su valor de probabilidad asignándole a los datos que representen el cuarto cuartil de la muestra las equis rojas, para el tercero las cruces amarillas, los triángulos verdes para el segundo y los círculos azules para el primero; se observa una buena distribución espacial de datos.

Los gráficos superior derecho e inferior izquierdo muestran respectivamente la manera cómo se distribuyen, en sentido norte y este, los datos de lluvia de 3 días. Se observa que

no se evidencia algún tipo de tendencia lineal o de potencia del parámetro a medida que se avanza en sentido este y norte, que pueda afectar el modelo geoestadístico.

El gráfico inferior derecho muestra el histograma de frecuencias de los datos de probabilidad de excedencia; en él se observa que hay sesgo hacia la izquierda, es decir que se presentan con una mayor frecuencia valores de probabilidad bajos que están alrededor de 0.02-0.06.

La función de densidad de probabilidad asociada a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada de 3 días se presenta en la Figura 18; En esta figura se observa que el eje de las ordenadas y abscisas representan la densidad de datos y la probabilidad de excedencia del umbral respectivamente; se aprecia que hay tres puntos que están muy alejados de la mayoría de los otros datos, los cuales son considerados eventos de tipo “outliers”; los outliers son datos anómalos que por lo general se asocian a valores extremos (mínimos o máximos) comparados con la mayoría de los datos de la muestra, y se atribuyen a una inadecuada lectura del dato, a una mala calibración de los equipos o a eventos naturales extraordinarios; sin embargo por ser casos puntuales y para no afectar el comportamiento de la muestra, dichos puntos son omitidos y se obtiene de nuevo la función de densidad de probabilidad, tal como se muestra en la Figura 19.

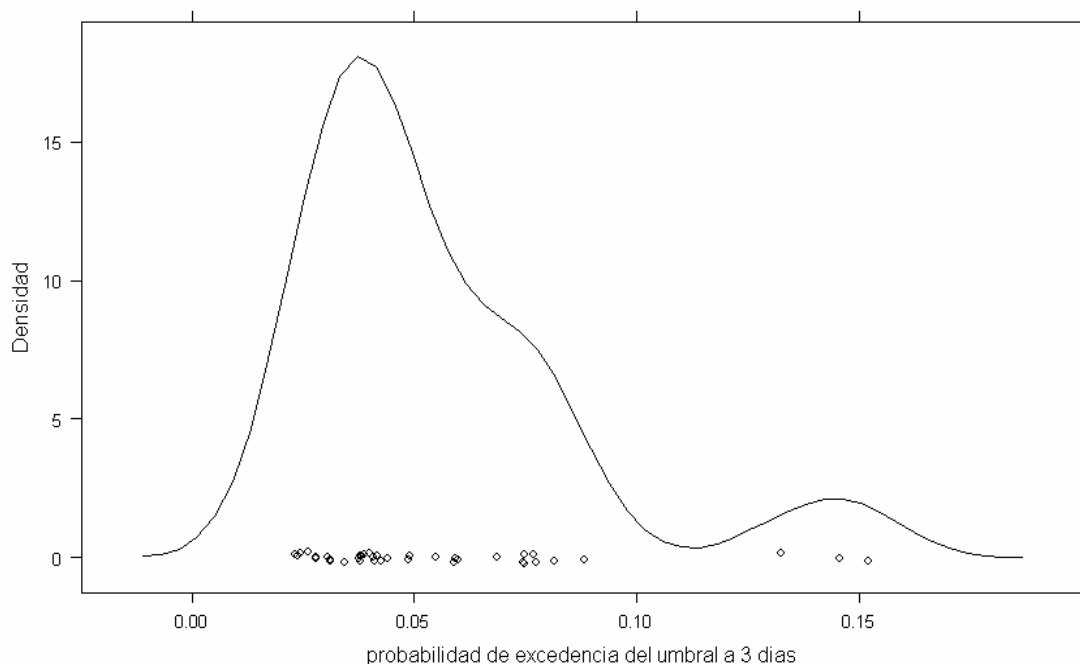


Figura 18. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 3 días.

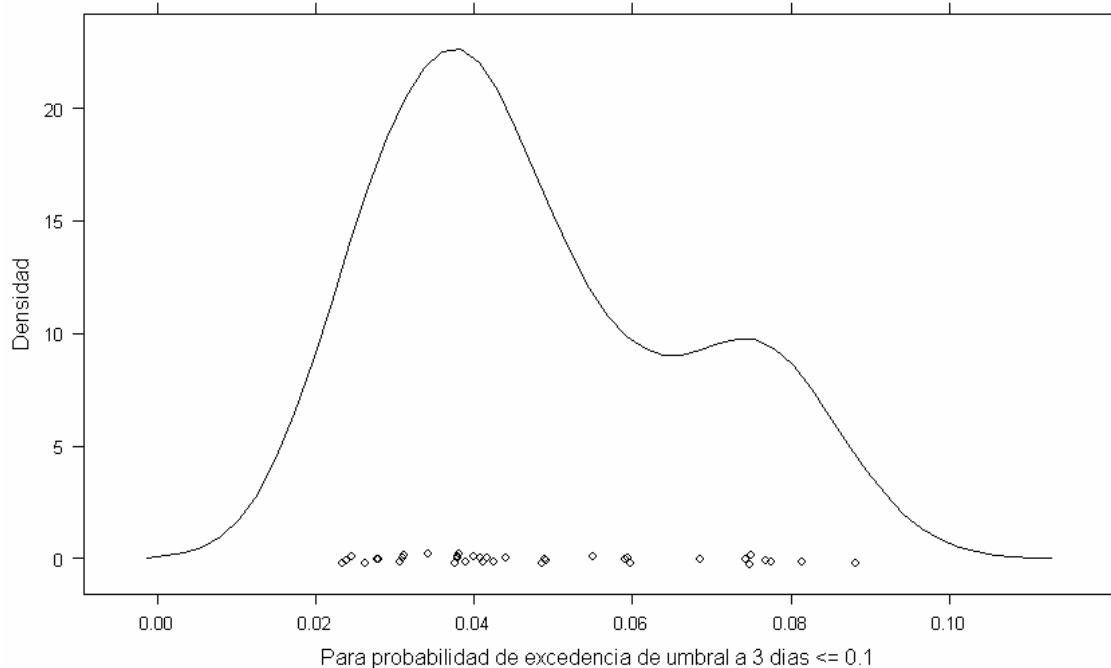


Figura 19. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 3 días, excluyendo los 3 datos extremos.

Análogamente, este mismo análisis se aplica para el caso de la lluvia agregada en 15 días.

La Figura 20, muestra las gráficas exploratorias asociadas a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para el caso de la lluvia agregada a 15 días, con estas gráficas se puede observar la variabilidad espacial de los datos.

Análogamente al caso de lluvia a 3 días, en la figura superior izquierda se muestra la distribución espacial para los datos de probabilidad de excedencia de umbral de la lluvia a 15 días y se clasifican los datos según representen el primer, segundo, tercer y cuarto cuartil de la muestra; en cuanto a la distribución espacial, ésta presenta las mismas características que la de la lluvia a 3 días, ya que son las mismas estaciones pluviométricas.

Se observa en las figuras superior derecha e inferior izquierda que no hay evidencia de ningún tipo de tendencia que pueda afectar el modelo geoestadístico, es decir se observa una buena distribución espacial de los datos.

En la Figura inferior derecha se muestra el histograma de los datos de probabilidad para la lluvia agregada a 15 días y se observa que la moda es del orden del 50%.

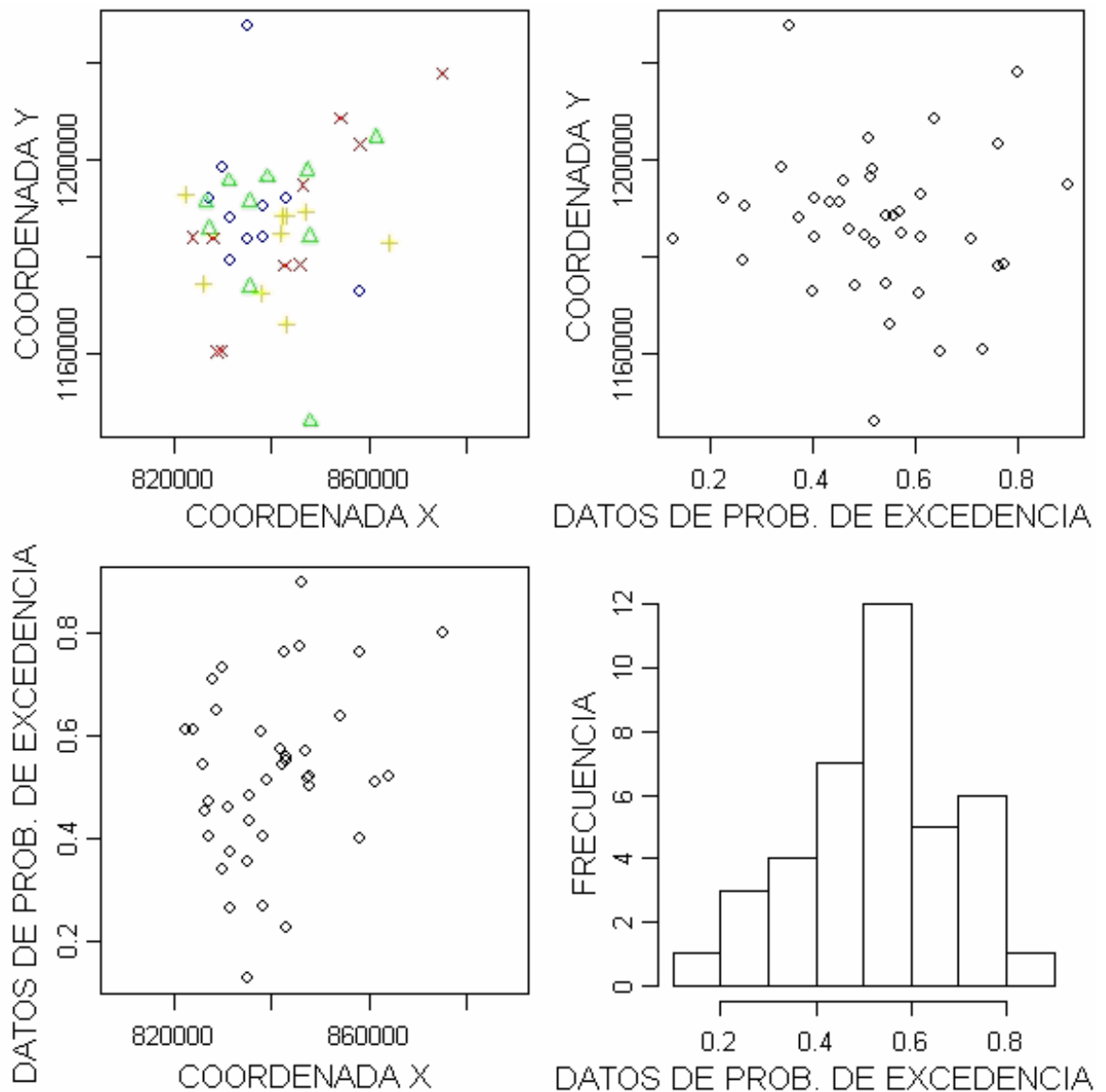


Figura 20. Gráficos exploratorios para los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada a 15 días.

La función de densidad de probabilidad asociada a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada a 15 días se presenta en la Figura 21, en la cual se observa una buena simetría de la función.

Función de Densidad de Probabilidad Para la probabilidad de excedencia del umbral a 15 días

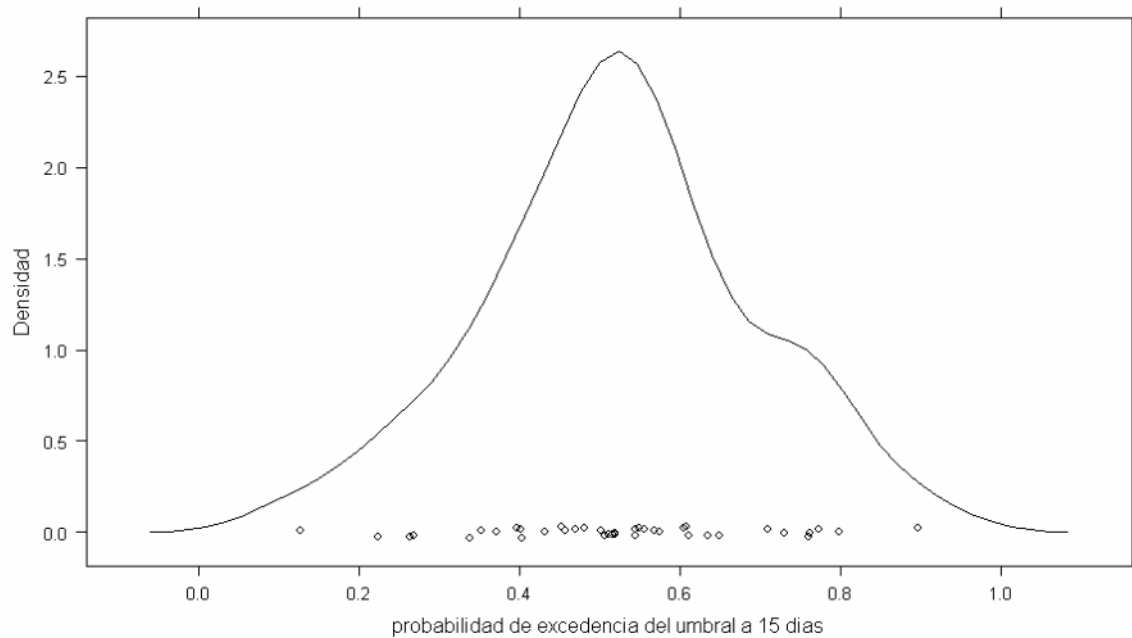


Figura 21. Función de densidad de los datos de probabilidad de excedencia del umbral a 15 días.

◆ **Análisis Estructural y Kriging**

Inicialmente se presenta el análisis estructural y proceso de interpolación para los datos de 3 días; posteriormente se presenta el análisis para 15 días.

Primero se calcula el semi-variograma que se considera que es la herramienta más importante en la determinación de la variabilidad y correlación espacial del fenómeno (Chica-Olmo, 1987). El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia h (Journel y Huijbregts, 1978), o lo que es lo mismo, la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia h .

La función $\gamma(h)$ se denomina semi-variograma, la cual puede ser obtenida por la expresión (5).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{5}$$

Donde: $Np(h)$ es el número de pares a la distancia h .
 h es el incremento.
 $Z(x_i)$ son los valores experimentales.
 x_i localizaciones donde son medidos los valores $z(x_i)$.

El semi-variograma se construye de la siguiente manera:

- Se elimina cualquier comportamiento tendencial.
- Se selecciona la h .
- Se crea el semi-variograma experimental, basado en una muestra seleccionada.
- Se selecciona un semi-variograma teórico que se ajuste al variograma experimental.

Se presenta en la Figura 22 el variograma experimental y el modelo teórico ajustado:

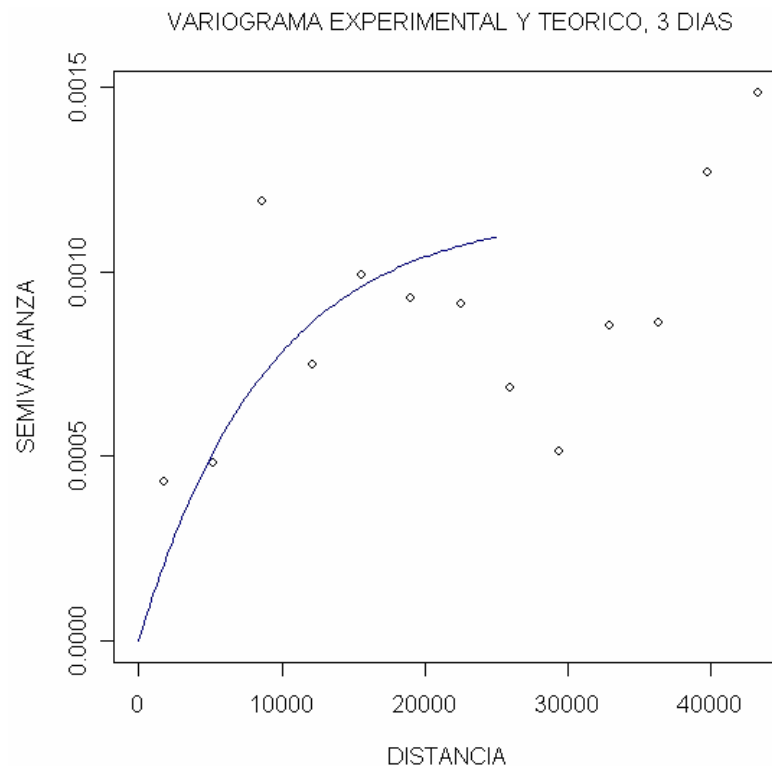
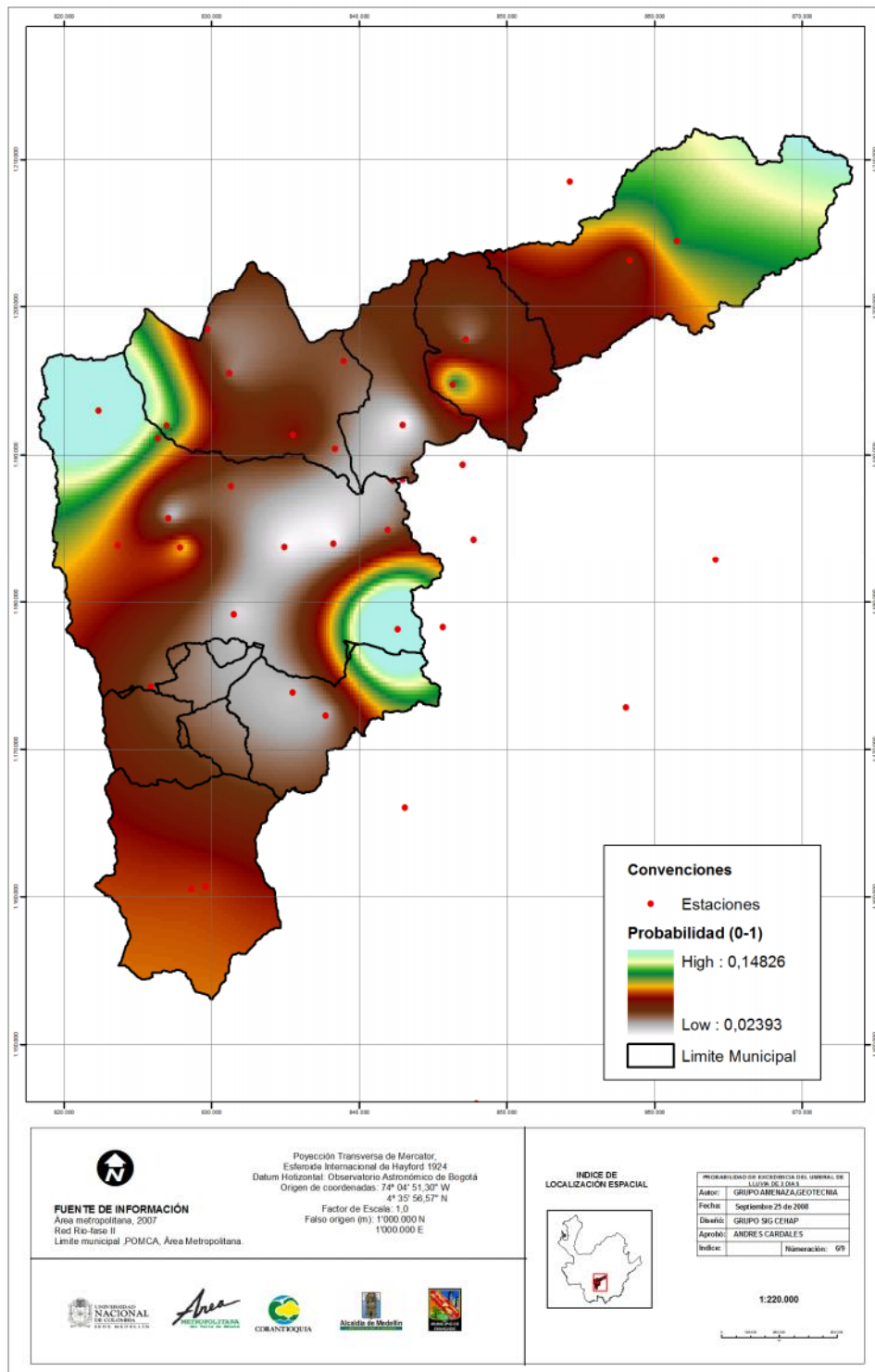


Figura 22. Semi-Variograma experimental y teórico ajustado a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada de 3 días.

En base al semi-variograma y a la aplicación de la interpolación por el método de kriging se obtiene el mapa continuo de probabilidad de excedencia para el umbral de 75mm para el caso de lluvia agregada a 3 días, el cual se presenta en el Mapa 13. En este mapa se representan los valores asociados a la probabilidad de excedencia del umbral de 3 días en cualquier punto de la región estudiada.

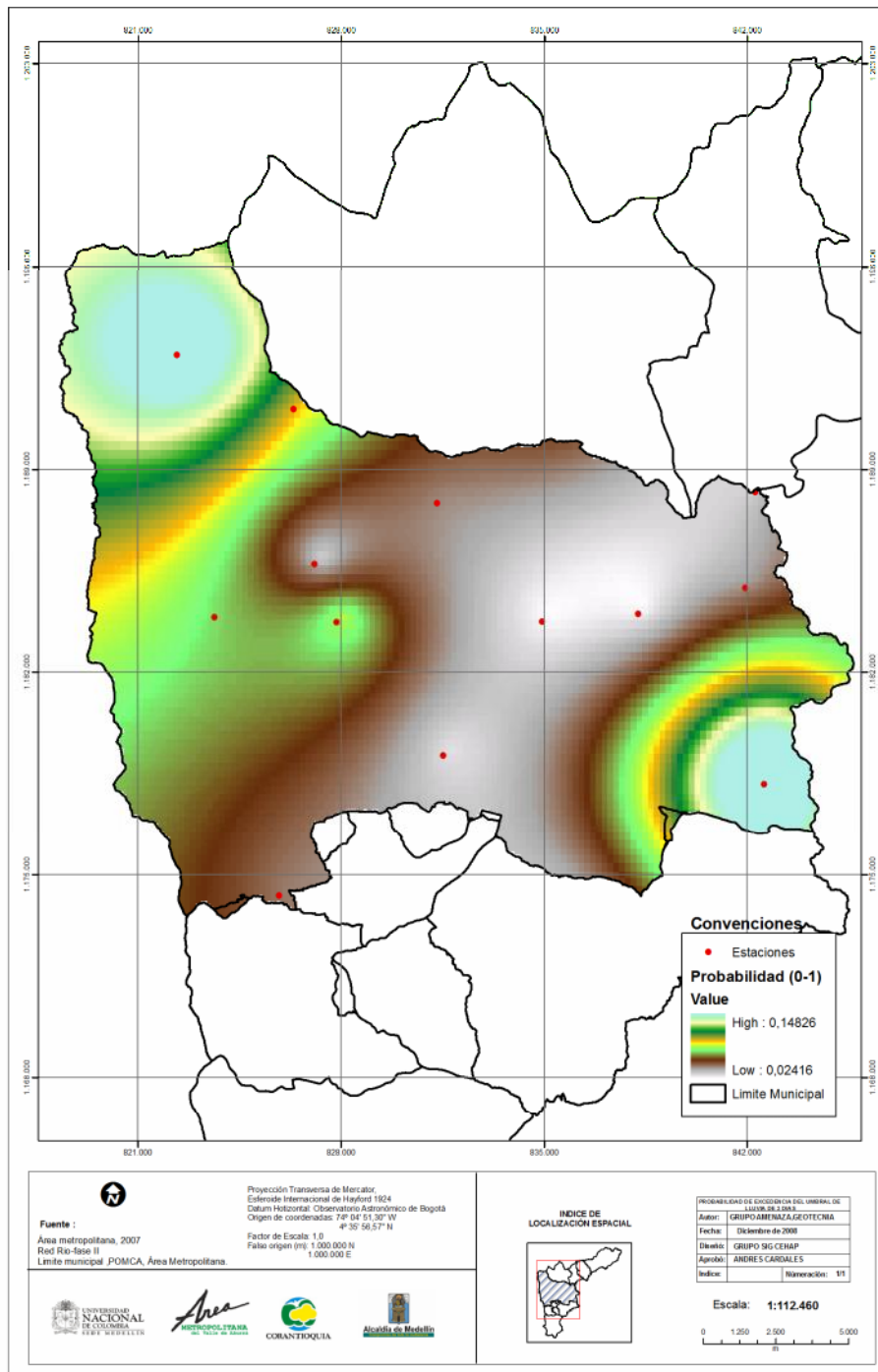
Se toma este mismo resultado para incluirlo en el caso del municipio de Medellín, ver Mapa 14.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 13 Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días para el Valle de Aburrá.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 14. Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, para el municipio de Medellín.

Obtenido el mapa, se verificó que se trabajó con un variograma adecuado, para dar validación a éste, se utilizará el método de validación *leave one out*.

En el Figura 23, se asocian las equis rojas a la circunstancia en la que el valor predicho se encuentra por encima del dato experimental y las cruces azules las asocia al caso contrario. El tamaño de la cruz o de la equis denota que tan grande es la diferencia entre el valor predicho y el experimental; se observa que son muy pocos los datos que presentan grandes diferencias entre lo predicho y lo experimental.

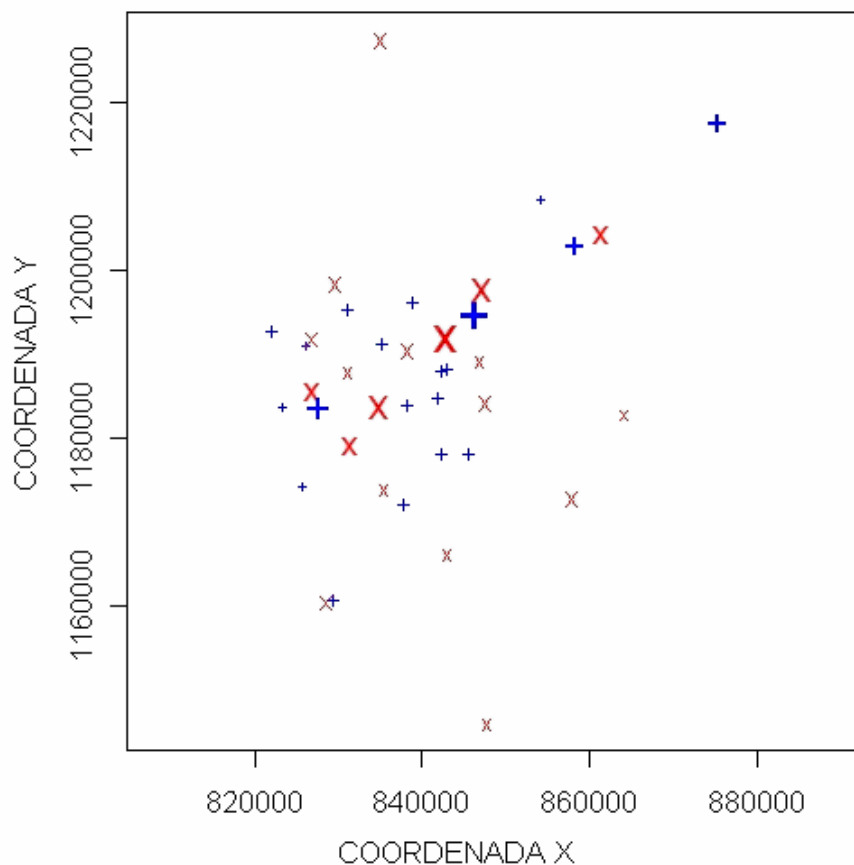


Figura 23. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, comparación de datos observados vs. datos predichos.

En el Figura 24 se observa el Histograma de densidad de los residuales, se observa además que el comportamiento de la función de densidad para los residuales tiende a ser normal.

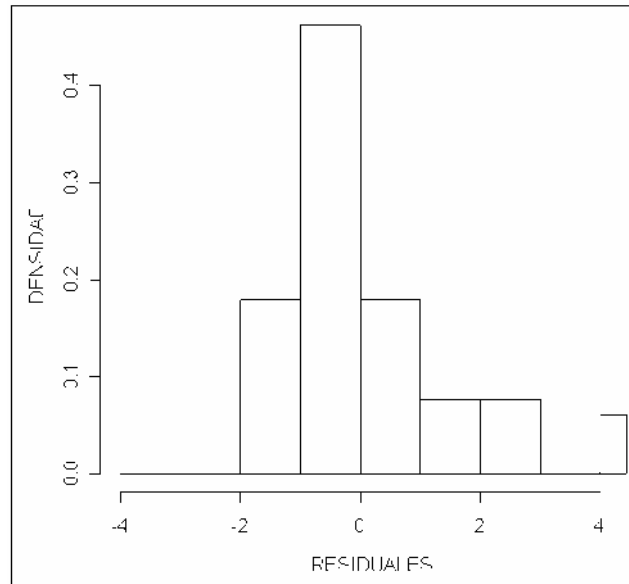


Figura 24. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, distribución de residuales.

En la Figura 25 se observa que los puntos en general tienden a estar cercanos a la línea de 45 grados, sin embargo se observó un tramo en donde los datos de probabilidad teórica son menores que los observados.

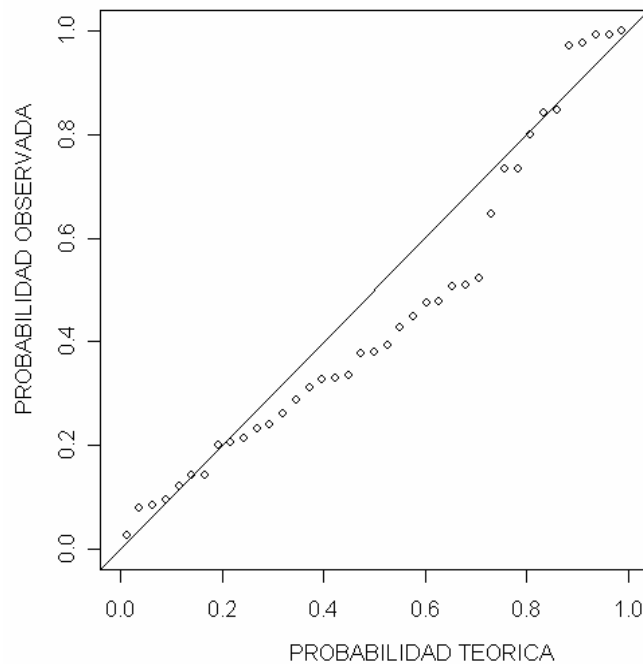


Figura 25. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, Probabilidad observada Vs. Probabilidad teórica.

Análogamente, para la lluvia acumulada de 15 días se obtiene el semi -variograma experimental y el modelo teórico ajustado en la Figura 26.

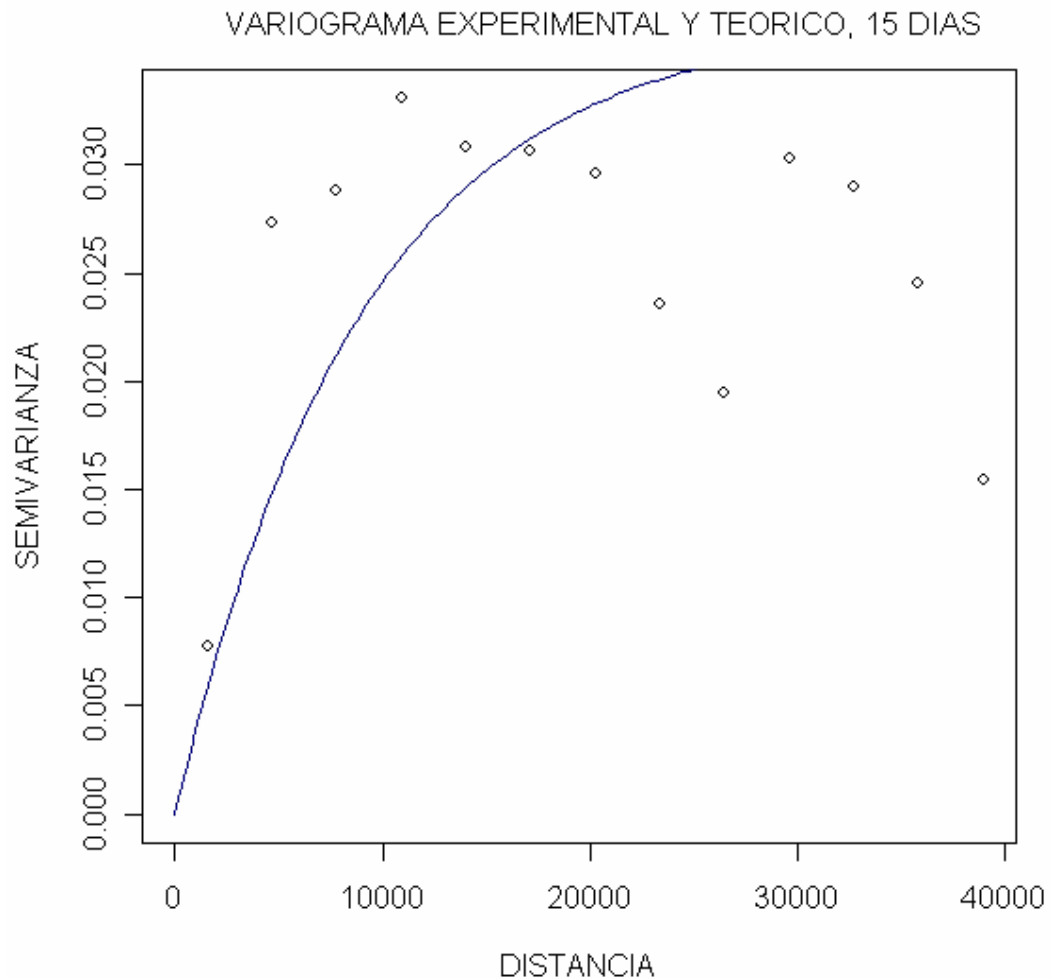
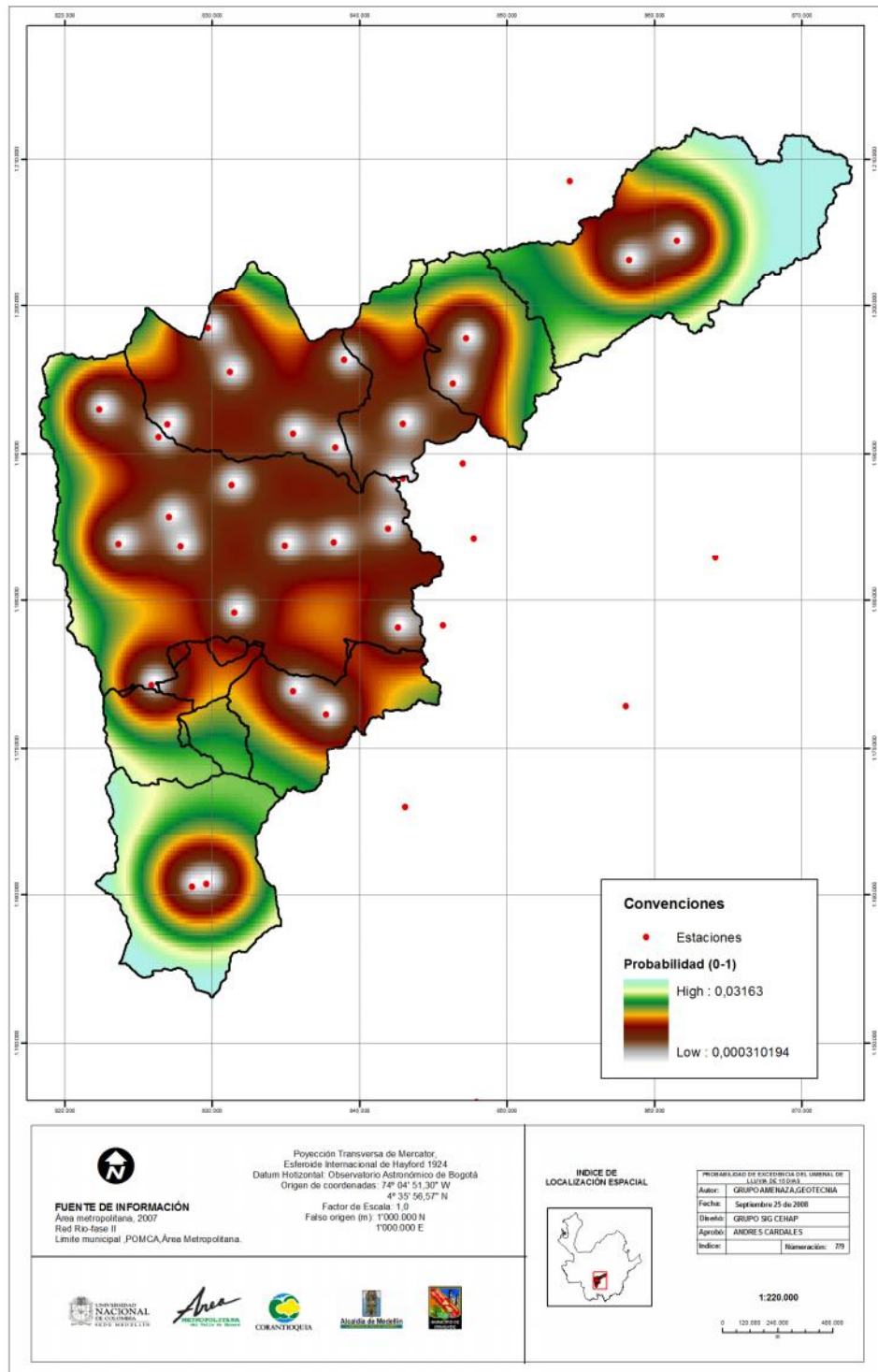


Figura 26. Variograma experimental y teórico ajustado a los datos de probabilidad de excedencia del umbral para la lluvia agregada de 15 días.

En base al semi-variograma y a la aplicación de la interpolación por el método de kriging se obtiene el mapa continuo de probabilidad de excedencia para el umbral de 150 mm para el caso de lluvia agregada a 15 días, el cual se presenta en el Mapa 15. En este mapa se representan los valores asociados a la probabilidad de excedencia del umbral de 15 días en cualquier punto de la región estudiada.

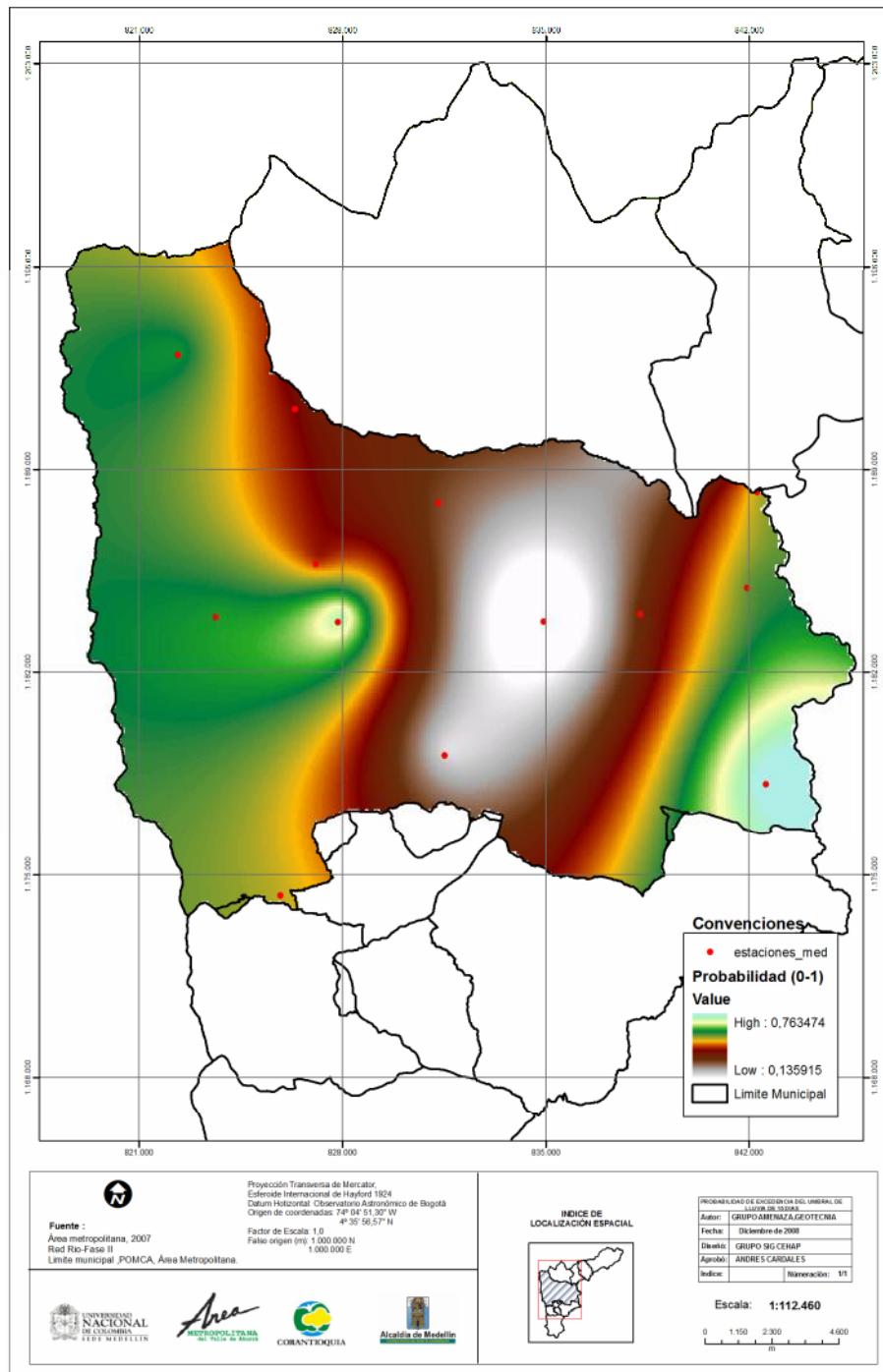
Para el municipio de Medellín se toman estos mismos resultados. Ver Mapa 16.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 15 Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, para el Valle de Aburrá.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 16. Modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, para el municipio de Medellín.

A continuación se presenta el error arrojado en el proceso de interpolación usando el método de validación *leave one out*:

En la Figura 27 se asocian las equis rojas a la circunstancia en la que el valor predicho se encuentra por encima del dato experimental y las cruces azules las asocia al caso contrario. El tamaño de la cruz o de la equis denota que tan grande es la diferencia entre el valor predicho y el experimental; se observa que son pocos los datos que presentan grandes diferencias entre el valor predicho y el experimental.

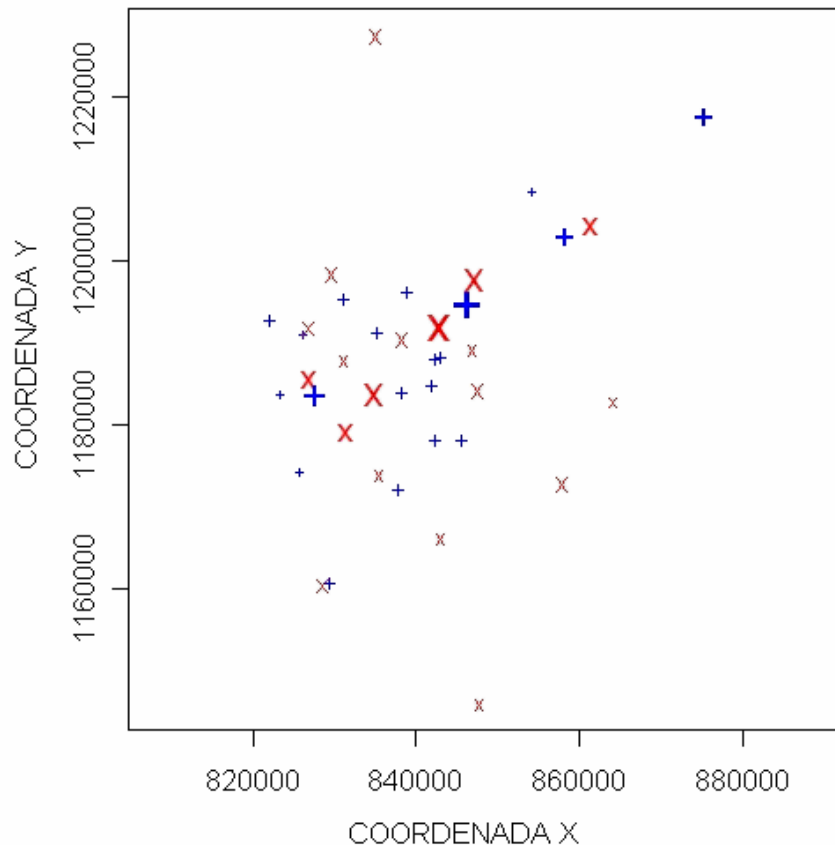


Figura 27. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, comparación de datos observados Vs. datos **predichos**.

Se observa de la Figura 28 que el comportamiento de los residuales tiende a una distribución normal.

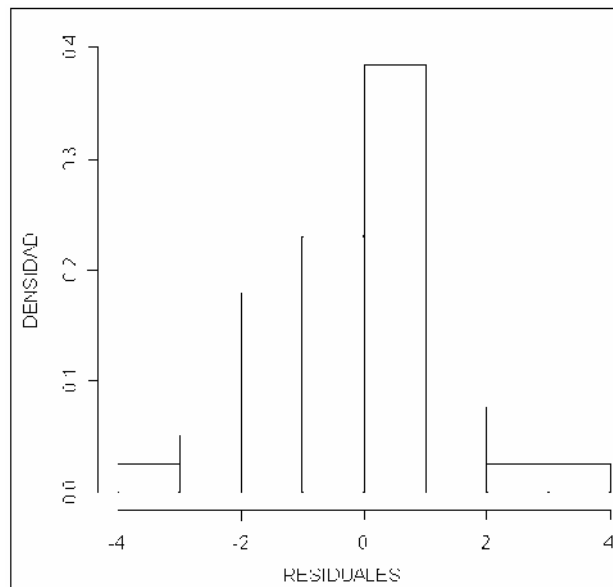


Figura 28. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días, distribución de residuales.

En la Figura 29 se observa que los puntos forman una clara tendencia de una línea de 45 grados, lo que quiere decir que la probabilidad observada es muy similar a la teórica, validándose el semivariograma.

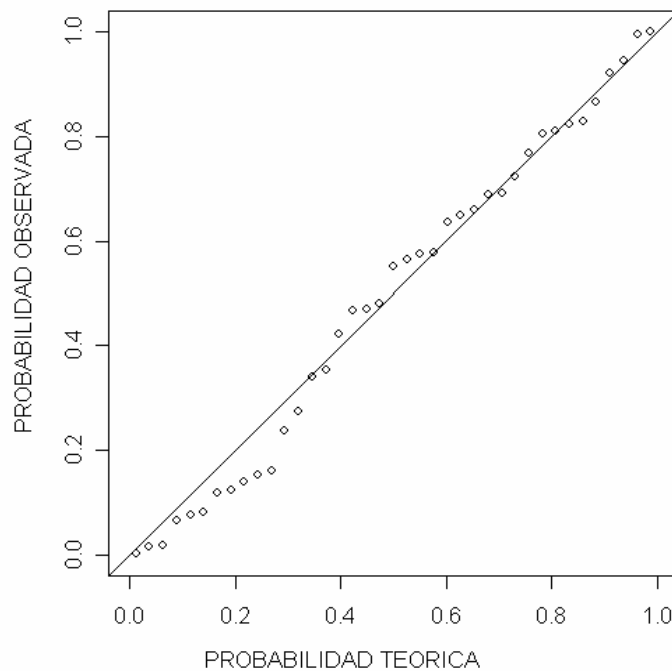


Figura 29. Error del modelo continuo de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días, Probabilidad observada Vs. Probabilidad teórica.

5.3 GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DEL ATRIBUTO PERMEABILIDAD

5.3.1 Generalidades

La permeabilidad del suelo es una variable de gran importancia para la descripción del drenaje de aguas sub-superficiales, ya que esta ayuda a describir en gran parte el movimiento del agua en el suelo (Pizarro Cabello, F. 1978), por lo cual, se considera un parámetro relevante en la estabilidad. Este factor será incluido en el modelo de evaluación de la amenaza para el municipio de Medellín

La permeabilidad, también conocida con el término de conductividad hidráulica (FRANCK, 2006) se puede medir y expresar en términos de la K de la ley de Darcy $V = K \cdot i$ propuesta para medios saturados, en donde:

- $K(LT^{-1})$: permeabilidad
- $V(LT^{-1})$: velocidad del flujo
- $i = \frac{dh}{dx}$: gradiente de potencial hidráulico (adimensional)

Para determinar permeabilidad del suelo existen numerosos métodos, entre ellos, los de uso más generalizado son los ejecutados en campo, por su posibilidad de utilización en diferentes tipos de suelo, su confiabilidad y operatividad, entre los cuales se encuentran el método Auger hole o método de Hooghoudt para suelos con un nivel freático cercano a la superficie y Auger hole inverso o método de Porchet para suelos con un nivel freático profundo. Dentro de los métodos de laboratorio el uso del permeámetro es el más generalizado, aunque se le atribuye una baja precisión dado que requiere una muestra grande ($n < 30$) para lograr un valor representativo del suelo. (SALGUIERO, 1986)

Dado que en el presente estudio se pretende encontrar la permeabilidad en el municipio de Medellín a nivel superficial se descarta el uso del método de Hooghoudt, y se opta por el uso del método Porchet ya que a este nivel no se espera encontrar nivel freático.

El procedimiento del ensayo Porchet en forma resumida consiste en realizar un barrenado hasta cierta profundidad, sin llegar a interceptar el nivel freático, luego se llena el barreno con agua hasta que el suelo esté saturado y se mide sucesivamente la velocidad de descenso del agua (KESSLER, 1971), el procedimiento anterior se ilustra en la Figura 8.

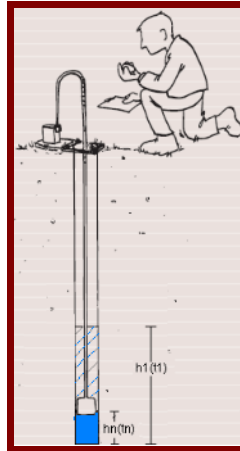


Figura 30. Ilustración del ensayo Porchet.

Con los datos de velocidad de descenso de agua (niveles y tiempos) se calcula la permeabilidad en dicho punto por medio de la Formula 1. Para una revisión mas detallada del método ver Anexo “Método porchet”

$$K = 1.15 * r * \frac{\log(h(t_1) + r / 2) - \log(h(t_n) + r / 2)}{t_n - t_1} \quad (1)$$

Donde:

r (cm): radio del barreno

t_1 (s): tiempo inicial

$h(t_1)$ (cm): nivel en el tiempo inicial

t_n (s): tiempo final

$h(t_n)$ (cm): nivel en el tiempo final

K (cm/s): permeabilidad

Algunos autores consideran que el método de Porchet no es tan preciso en comparación con el método de Hooghoudt debido a algunos supuestos con los que trabaja, sin embargo Van Hoorn (1979), ejecutó una comparación entre ambos métodos encontrando valores razonables para las correspondientes K, afirmando la validez del método de Porchet (FAO, 2007).

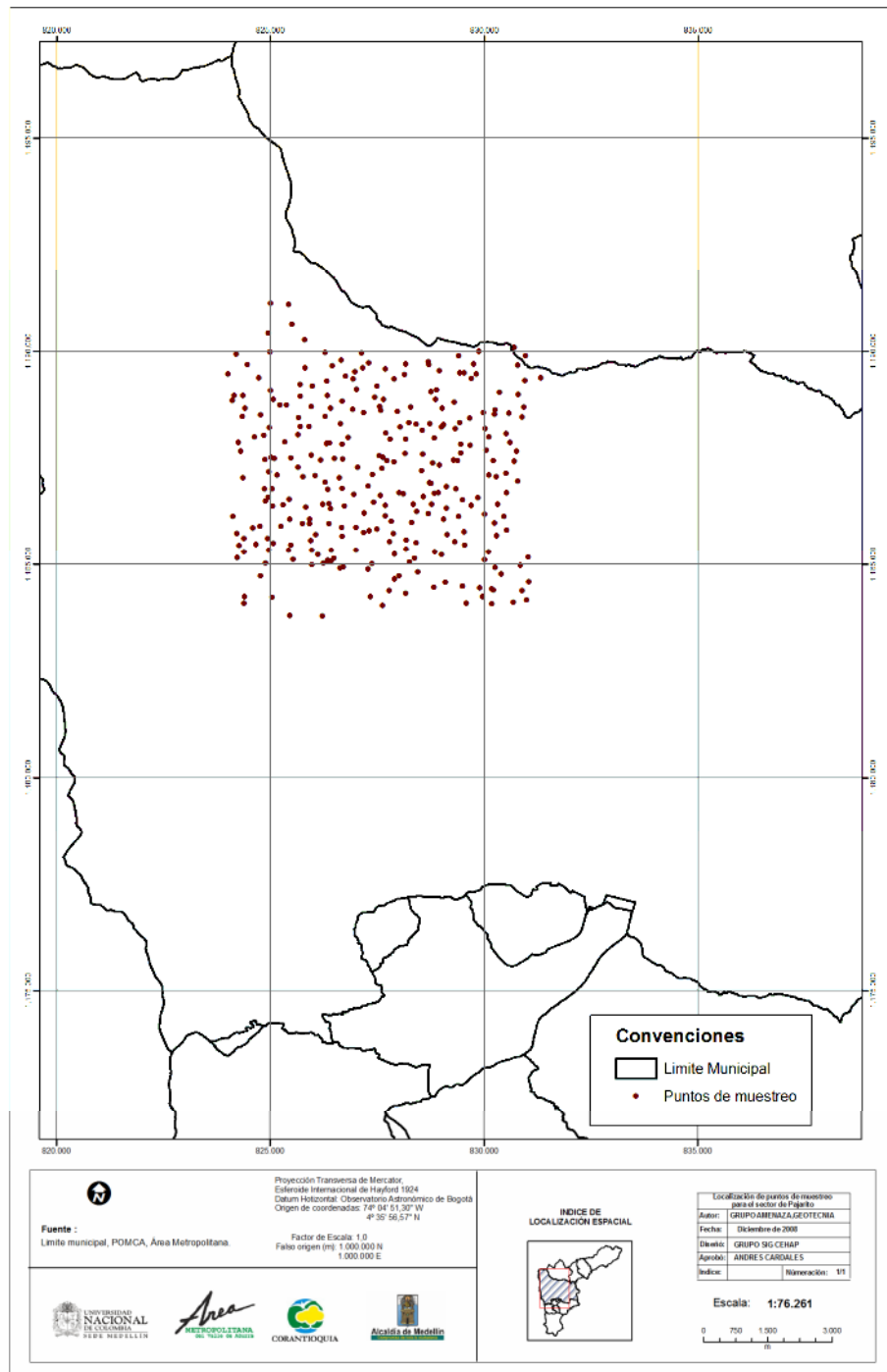
5.3.2 Campaña en campo

La metodología para estimar el mapa de permeabilidad en todo el municipio de Medellín, se describe a continuación:

- A.** Seleccionar una zona piloto, a partir de criterios de pendiente, variabilidad en la amenaza, accesibilidad etc., en la cual se concentre la exploración de campo; para nuestro caso se optó por el sector de Pajarito. En esta zona se ejecutan ensayos de clasificación (300) y de permeabilidad en campo tipo Porchet (300), con el fin de obtener por cada punto de muestreo un valor de permeabilidad y un valor de índice de plasticidad o diámetro efectivo ya sea para suelos finos o gruesos respectivamente. Ésto con el fin de encontrar una correlación entre la permeabilidad y parámetros índices de los suelos finos y gruesos, de forma tal que sirvan para estimar de manera indirecta la permeabilidad en el resto de Medellín. En el Mapa 17 se muestra la localización de los ensayos. En el Anexo: “Ensayos sector de Pajarito” del DVD adjunto se muestran los resultados de laboratorio y campo para suelos finos y gruesos. En base a los anexos se observa que hay predominancia de suelos finos y muy pocos suelos gruesos; por esta razón **sólo** fue posible encontrar una correlación entre la permeabilidad y los índices de consistencia. dicha correlación se estableció mediante el uso de las redes neuronales artificiales, lo cual se detallará en el numeral 5.3.3.

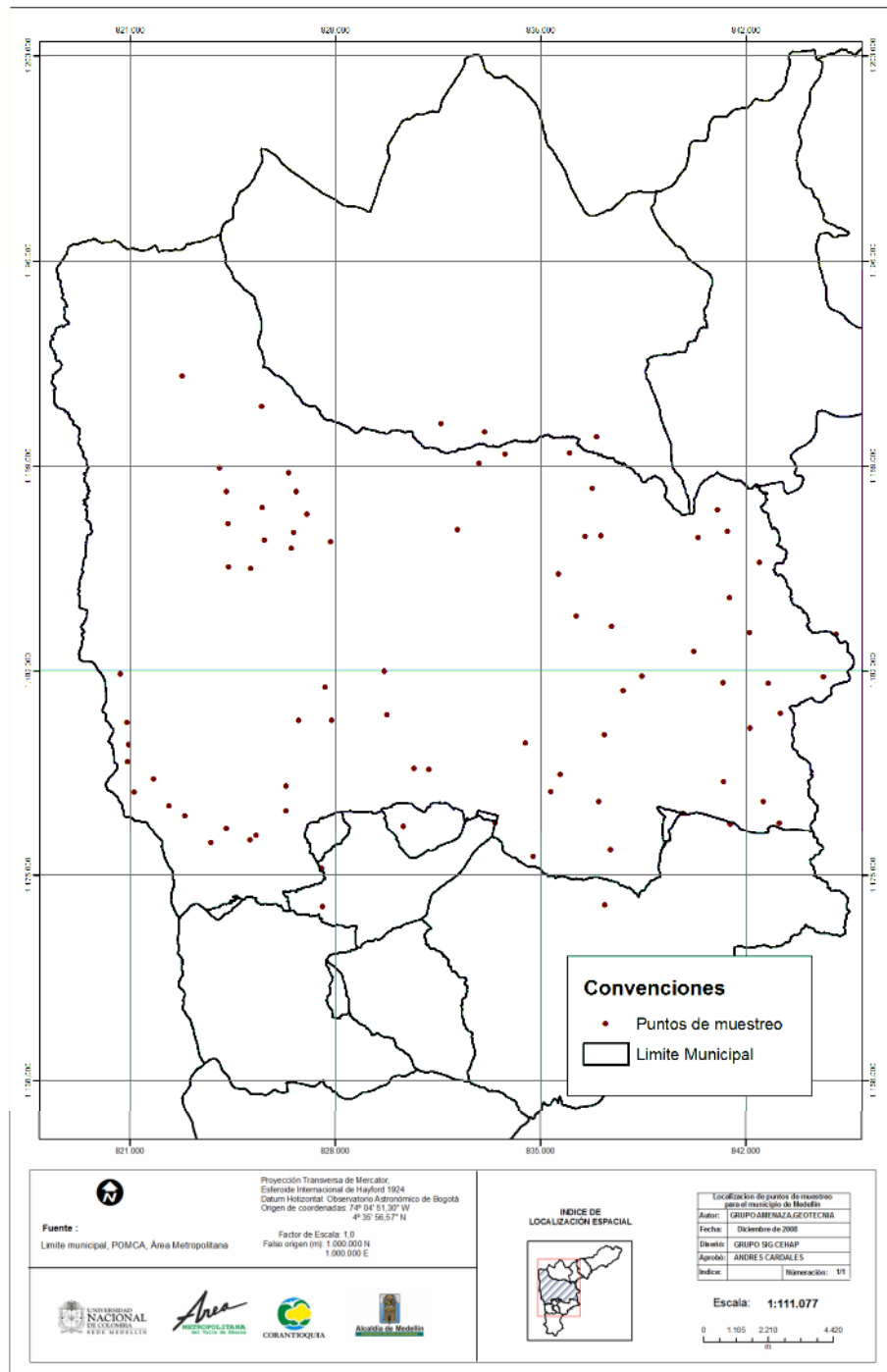
- B.** Para el resto de Medellín se ejecutan 100 ensayos de clasificación con los cuales se estimaron las permeabilidades en cada uno de estos puntos de muestreo, valiéndose de la correlación encontrada mediante redes neuronales en el sector piloto. En el Mapa 18 se muestra la localización de los ensayos para el resto del Municipio de Medellín. En el Anexo “Ensayos en el resto de Medellín” del DVD adjunto se observan dichos resultados de campo. Cabe aclarar que se incluyó información extra de ensayos de clasificación ejecutados en el Valle de Aburrá, dicha información se obtuvo de la base de datos de la firma geotecnista VIECO LTDA, obtenida de la tesis de maestría en Geotecnia de Alarcón (2007)

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 17. Ubicación de los puntos de muestreo para el sector de Pajarito

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 18. Ubicación de los puntos de muestreo para el resto del municipio de Medellín.

5.3.3 Modelo neuronal de permeabilidad

◆ Pre-procesamiento de la información

La metodología de redes neuronales se implementó para la obtención de un modelo que ayudara a correlacionar los índices de plasticidad con la permeabilidad del terreno, utilizando los datos obtenidos de la exploración ejecutada en Pajarito para la calibración del modelo, de forma tal que pudiera ser aplicado al resto de Medellín, y así tener la suficiente información espacial para la generación del mapa continuo de esta variable. El tamaño de la base de datos utilizada fue de 296 puntos de muestreo para la calibración del modelo neuronal, y de 98 para la estimación de la variable por fuera del sector de Pajarito.

La información entra a la red neuronal de forma matricial, en donde las variables están en las filas y en las columnas están los diferentes puntos de muestreo en el territorio de estudio. En los Mapas 17 y 18 se presentan la ubicación espacial de los puntos de muestreo en todo Medellín; vale destacar que se presentan los puntos por aparte debido a que en el primer mapa se tienen tanto información de índices de plasticidad como de permeabilidad, mientras que en el segundo solo se tienen datos de clasificación del suelo.

El modelamiento neuronal prepara la información que será presentada a la RNA, de modo tal que se transforme la base de datos a binarios (ceros y unos), para esto se lleva a escala logarítmica la permeabilidad (por la variabilidad de ésta es necesario llevarla a escala logarítmica para poder tener un mejor comportamiento de ésta) y luego se aplica la Ecuación 6 para la normalización de las entradas de la red neuronal.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

Donde: X_n : Valor de variable Normalizada
 X : Valor de variable
 X_{\min} : Valor mínimo de la variable
 X_{\max} : Valor máximo de la variable

Luego de tener la información binaria se procede a subdividir la base de datos en dos conjuntos, uno para entrenamiento y otro para validación. El de entrenamiento se construyó con el 70% de los datos y el otro con el 30 %. El primer grupo lo que hace es servir como suministro del entrenamiento, mientras que el segundo lo que hace es validar los resultados obtenidos del entrenamiento, verificando principalmente el hecho de que la red neuronal no esté memorizando nada, sino que por el contrario mantenga la capacidad de estimación con datos nunca antes vistos.

◆ Entrenamiento y pos-procesamiento de la información

El entrenamiento consistió en encontrar, inicialmente, la mejor arquitectura para el problema planteado. Este proceso se hace mediante tanteos, consistentes en entrenar

diferentes arquitecturas y verificar su desempeño hasta encontrar la óptima. Se crearon RNA's con una y dos capas ocultas, encontrando que el mejor comportamiento se relacionaba de manera persistente a modelos con dos capas oculta. El número de neuronas óptimo fue de 30 y 10 para la primera y segunda capa respectivamente, obtenido después de entrenar varios modelos con cantidades variables, en la cual el coeficiente de regresión (R) se maximizó y el error medio cuadrático (MSE) se minimizó.

En la Figura 12 se muestra la gráfica de comparación entre los datos simulados y los datos esperados o deseados, los cuales se encuentran normalizados entre cero y uno, observando que la mejor línea de ajuste tiene un coeficiente de correlación de 0.81624, el cual se considera aceptable en la mayoría de trabajos de este tipo.

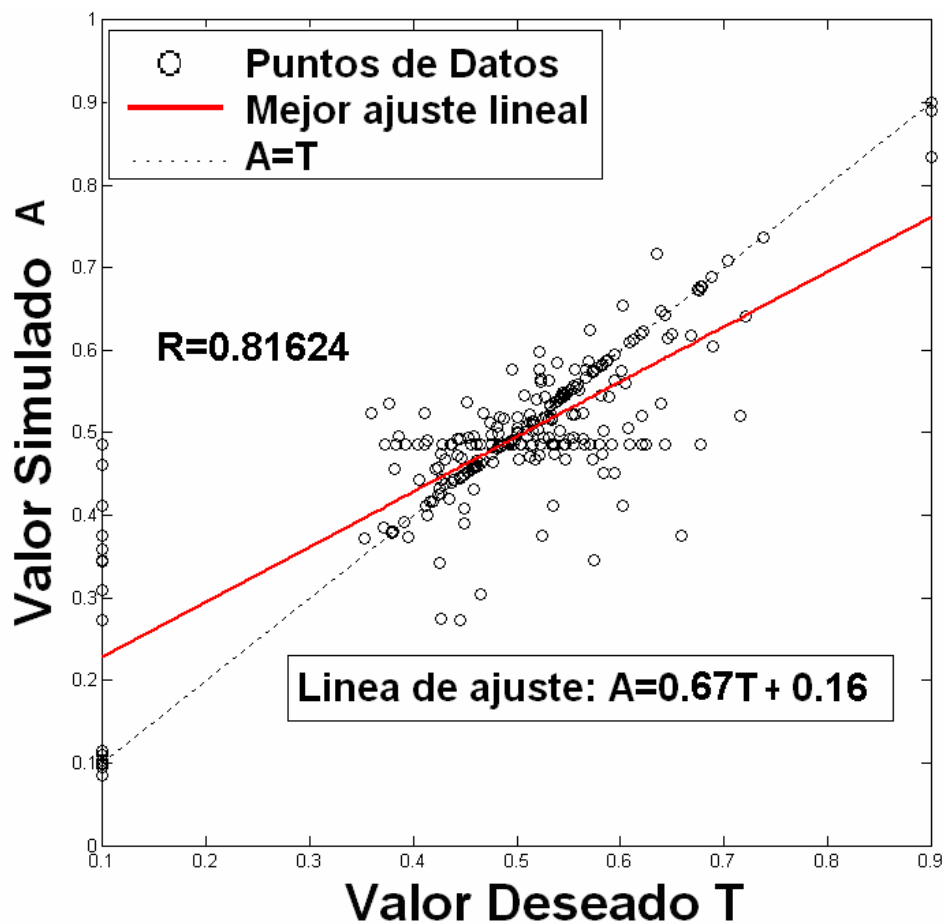


Figura 31. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos.

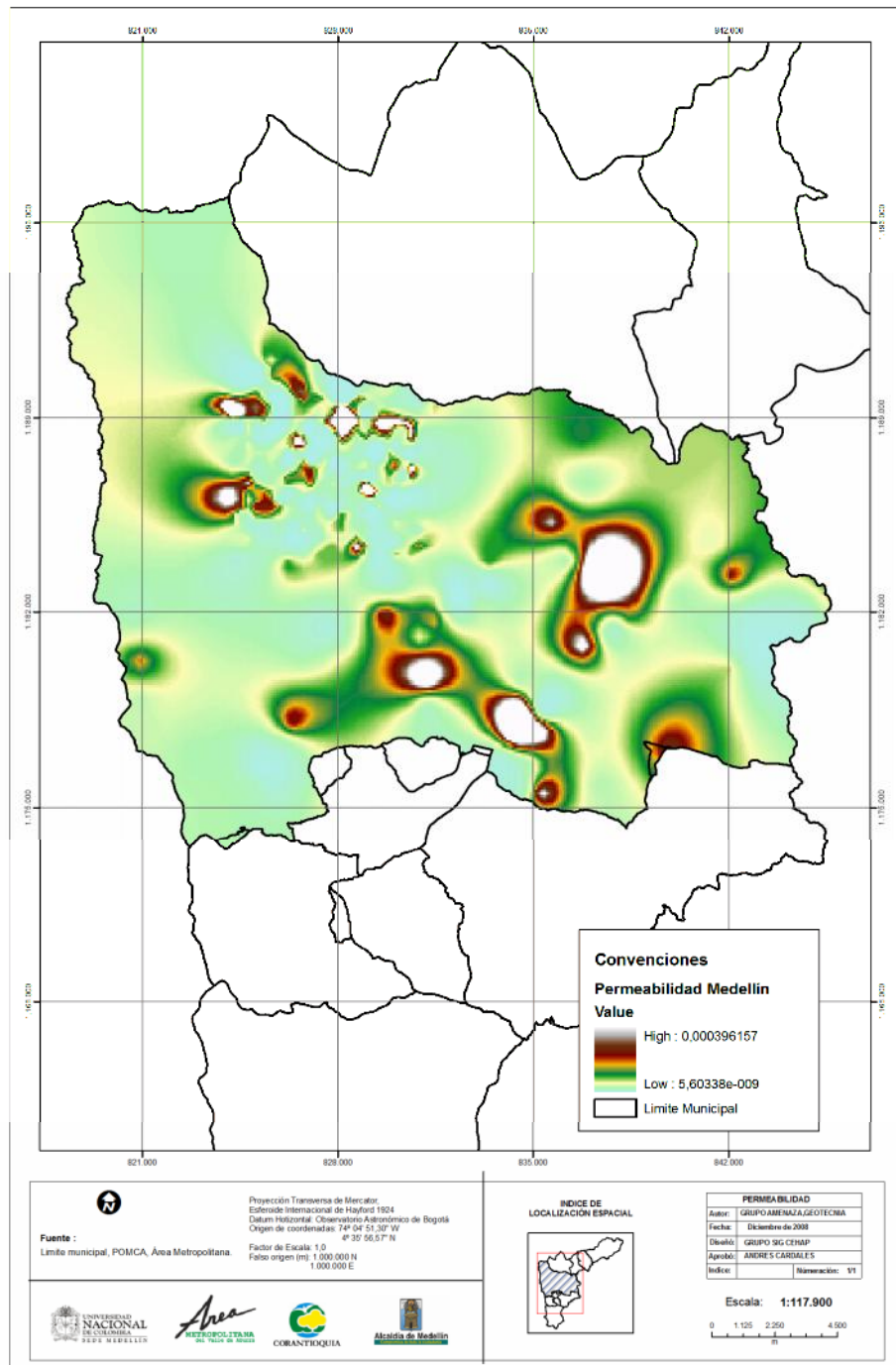
El paso siguiente consiste en volver la salida a su dominio original mediante la desnormalización de los datos. Una vez desnormalizados estos datos representan el valor estimado de la permeabilidad. Con este modelo neuronal calibrado se procede a implementarlo para el resto de Medellín tomando la información de índices de plasticidad

obtenidas del muestreo por fuera del sector de Pajarito en el que se ejecutaron ensayos de clasificación y de la base de datos de la firma geotecnista Vieco LTDA, obtenida de la tesis de maestría en geotecnia de Alarcón (2007). Con estos valores se construye el mapa de permeabilidad para todo Medellín, tal como se explicara en los siguientes numerales.

5.3.4 Determinación del mapa de permeabilidad

Con la información de permeabilidad para todo el Municipio de Medellín, está se sometió a un proceso de espacialización y arrojó un mapa continuo de permeabilidad al que posteriormente se le dio un formato compatible con las demás variables y se incorporó a la red neuronal para la evaluación de la amenaza por movimiento en masa. En el mapa 19. Se presenta el mapa de permeabilidad para el municipio de Medellín.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 19. Mapa de permeabilidad para el municipio de Medellín

6. MODELO NEURONAL DE AMENAZA

6.1 PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La metodología de redes neuronales requiere tener la información de forma matricial, en donde las variables están en las filas y en las columnas están las celdas de trabajo (para el Valle de Aburrá, 100m X 100m y para Medellín 50m X 50m) obtenidas de la división del territorio según el procedimiento que se explicó en secciones anteriores. La Figura 31 presenta de forma esquemática el proceso de partición del área de trabajo en celdas; a cada celda de trabajo se le asocian las variables de entrada al modelo.



Figura 32. Partición del área de trabajo en celdas.

Como se mostró en el capítulo anterior, hay un geo-procesamiento previo que prepara la información que será presentada a la RNA, de modo tal que se obtenga un valor único por variable dentro de la celda de trabajo. Aprovechando las potencialidades del SIG se hace posible entonces generar una base de datos de la forma que se encuentra representada en la Tabla 8. Nótese que cada celda de trabajo tiene un código numérico que corresponde al valor del atributo de la variable considerada en la celda. Los códigos numéricos de las filas correspondientes a la lluvia indican la probabilidad de excedencia de los umbrales de 3 días y de 15 días respectivamente.

Tabla 8. Base de datos suministrada por el SIG para el Valle de Aburrá.

BASE DE DATOS SUMINISTRADA POR EL SIG				
Número Celda	1	2	...	n
Número Procesos	0	1	...	0
Geología Superficial	11	10	...	11
Geomorfología	10	9	...	12
Uso Suelo	15	14	...	15
Pendiente	5	4	...	1
Lluvia 3 días	0,0871	0.0852	...	0,0873
Lluvia 15 días	0.5251	0.0462	...	0.0496

Para el ingreso de la información en la RNA, se debe transformar la base de datos suministrada por SIG en una base de datos binaria (ceros y unos), con excepción de la lluvia, la permeabilidad y los procesos que son datos continuos sin embargo se normalizan en un intervalo de cero a uno de forma tal que se mejore su compatibilidad con la función de transferencia sigmoide usada. Esta normalización se hace mediante la Ecuación 6.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

Donde: X_n : Valor de variable Normalizada
 X : Valor de variable
 X_{\min} : Valor mínimo de la variable
 X_{\max} : Valor máximo de la variable

La Tabla 9 presenta la forma general para el Valle de Aburrá que adopta finalmente la base de datos para entrenamiento de la red neuronal. Nótese que esta matriz se ha expandido a 34 filas debido a que cada atributo tiene más de una categoría, siendo

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

necesario abrir una fila para cada una de las categorías existentes. El atributo “procesos” está representado por dos categorías, la primera llamada “procesos cero o uno” se incorpora dentro del conjunto de entrada en el entrenamiento del modelo, indicando si en una celda de trabajo específica ha ocurrido o no algún deslizamiento en el tiempo de recopilación de la base de datos. La segunda categoría, llamada “procesos probabilidad” corresponde a la probabilidad real de ocurrencia semestral de movimientos en masa calculada para la celda en cuestión. Esta categoría constituyó el llamado vector de “salidas deseadas” y se presenta a la red como el conjunto de respuestas que se pretende sea capaz de predecir. Hay que destacar que la diferencia entre esta tabla y la que se genera en el momento de trabajar Medellín es el nivel de detalle de la geología y los procesos, que fue mejorada con base en información suministrada por la interventoría de registros propios de la alcaldía de Medellín, y la adición de las variables permeabilidad y curvatura.

Tabla 9. Estructura final de la base de datos para entrenamiento del modelo neuronal de predicción de amenaza por movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

	#de la celda	1	2	....	n
PROCESOS	Procesos Ceros ó unos	0	0	.....	0
	Procesos Probabilidad	0	0	.....	0
GEOLOGIA	GE01	0	0	.....	0
	GE02	0	0	.....	0
	GE03	1	1	.....	1
	GE04	0	0	.....	0
	GE05	0	0	.....	0
	GE06	0	0	.....	0
	GE07	0	0	.....	0
	GE08	0	0	.....	0
	GE09	0	0	.....	0
	GE010	0	0	.....	0
	GE011	0	0	.....	0
GEOMORFOLOGIA	GEOM1	0	0	.....	0
	GEOM2	0	0	.....	0
	GEOM3	0	0	.....	0
	GEOM4	0	0	.....	0
	GEOM5	0	0	.....	0
	GEOM6	0	0	.....	0
	GEOM7	1	1	.....	1
USOS DEL SUELO	US01	0	0	.....	0
	US02	0	0	.....	0
	US03	1	1	.....	1
	US04	0	0	.....	0
PENDIENTES	PEN1	0	0	.....	0
	PEN2	0	0	.....	1
	PEN3	0	0	.....	0
	PEN4	0	1	.....	0
	PEN5	1	0	.....	0
	PEN6	0	0	.....	0
	PEN7	0	0	.....	0
	PEN8	0	0	.....	0
PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DEL UMBRAL DE LLUVIA	Lluvias_3dias	0,5080	0,5096	.....	0,5096
	Lluvias_15dias	0,8498	0,8530	.....	0,8562

El tamaño de la base de datos expandida fue de 34 filas por 115545 columnas para el Valle de Aburrá mediante el uso de celdas de trabajo de 100m x 100m y de 36 filas por 37981 columnas para Medellín con celdas de trabajo de 50m x 50m.

Por último, se subdividió la base de datos en tres conjuntos, uno para entrenamiento, otro para validación y otro para ensayo. El de entrenamiento se construyó con el 50% de los datos. Para el caso estudiado se seleccionaron todas las celdas con numeración impar para conformar este conjunto, el cual es presentado a la red durante el entrenamiento para que ésta extraiga las características de las variables de tal forma que pueda descubrir la relación entre ellas, que conduce a un determinado valor de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. El segundo es el de validación, el cual se usa durante el entrenamiento para verificar el desempeño del aprendizaje y fue conformado por el 25 % de los datos. Periódicamente el proceso de entrenamiento es suspendido y se le presenta a la red el conjunto de validación. La respuesta de validación se compara con la respuesta deseada y se obtiene el error de validación el cual debe presentar una tendencia a disminuir a medida que avanza el proceso de entrenamiento. Si el error de validación entre dos paradas sucesivas permanece constante o aumenta, entonces se suspende definitivamente el entrenamiento del modelo. Por último, está el subconjunto de ensayo o test, conformado por el 25 % restante. Este conjunto sólo se presenta a la red una vez finalizado el proceso de entrenamiento y sirve para evaluar su capacidad de predicción o de interpolación. La respuesta de la red al ser simulada con este conjunto sirve para calcular el error de desempeño que es una medida del nivel de precisión del modelo.

6.2 ENTRENAMIENTO Y POS-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El proceso de entrenamiento consistió en encontrar, inicialmente, la mejor arquitectura para el problema planteado. Este proceso se hace mediante tanteos, consistentes en entrenar diferentes arquitecturas y verificar su desempeño hasta encontrar la óptima .

Se crearon RNA`s con una y dos capas ocultas, encontrando que el mejor comportamiento se relacionaba de manera persistente a modelos con una sola capa oculta. El número de neuronas óptimo fue de 90, después de entrenar modelos con cantidades variables entre 5 y 120 neuronas, tal como se presenta en la Tabla 10, en la cual R es el coeficiente de regresión entre los valores estimados por la red y la respuesta deseada, MSE es el error medio cuadrático y el número de épocas representa el número de veces que son presentados los vectores de entrenamiento a la red antes de alcanzar el punto óptimo.

Resultados del proceso de optimización de la RNA.

# de neuronas	R	MSE	Épocas
5	0,759	0,0166	111
10	0,745	0,0167	79
20	0,762	0,0165	86
30	0,753	0,0171	93
40	0,765	0,0165	67
50	0,751	0,0167	73
60	0,766	0,0163	125
70	0,765	0,0165	130
80	0,766	0,0164	97
90	0,772	0,0162	118
100	0,769	0,0163	154
110	0,761	0,0169	77
120	0,754	0,0175	62

En las Figuras 32 y 33 se grafican el coeficiente de correlación y el error respectivamente, con respecto a la cantidad de neuronas, observándose que la red con 90 neuronas en la capa oculta presenta la mejor combinación de error mínimo y máximo coeficiente de correlación. Cabe destacar que todas las arquitecturas fueron inicializadas 3 veces para escoger la de mejor desempeño.

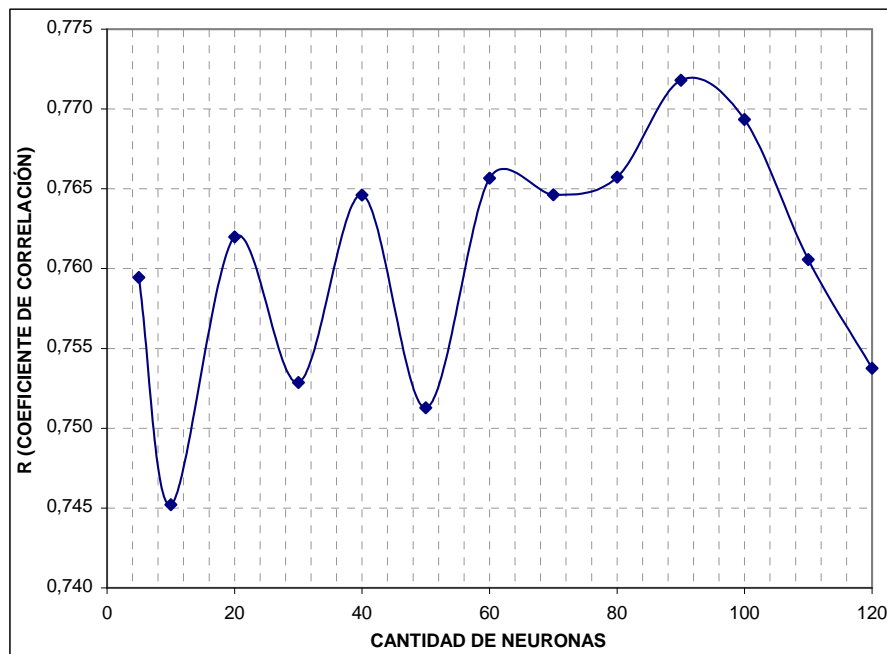


Figura 33. Coeficiente de correlación vs. Cantidad de neuronas.

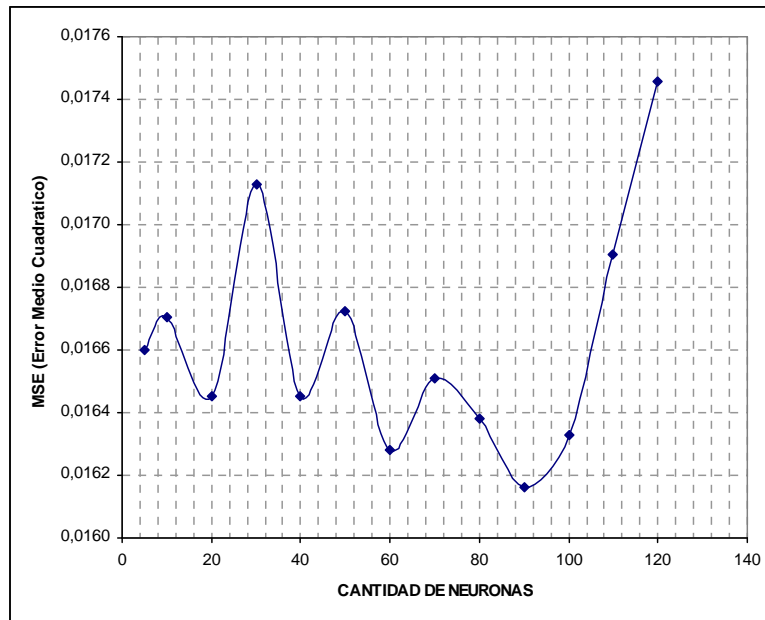


Figura 34. Error vs. Cantidad de neuronas.

En la Figura 34 y 35 se muestra la evolución del proceso de entrenamiento de la red neuronal óptima resultante de todo el proceso de análisis para el Valle de Aburrá y Medellín respectivamente. Se ve que se pierde la capacidad de aprender a las 118 épocas para el primero y a los 88 épocas para el otro

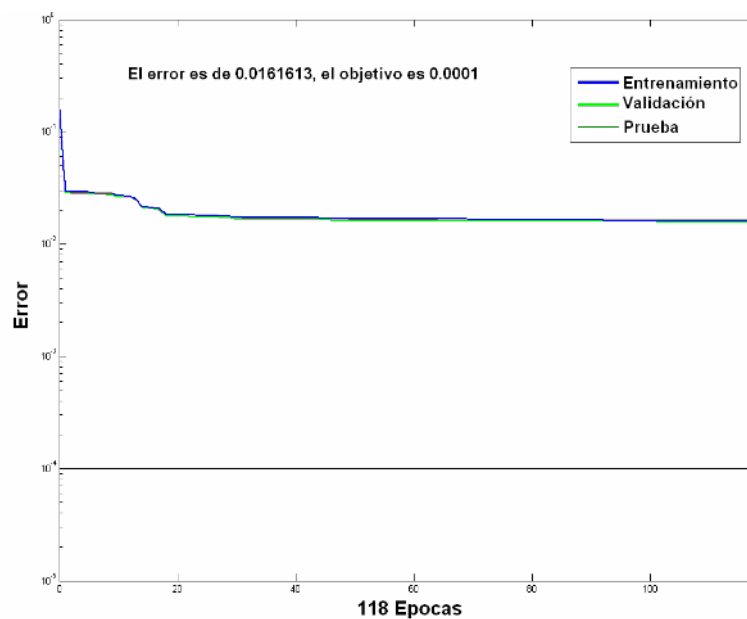


Figura 35. Gráfica del proceso de entrenamiento para el Valle de Aburrá.

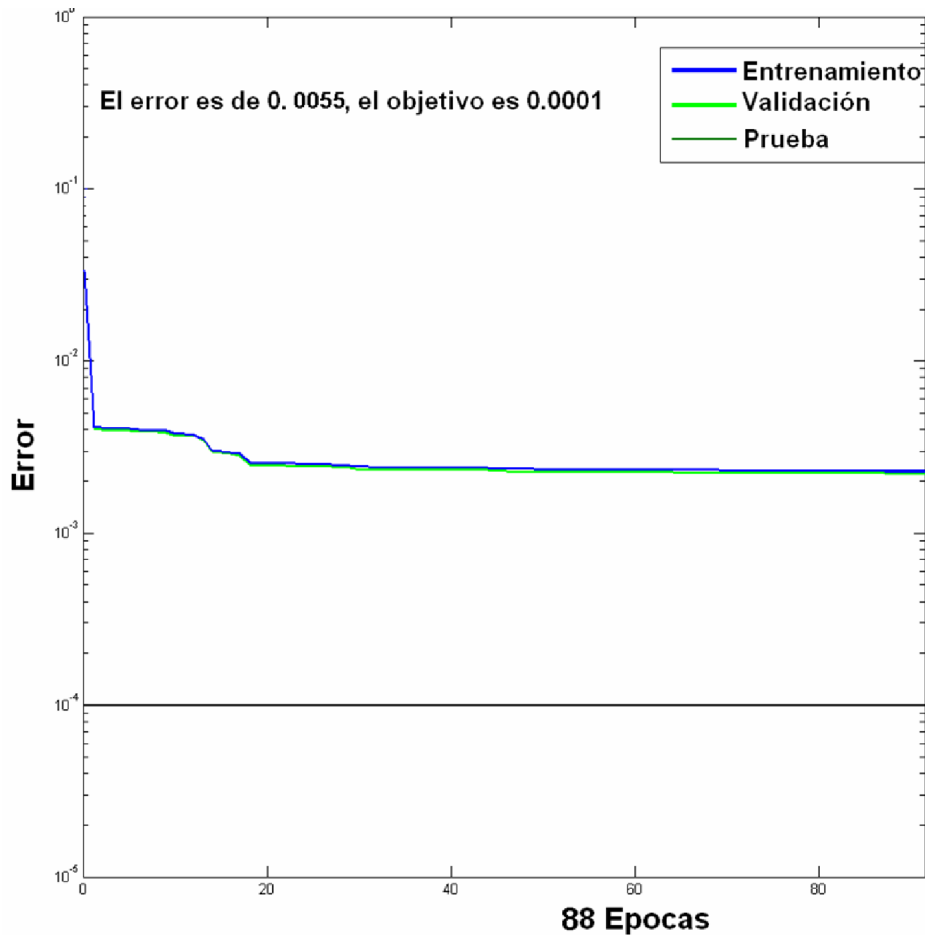


Figura 36. Gráfica del proceso de entrenamiento para Medellín.

En la Figura 36 y 37 se muestran las gráficas de comparación entre los datos simulados y los datos esperados o deseados, los cuales se encuentran normalizados entre cero y uno, observando que la mejor línea de ajuste tiene un coeficiente de correlación de 0.7718 y 0.7364 para el Valle de Aburra y Medellín respectivamente, lo cual se considera aceptable en la mayoría de trabajos de este tipo. Nótese que la respuesta deseada adopta 4 valores discretos correspondientes a los valores de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa calculados para las celdas de trabajo. No obstante, la salida del modelo se da de manera continua con valores que oscilan entre 0.10 y 0.60 aproximadamente. Esta respuesta continua es más realista puesto que la probabilidad de ocurrencia se distribuye de manera continua en el territorio estudiado.

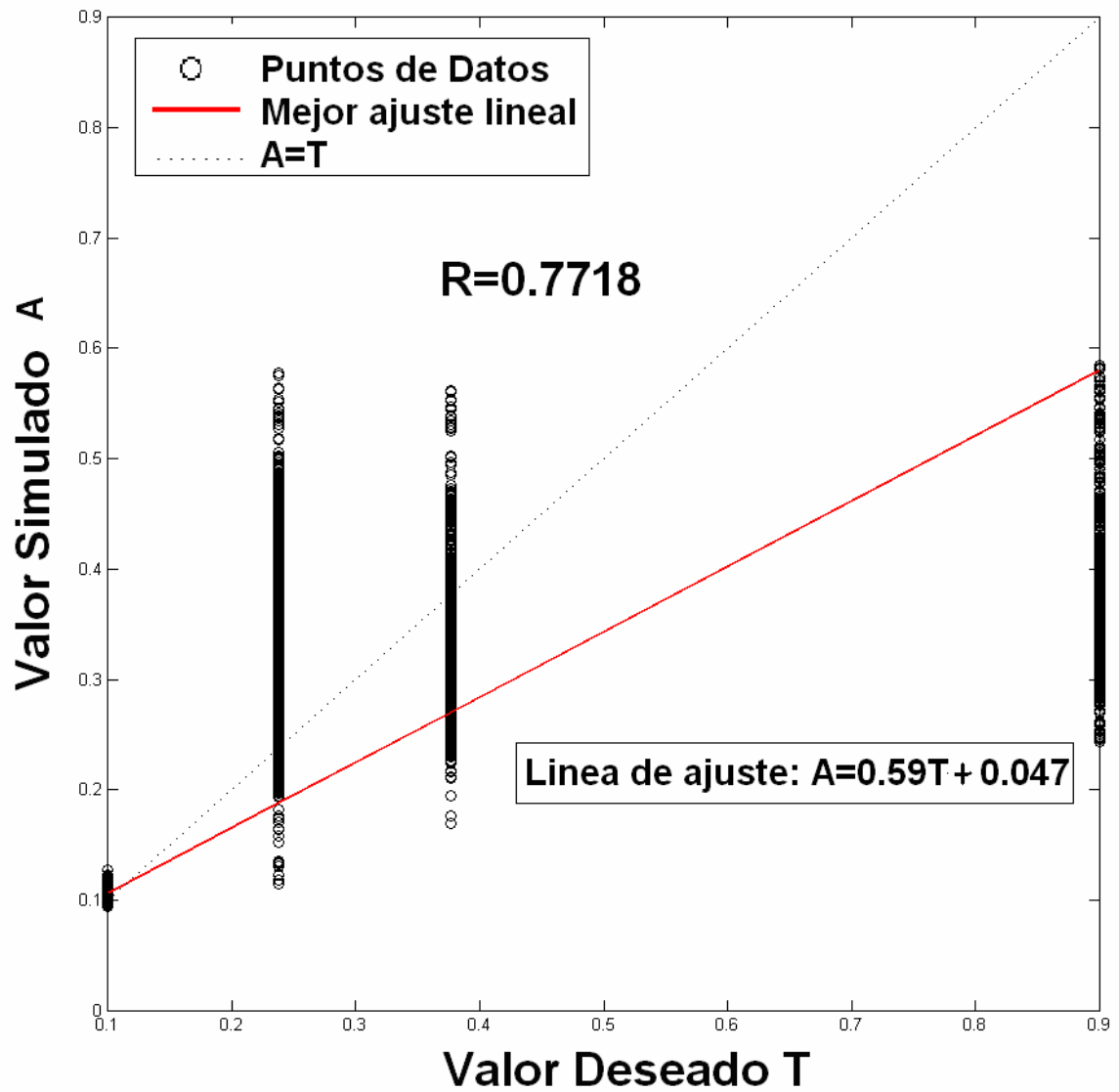


Figura 37. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos del Valle de Aburrá.

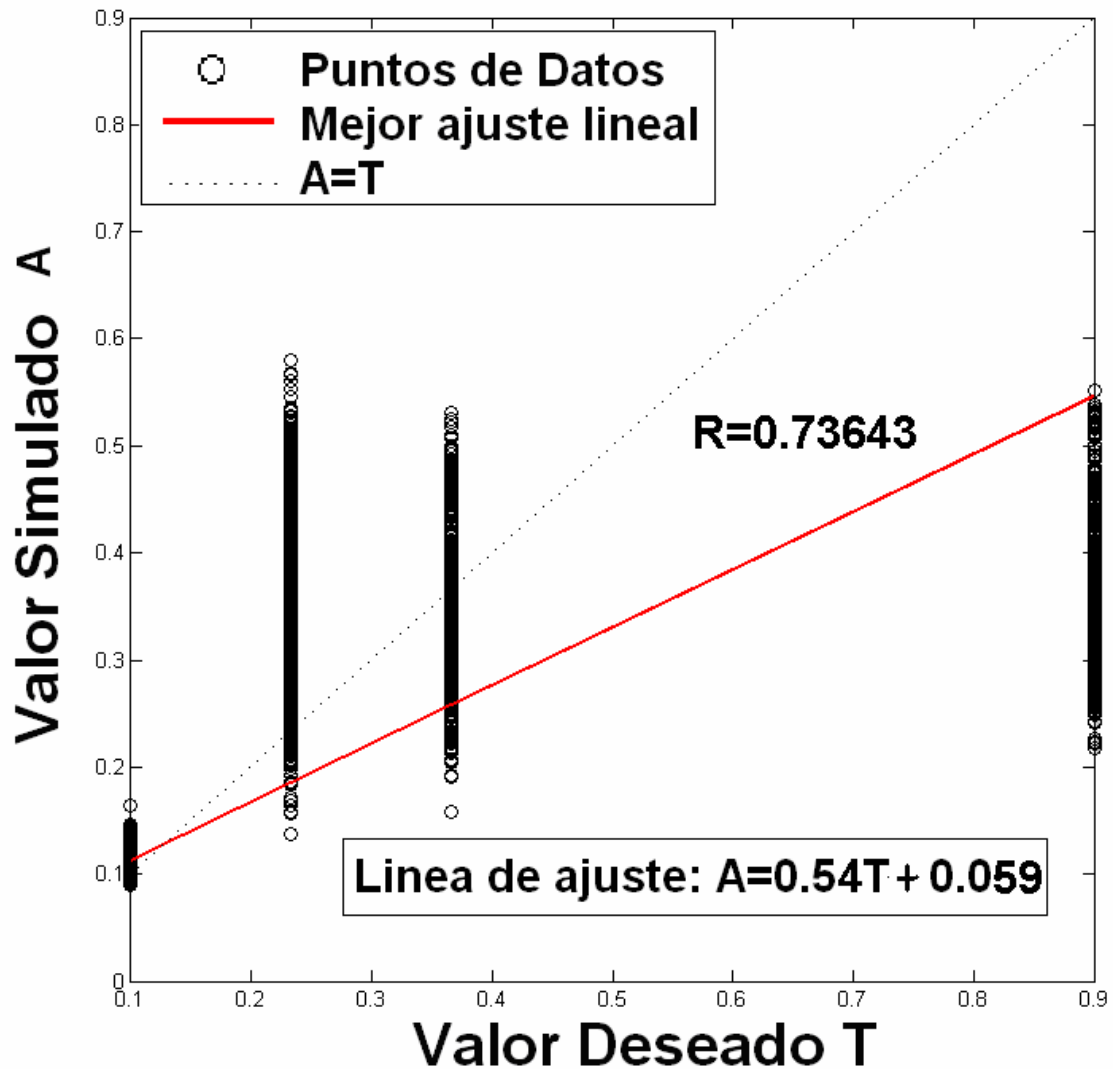
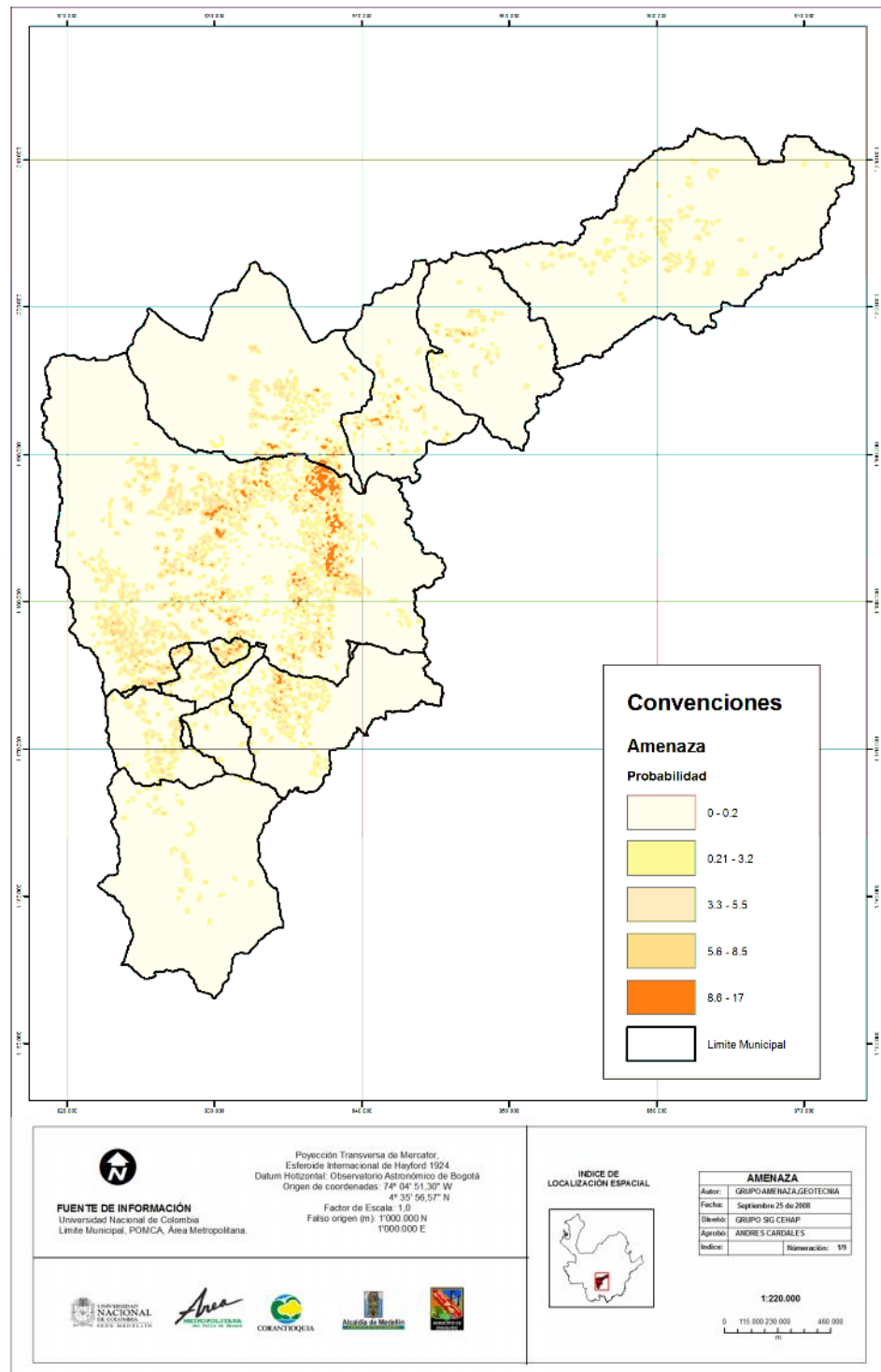


Figura 38. Valores Simulados vs. Valores Deseados. Para toda la base de datos de Medellín.

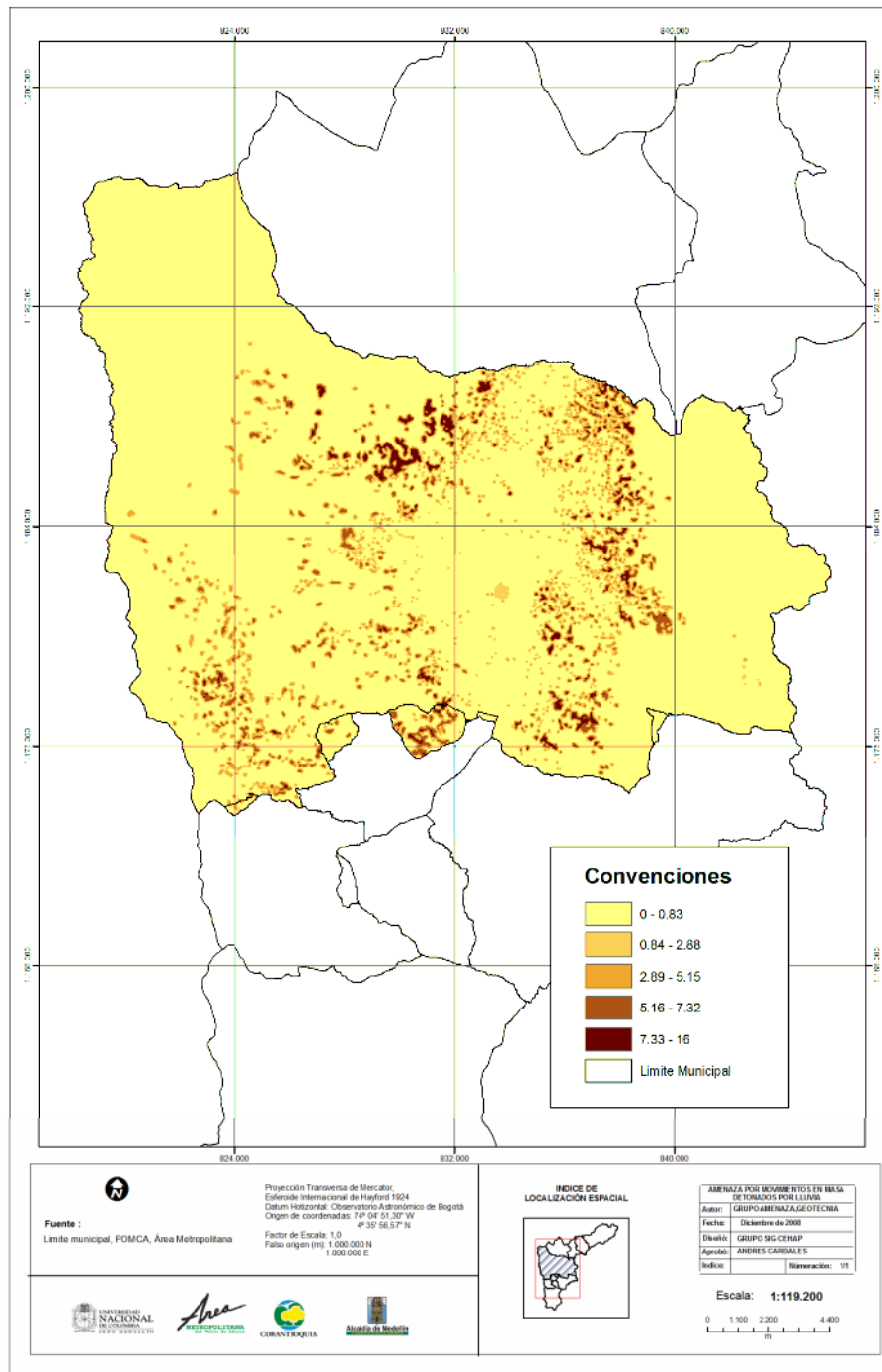
El paso siguiente consiste en volver la salida a su dominio original mediante la desnormalización de los datos. Una vez desnormalizados estos datos representan la probabilidad real de ocurrencia de movimientos en masa. Con estos valores se construye el mapa de amenaza por movimientos en masa que se presenta en los mapas 20 y 21 para el Valle de Aburra y Medellín respectivamente. Este procedimiento consiste en devolver los datos de amenaza de cada celda de trabajo, de tal forma que el SIG pueda hacer las interpolaciones necesarias para el mapa mencionado.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 20 Mapa de amenaza de movimientos en masa en el Valle de Aburrá considerando la lluvia como factor detonante.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Mapa 21. Mapa de amenaza de movimientos en masa en el municipio de Medellín considerando la lluvia como factor detonante.

7. LIMITACIONES

En general, los modelos de previsión de la amenaza no pueden ser efectivamente validados con los métodos científicos tradicionales; el único camino para la validación real de este tipo de estudios es el tiempo (García, 2004). El sentido de validación que ha sido usado en este trabajo se refiere a verificar la compatibilidad entre la respuesta arrojada por el modelo y la respuesta deseada, la cual es calculada a partir de los eventos de movimientos en masa que han ocurrido en el tiempo del inventario. Esta validación permitió definir un coeficiente de correlación de 0.77, el cual, como ya fue mencionado, se considera satisfactorio para esta clase de trabajos. Un modelo perfecto tendría un coeficiente de correlación igual a 1, cosa difícil, sino imposible de alcanzar por modelo alguno. El modelo aquí presentado tiene entonces cierto nivel de incertidumbre, la cual se puede manifestar de dos formas: (a) algunas celdas son calificadas con valores de amenaza altos teniendo en realidad valores bajos o (b) celdas con calificación de amenaza baja teniendo en realidad valores altos. El primer tipo de error es del tipo conservador, puesto que, en el caso extremo, obligaría a tomar medidas de prevención sobre áreas que no lo ameritan. En el segundo caso, considerado más grave, se estarían dejando de atender zonas con amenaza alta aumentando el nivel de riesgo. En ambos casos, el común denominador es el desconocimiento de la magnitud de los errores inducidos.

Lo anterior conduce entonces a recomendar un proceso de validación alternativo que consiste en revisar de manera detallada el territorio estudiado para, en compañía de otros expertos y funcionarios de los diferentes municipios, determinar cuales zonas pueden estar siendo sobre-calificadas o sub-calificadas, haciendo énfasis en las zonas cuya valoración de la amenaza es sospechosamente baja. Esto significa que deben ser observadas con más detalle las zonas marcadas en verde que las zonas marcadas en rojo, haciendo alusión a la convención de colores que se ha usado en la presentación del mapa final, en el cual los tonos rojos indican amenaza creciente, mientras que los tonos verdes indican amenazas cada vez menores.

Es necesario destacar que este mapa debe ser interpretado como una herramienta de planificación regional. Debido al nivel de detalle de las variables usadas (Escala 1:10.000) no es pertinente usarlo para tomar decisiones puntuales, es decir, a nivel de casa o manzana. Un trabajo más detallado se adelantó para el municipio de Medellín tal como se explicó en el numeral correspondiente; como se dijo, para este municipio se produjo un mapa a escala 1:5000 el cual incluyó dentro del proceso de entrenamiento del modelo, la variable permeabilidad del suelo, con el propósito de mejorar el nivel de resolución.

8. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS QUE PRESENTAN AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA Y RESTRICCIONES PARA EL VALLE DE ABURRÁ.

Después de haber integrado mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) una serie de variables pre-disponentes de los eventos de movimientos en masa, tales como: geología, geomorfología, procesos morfodinámicos, pendientes, usos del suelo y lluvia agregada a 3 y 15 días (considerando este último factor como detonante de los movimientos en masa); se generó un mapa ráster con información de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa que expresa la amenaza en términos de dicha probabilidad.

A continuación se hace un análisis del mapa de amenaza obtenido por el modelo mediante el uso de RNA en comparación con la información espacial involucrada en el proceso de modelación, haciendo énfasis en aquellas zonas donde la probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa es mayor.

8.1 CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES.

A continuación se define la clasificación más apropiada de cada una de las variables para facilitar el proceso de descripción de las zonas de amenaza:

- Para la geología, geomorfología, usos del suelo y pendiente se retoman las clasificaciones dadas en el presente trabajo (ver Tablas 1, 2, 3, 4 respectivamente), ya que son pertinentes para lo que se pretende.
- Para la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (amenaza) se retoma la clasificación definida en el presente trabajo (ver Mapa 20), sin embargo solo se usan en el proceso de descripción las tres últimas categorías, ya que es de interés caracterizar aquellas zonas que presenten la mayor amenaza por movimientos en masa; lo anterior se ilustra en la Tabla 11.

Tabla 10. Categorías de probabilidad de movimientos en masa.

Probabilidad de movimientos en masa anual (%)
0-0,2
0,2-3,2
3,2 – 5,5
5,5- 8,5
8,5-16,5

- Dado que se obtuvo un modelo continuo para la probabilidad de excedencia del umbral de la lluvia agregada a 3 y 15 días en el Valle de Aburrá (ver Figuras 25 y 30 respectivamente), se toma todo el rango de valores de probabilidad de ambos

modelos y se clasifican en 5 categorías con intervalos iguales, con el fin de facilitar el proceso de descripción. Lo anterior se ilustra en la tabla 12 y tabla 13.

Tabla 11. Categorías de trabajo para la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días.

Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 3 días (%)
2,3 - 4,8
4,8 - 7,3
7,3 - 9,8
9,8 - 12,3
12,3 - 14,8

Tabla 12. Categorías de trabajo para la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días.

Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 15 días (%)
13,5 - 28,6
28,6 - 43,6
43,6 - 58,6
58,6 - 73,6
73,6 - 88,7

8.2 DESCRIPCIÓN DE ZONAS

El procedimiento para describir las zonas con amenaza se llevó a cabo de la siguiente forma:

- A. En el mapa de amenaza se definieron polígonos que se caracterizan por tener en su interior el mismo tipo de amenaza.
- B. Se realizó un proceso de rasterización sobre los mapas de las variables involucradas en el proceso de descripción de la amenaza (geología, pendientes...etc.), con una celda de trabajo (píxel) de 100m x 100m.
- C. Se procedió a superponer cada uno de los mapas de cada variable con respecto al mapa que contenía los polígonos de amenaza, se intersectaron dichos mapas y de esta forma se ejecutó un conteo de píxeles para determinar el área correspondiente a las respectivas unidades que pertenecen a cada variable y de esta forma quedaron caracterizados todos los polígonos. Lo anterior se esquematiza en la figura 395.

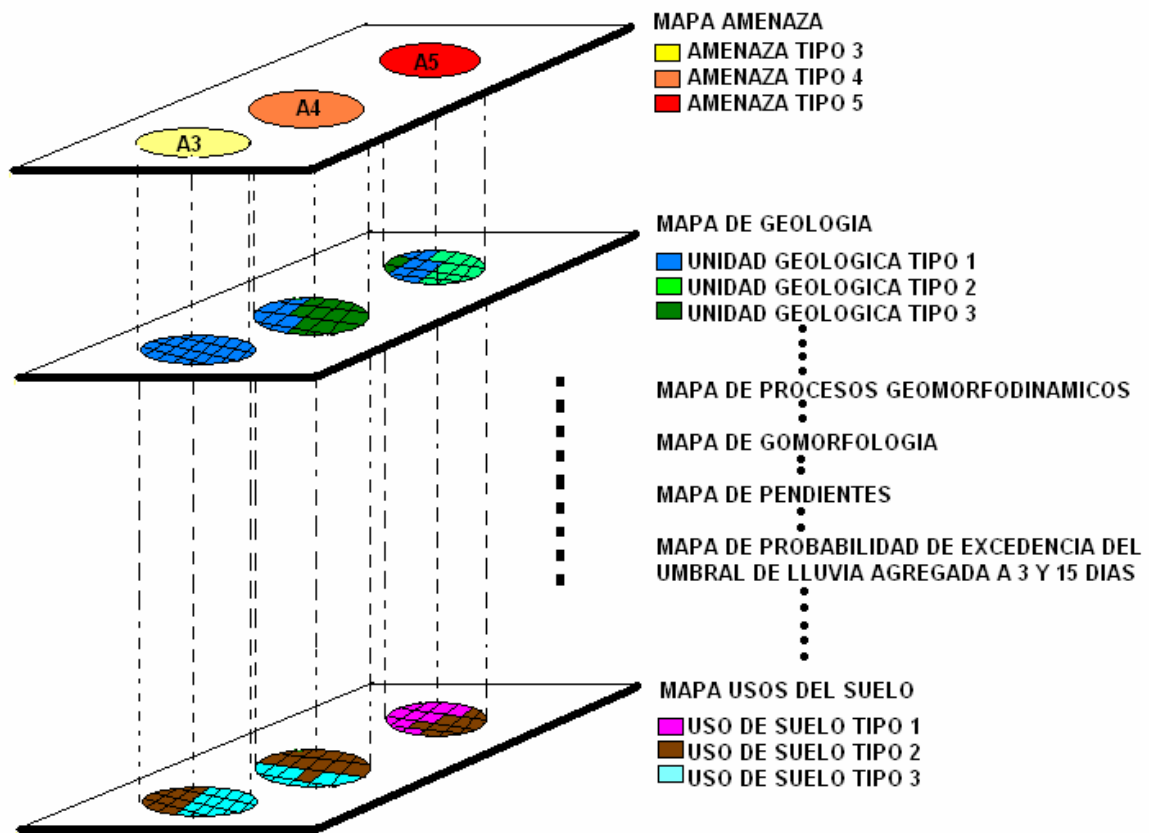


Figura 39. Proceso para determinar el área de la amenaza y de sus respectivas variables.

8.3 ANALISIS ESTADISTICO

8.3.1 Histogramas de frecuencia

Se construyeron histogramas para cada nivel de amenaza que muestran cuales categorías de las diversas variables tienen mayor influencia sobre dicho tipo de amenaza. Para esto se agrupan todos los polígonos que tienen la misma categoría de amenaza y se acumulan las áreas de las respectivas categorías de cada variable.

En las Tablas 14, 15 y 16 se muestran los resultados obtenidos para la amenaza tipo 3, 4, 5.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 13. Resultados para amenaza tipo 3

Amenaza tipo			3	
Área de la amenaza(Km ²)			17,84	
Variables	Categorías	No. De celdas	Área (Km ²)	Porcentaje del área (%)
Pendientes(°)	0 - 5	97	0,97	5,4%
	5-10	132	1,32	7,4%
	10-15	184	1,84	10,3%
	15 - 20	221	2,21	12,4%
	20 - 25	279	2,79	15,6%
	25 - 30	293	2,93	16,4%
	25 - 35	225	2,25	12,6%
	> 35	353	3,53	19,8%
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 3 días (%)	2,3 - 4,8	753	7,53	42,2%
	4,8 - 7,3	838	8,38	47,0%
	7,3 - 9,8	180	1,8	10,1%
	9,8 - 12,3	4	0,04	0,2%
	12,3-14,8	9	0,09	0,5%
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 15 días (%)	13,5 - 28,6	0	0	0,0%
	28,6-43,6	95	0,95	5,3%
	43,6-58,6	1120	11,2	62,8%
	58,6-73,6	541	5,41	30,3%
	73,6-88,7	28	0,28	1,6%
Geología	Flujos	156	1,56	8,7%
	Rocas básicas	11	0,11	0,6%
	Ígneos	777	7,77	43,6%
	Gneis	34	0,34	1,9%
	Anfibolita- Dunita	36	0,36	2,0%
	Volcanicos	268	2,68	15,0%
	Aluviales	69	0,69	3,9%
	Esquistos	228	2,28	12,8%
	Migmatitas de Puente Peláez	188	1,88	10,5%
	Depósitos de deslizamiento	16	0,16	0,9%
	Llenos antrópicos	1	0,01	0,1%
Geomorfología	Valle superior bloque colinas en depósitos de vertiente	59	0,59	3,3%
	Morfotectónicos	93	0,93	5,2%
	Fondo de valle	1	0,01	0,1%
	Cuenca; Valle Medio y Valle inferior	25	0,25	1,4%
	Superficies Incisadas	204	2,04	11,4%

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Amenaza tipo			3	
Área de la amenaza(Km ²)			17,84	
VARIABLES	Categorías	No. De celdas	Área (Km ²)	Porcentaje del área (%)
	Valle Medio Bloque	1360	13,6	76,2%
	Altiplanos escarpes regional	42	0,42	2,4%
Usos del suelo	Urbano	123	1,23	6,9%
	Pasto	403	4,03	22,6%
	Agrícola	1082	10,82	60,7%
	Bosques	176	1,76	9,9%

Tabla 14. Resultados para amenaza tipo 4

Amenaza tipo			4	
Área de la amenaza(Km ²)			18,39	
VARIABLES	Categorías	No. De celdas	Área (Km ²)	Porcentaje del área (%)
Pendientes(°)	0 - 5	175	1,75	9,5%
	5-10	268	2,68	14,6%
	10-15	337	3,37	18,3%
	15 - 20	345	3,45	18,8%
	20 - 25	261	2,61	14,2%
	25 - 30	193	1,93	10,5%
	25 - 35	153	1,53	8,3%
	> 35	107	1,07	5,8%
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 3 días (%)	2,3 - 4,8	1534	15,34	83,4%
	4,8 - 7,3	298	2,98	16,2%
	7,3 - 9,8	7	0,07	0,4%
	9,8 - 12,3	0	0	0,0%
	12,3-14,8	0	0	0,0%
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 15 días (%)	13,5 - 28,6	17	0,17	0,9%
	28,6-43,6	587	5,87	31,9%
	43,6-58,6	1197	11,97	65,1%
	58,6-73,6	38	0,38	2,1%
	73,6-88,7	0	0	0,0%
Geología	Flujos	803	8,03	43,7%
	Rocas básicas	10	0,1	0,5%
	Ígneos	477	4,77	25,9%
	Gneis	12	0,12	0,7%
	Anfibolita- Dunita	341	3,41	18,5%
	Volcánicos	15	0,15	0,8%
	Aluviales	93	0,93	5,1%
	Esquistos	0	0	0,0%
Migmatitas de Puente Peláez	72	0,72	3,9%	

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Amenaza tipo			4	
Área de la amenaza(Km ²)			18,39	
VARIABLES	Categorías	No. De celdas	Área (Km ²)	Porcentaje del área (%)
	Depósitos de deslizamiento	11	0,11	0,6%
	Llenos antrópicos	5	0,05	0,3%
Geomorfología	Valle superior bloque colinas en depósitos de vertiente	15	0,15	0,8%
	Morfotectónicos	0	0	0,0%
	Fondo de valle	0	0	0,0%
	Cuenca; Valle Medio y Valle inferior	10	0,1	0,5%
	Superficies Incisadas	875	8,75	47,6%
	Valle Medio Bloque	927	9,27	50,4%
	Altiplanos escarpes regional	12	0,12	0,7%
Usos del suelo	Urbano	532	5,32	28,9%
	Pasto	394	3,94	21,4%
	Agrícola	603	6,03	32,8%
	Bosques	310	3,1	16,9%

Tabla 15. Resultados para amenaza tipo 5

Amenaza tipo			5	
Área de la amenaza(Km ²)			12,85	
VARIABLES	Categorías	No. De celdas	Área (Km ²)	Porcentaje del área (%)
Pendientes(°)	0 - 5	89	0,89	6,9%
	5-10	139	1,39	10,8%
	10-15	200	2	15,6%
	15 - 20	319	3,19	24,8%
	20 - 25	213	2,13	16,6%
	25 - 30	164	1,64	12,8%
	25 - 35	97	0,97	7,5%
	> 35	64	0,64	5,0%
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 3 días (%)	2,3 - 4,8	1226	12,26	95,4%
	4,8 - 7,3	59	0,59	4,6%
	7,3 - 9,8	0	0	0,0%
	9,8 - 12,3	0	0	0,0%
	12,3-14,8	0	0	0,0%
Probabilidad de excedencia del	13,5 - 28,6	102	1,02	7,9%
	28,6-43,6	1028	10,28	80,0%

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Amenaza tipo			5	
Área de la amenaza(Km ²)			12,85	
VARIABLES	Categorías	No. De celdas	Área (Km2)	Porcentaje del área (%)
umbral de lluvia de 15 días (%)	43,6-58,6	153	1,53	11,9%
	58,6-73,6	2	0,02	0,2%
	73,6-88,7	0	0	0,0%
Geología	Flujos	395	3,95	30,7%
	Rocas básicas	230	2,3	17,9%
	Ígneos	185	1,85	14,4%
	Gneis	0	0	0,0%
	Anfibolita- Dunita	452	4,52	35,2%
	Volcánicos	0	0	0,0%
	Aluviales	4	0,04	0,3%
	Esquistos	0	0	0,0%
	Migmatitas de Puente Peláez	0	0	0,0%
	Depósitos de deslizamiento	0	0	0,0%
Llenos antrópicos	19	0,19	1,5%	
Geomorfología	Valle superior bloque colinas en depósitos de vertiente	2	0,02	0,2%
	Morfotectónicos	14	0,14	1,1%
	Fondo de valle	0	0	0,0%
	Cuenca; Valle Medio y Valle inferior	37	0,37	2,9%
	Superficies Incisadas	642	6,42	50,0%
	Valle Medio Bloque	590	5,9	45,9%
	Altiplanos escarpes regional	0	0	0,0%
Usos del suelo	Urbano	849	8,49	66,1%
	Pasto	6	0,06	0,5%
	Agrícola	114	1,14	8,9%
	Bosques	316	3,16	24,6%

Con base en las anteriores tablas se obtuvieron los histogramas para cada tipo de amenaza, lo cual se presenta a continuación.

◆ **Histogramas para las variables de la amenaza tipo 3**

En las Figuras 40, 41, 42, 43, 44 y 45 se muestran respectivamente los histogramas de las pendientes, de la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia acumulada de 3 y 15 días, de la geología, geomorfología y los usos del suelo. En éstos se aprecia que las

variables están referenciadas como porcentajes del área total del tipo de la amenaza tipo 3.

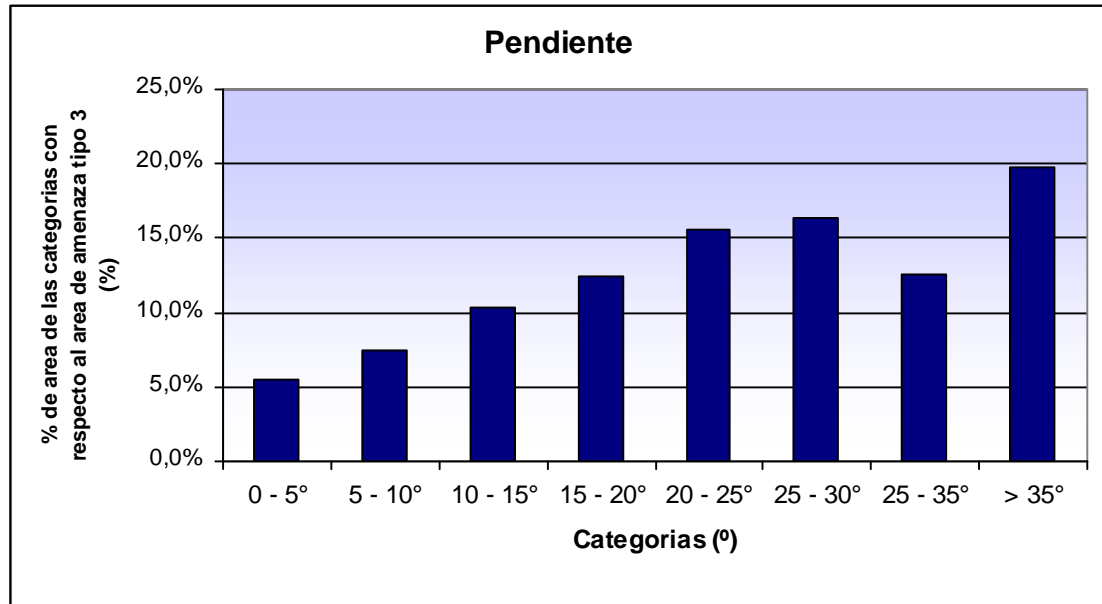


Figura 40. Histograma de pendientes- amenaza tipo 3

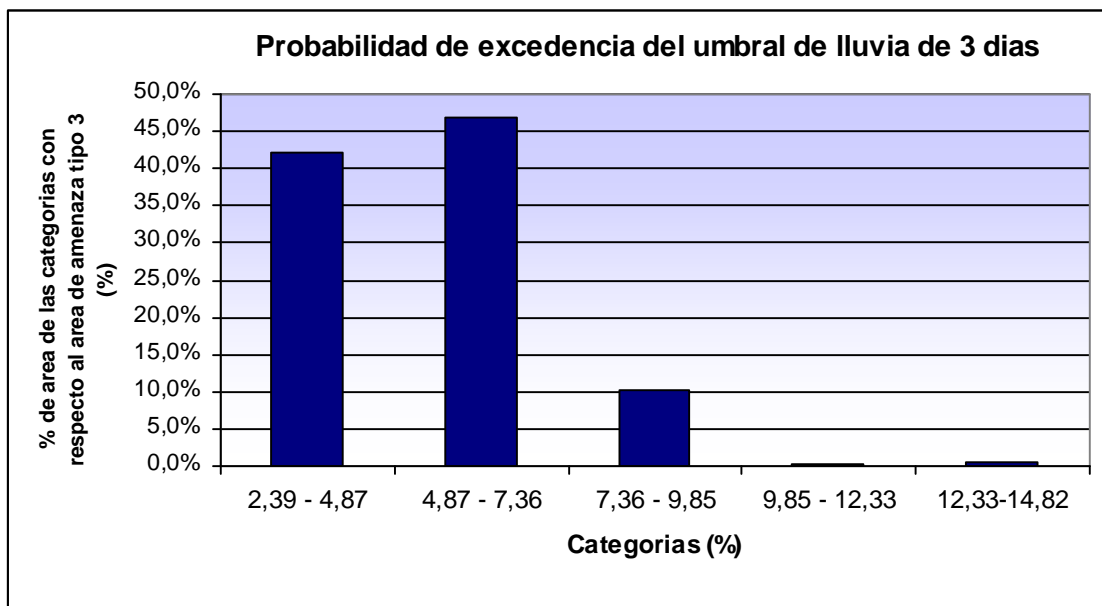


Figura 41. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 3 días- amenaza tipo 3

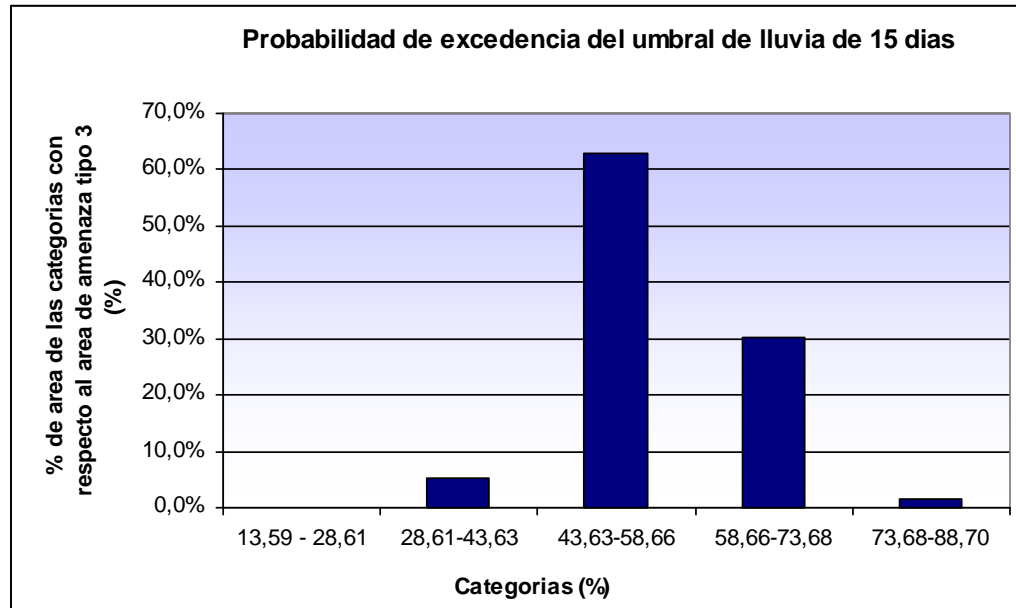


Figura 42. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia agregada a 15 días- amenaza tipo 3

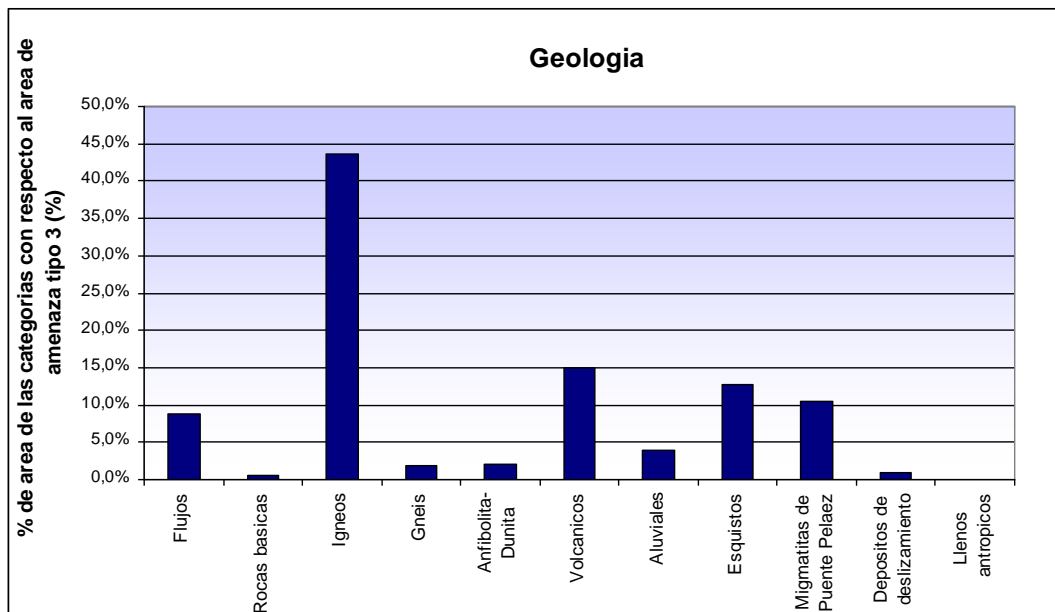


Figura 43. Histograma geología - amenaza tipo 3

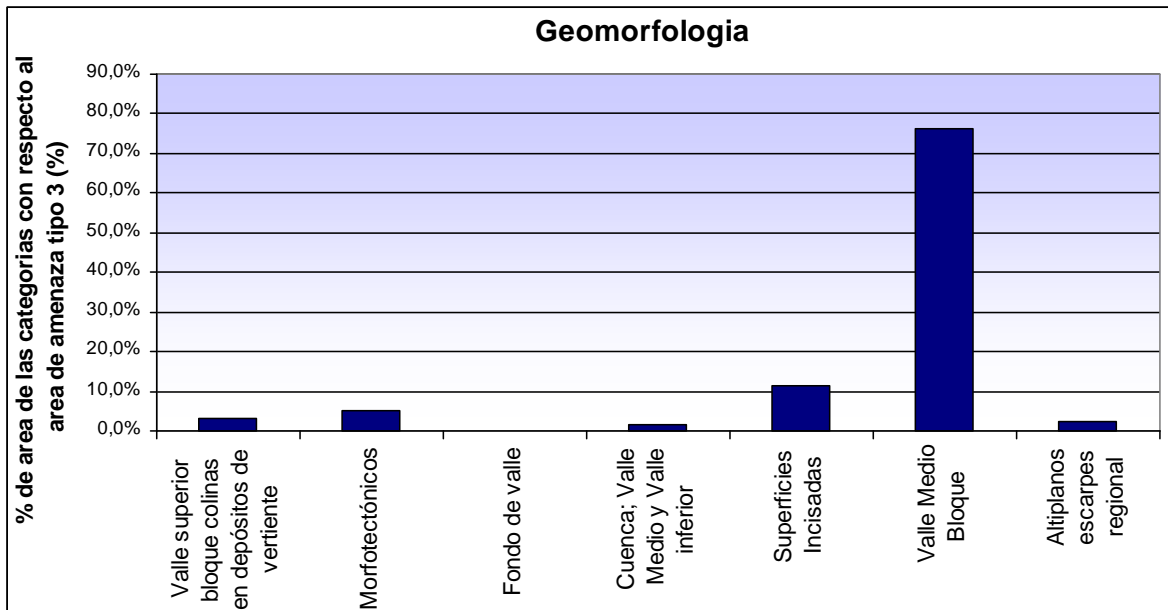


Figura 44. Histograma de geomorfología - amenaza tipo 3

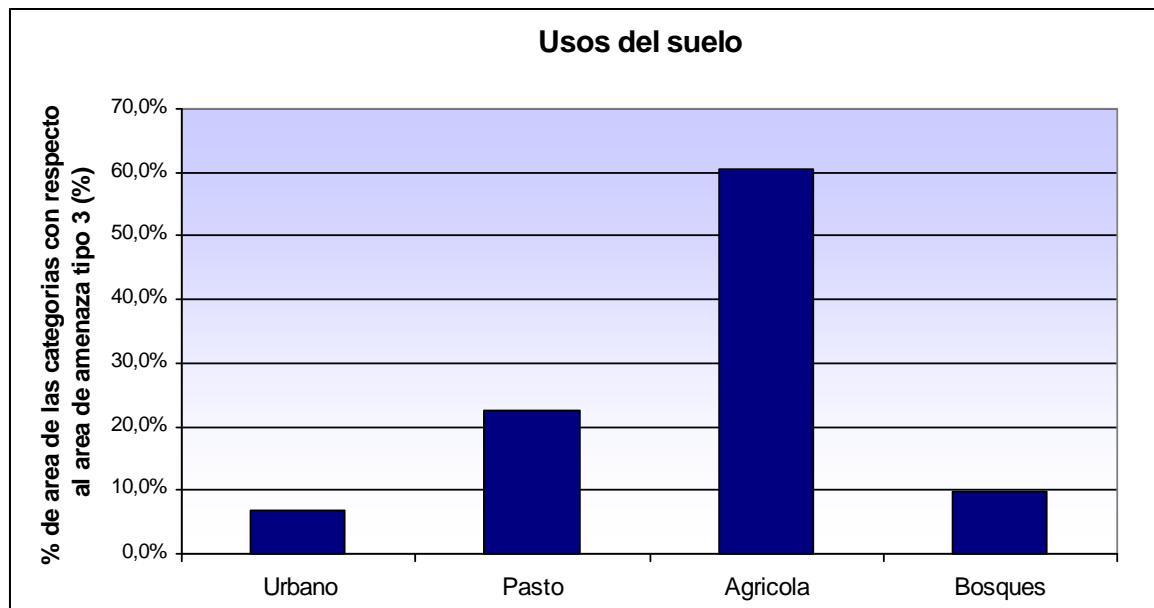


Figura 45. Histograma de usos del suelo - amenaza tipo 3

◆ **Histogramas para las variables de la amenaza tipo 4**

De forma análoga se presentan en las Figuras 46, 47, 48, 49, 50 y 51, los histogramas de las mismas variables que conformaban los polígonos de amenaza tipo 4.

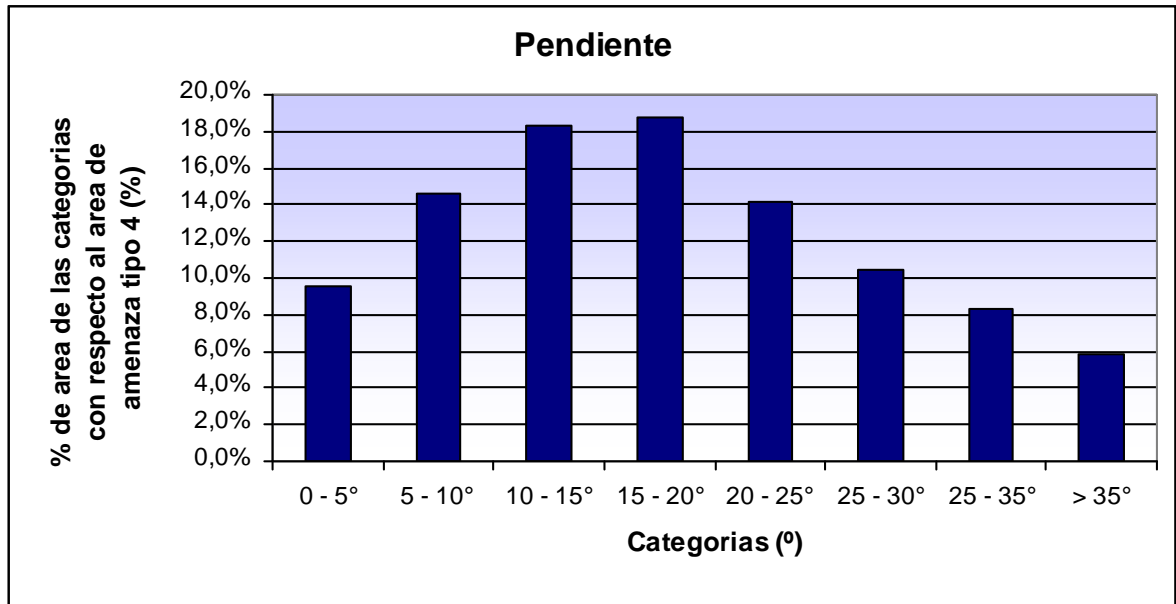


Figura 46. Histograma de pendiente - amenaza tipo 4

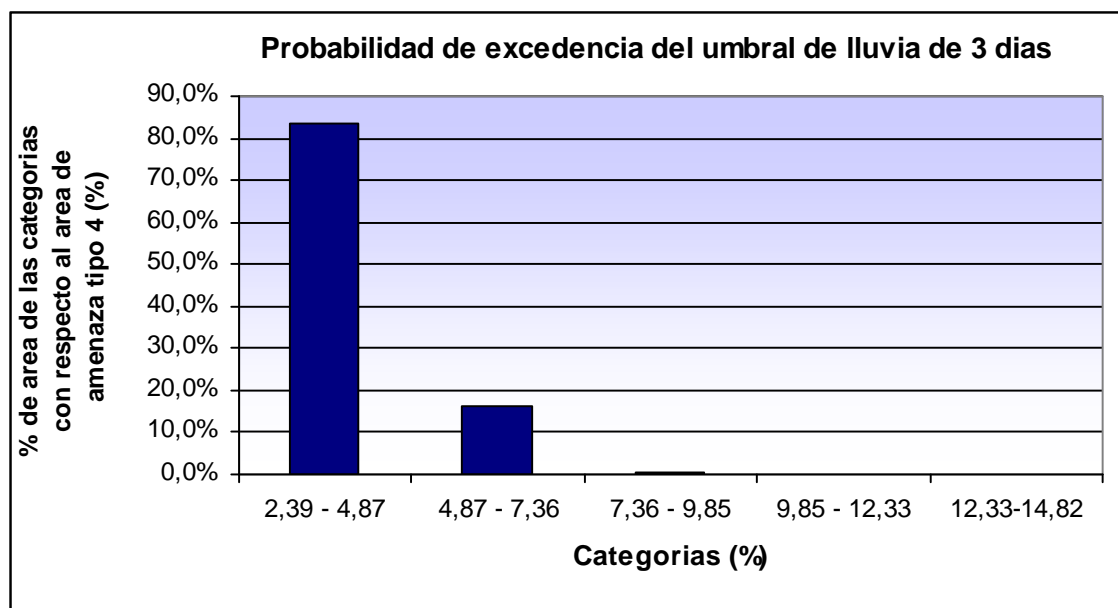


Figura 47. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia acumulada a 3 días - amenaza tipo 4

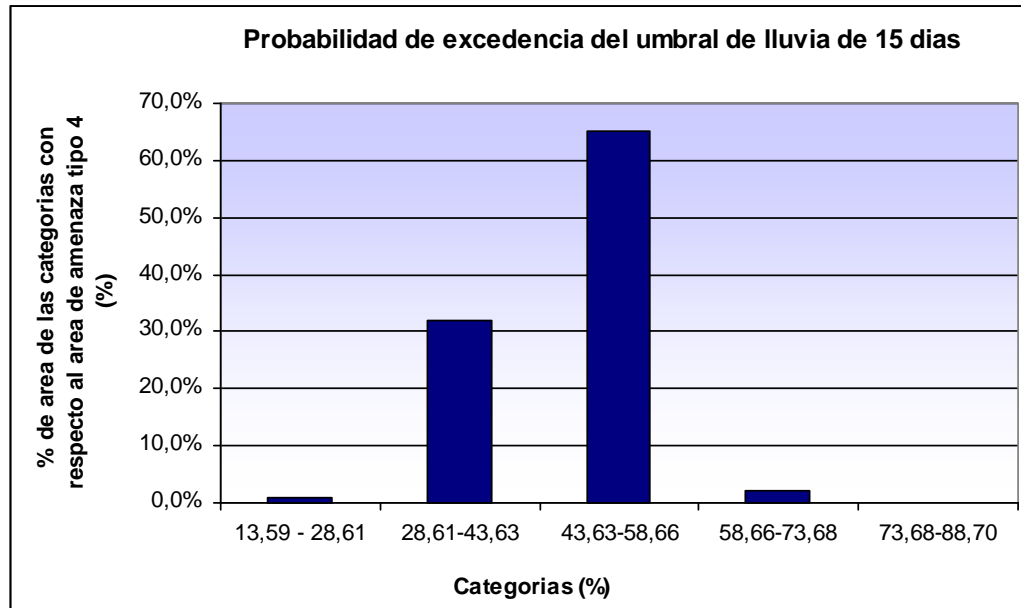


Figura 48. Histograma de probabilidad de excedencia del umbral de lluvia acumulada a 15 días- amenaza tipo 4

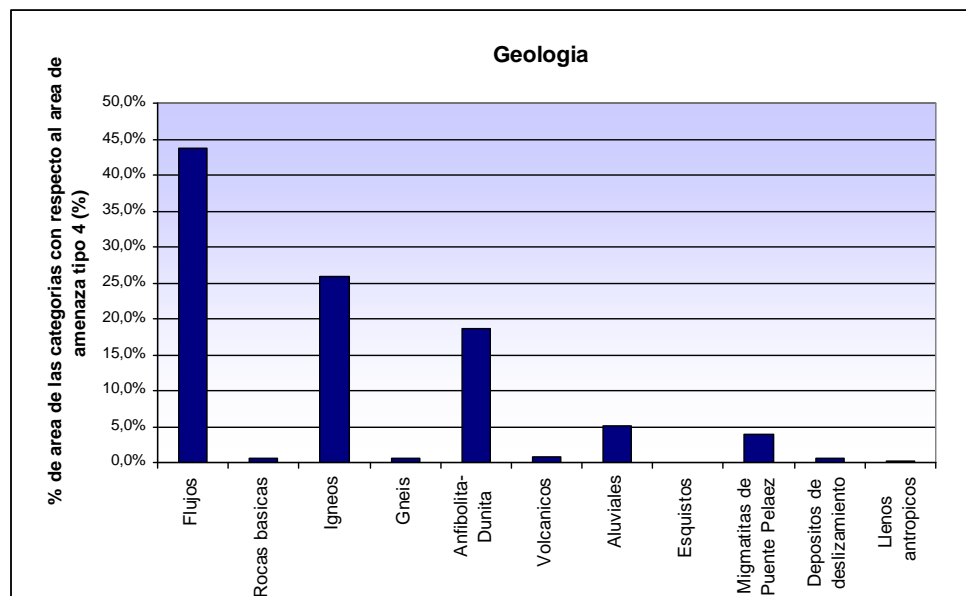


Figura 49. Histograma geología - amenaza tipo 4

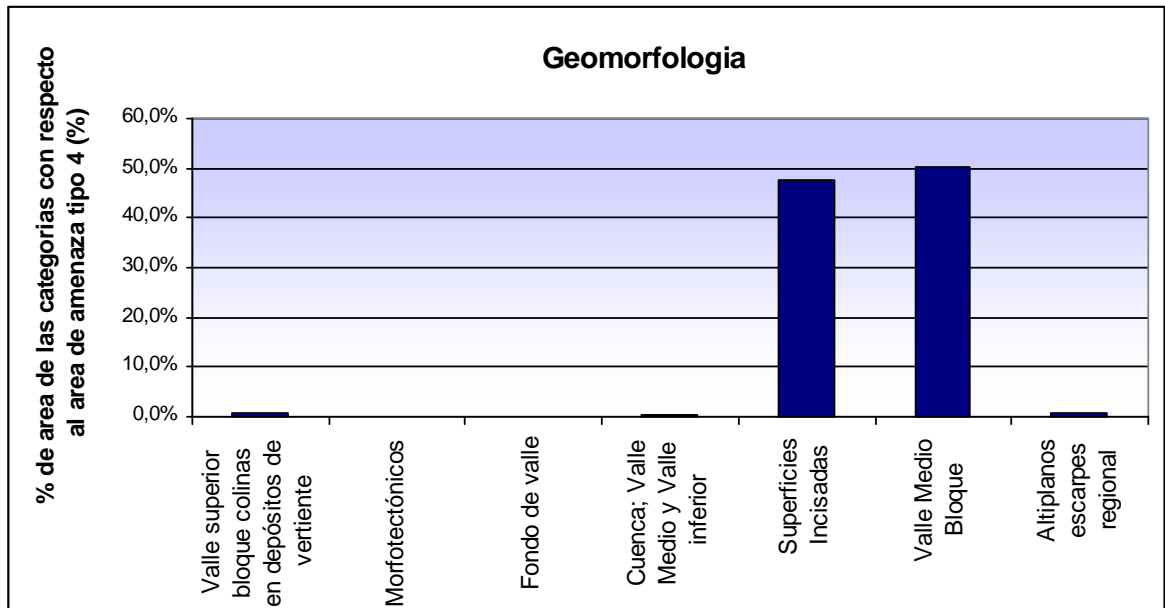


Figura 50. Histograma geomorfología - amenaza tipo 4

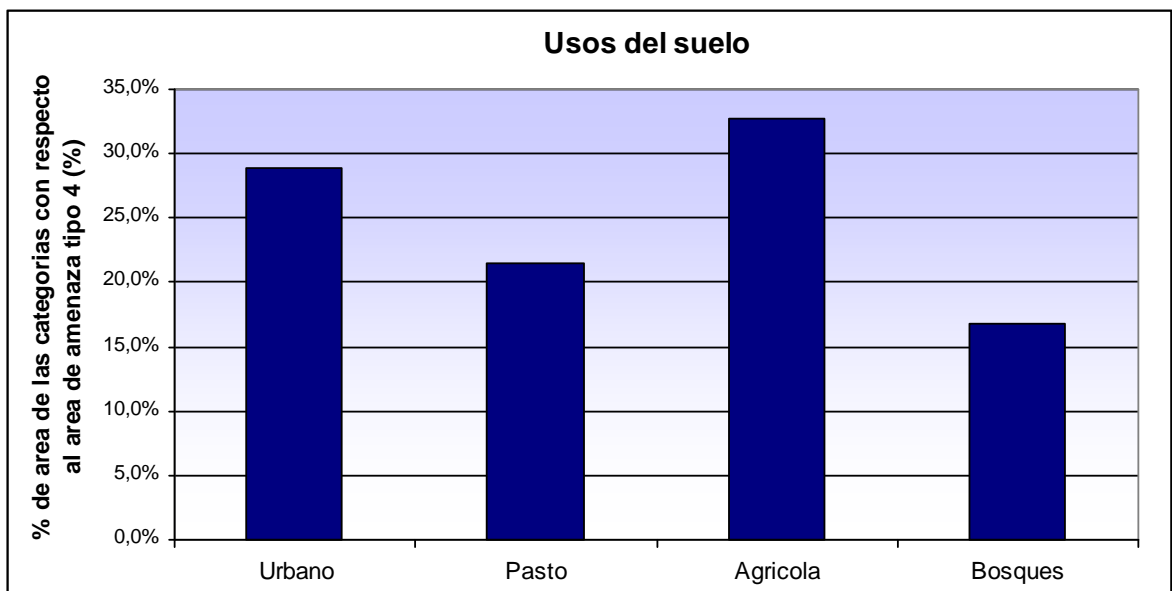


Figura 51. Histograma usos del suelo - amenaza tipo 4

◆ **Histogramas para las variables de la amenaza tipo 5**

De forma análoga se presentan los mismos histogramas para el caso de la amenaza a tipo 5, en las figuras 52, 53, 54, 55, 56 y 57.

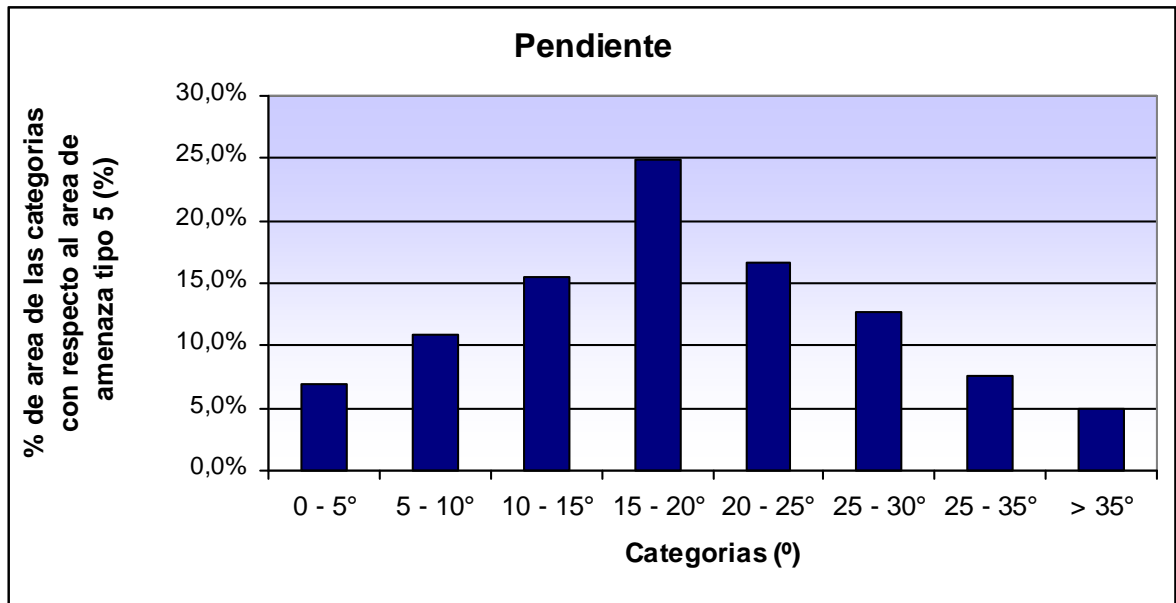


Figura 52. Histograma de pendientes - amenaza tipo 5

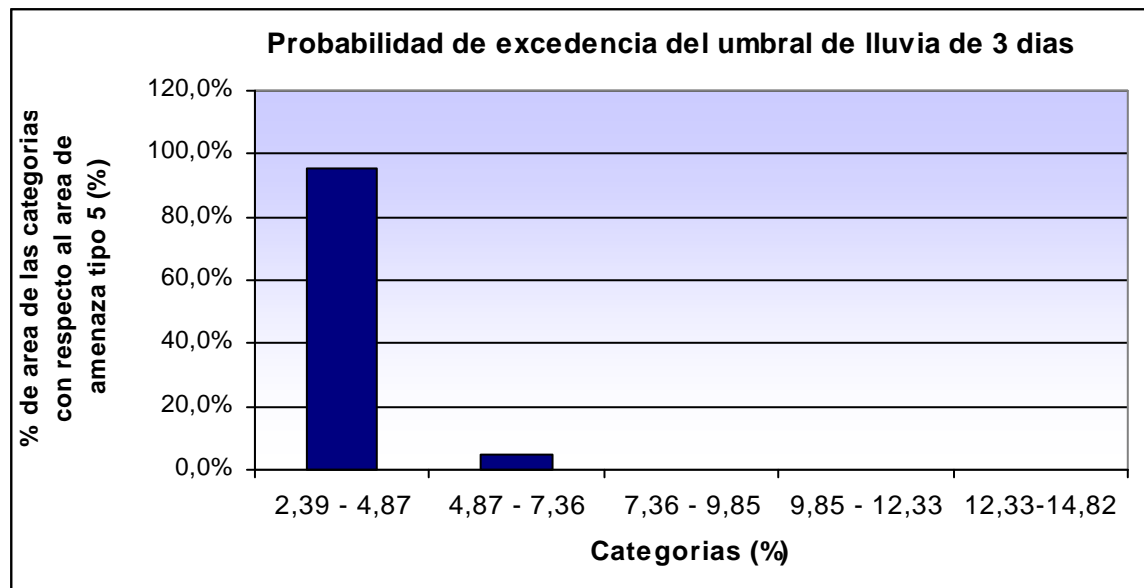


Figura 53. Histograma probabilidad de excedencia del umbral 3 días - amenaza tipo 5

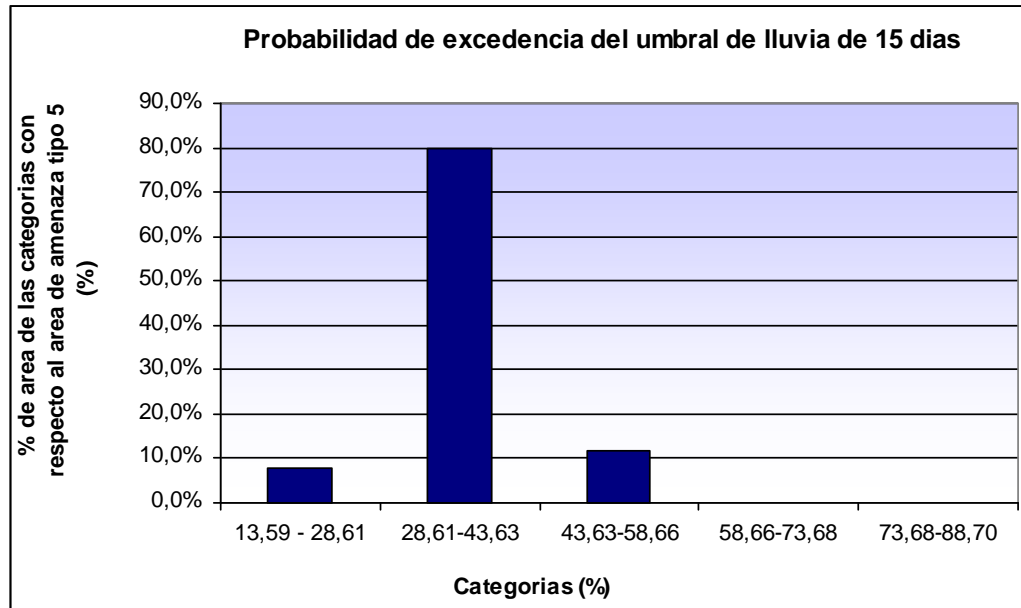


Figura 54. Histograma probabilidad de excedencia del umbral 15 días - amenaza tipo 5

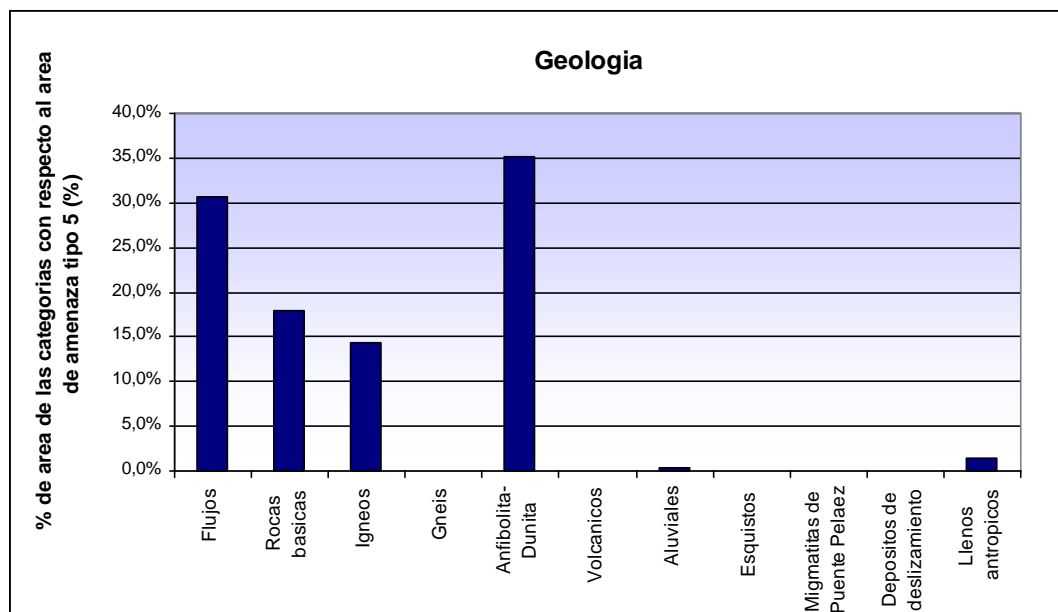


Figura 55. Geología- amenaza tipo 5

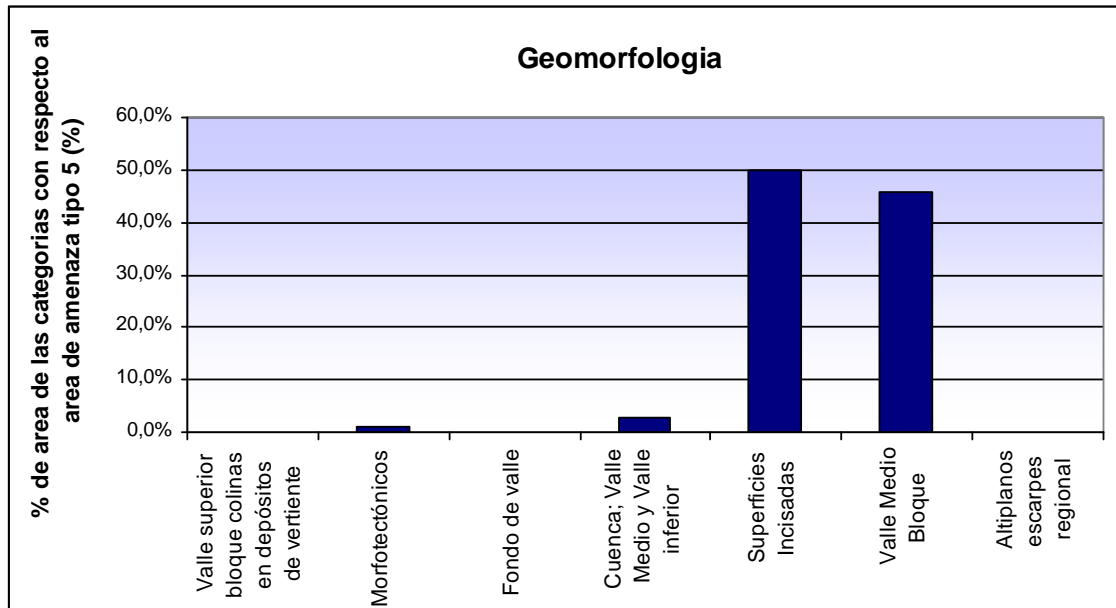


Figura 56. Geomorfología- amenaza tipo 5

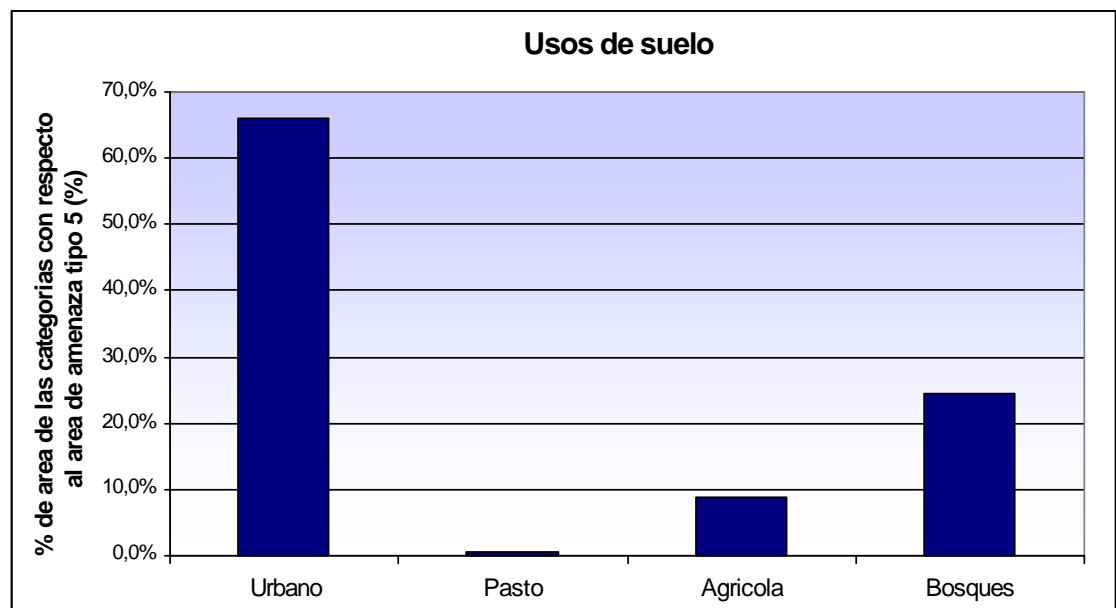


Figura 57. Usos del suelo- amenaza tipo 5

8.4 ANALISIS DE LOS ESTADISTICOS

Para empezar se forman tablas comparativas que muestren para cada tipo de amenaza las unidades de las variables que presentan una mayor influencia en la misma.

Tabla 16. Comparación entre pendientes según la amenaza

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
Variabes	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Pendientes(°)	0 - 5			
	5,-10		14,6%	
	10,-15		18,3%	15,6%
	15 - 20		18,8%	24,8%
	20 - 25	15,6%	14,2%	16,6%
	25 - 30	16,4%		
	25 - 35	12,6%		
	> 35	19,8%		

En la Tabla 17 se observa que para la amenaza tipo 3 predominan las pendientes entre 20° y mayores que 35°, para la amenaza tipo 4 predominan las pendientes entre 5-25°, y para la amenaza tipo 5 predominan las pendientes que esta entre 10 -25°, además se observa un intervalo común de pendiente para los tres tipos de amenaza el cual corresponde a 20-25°.

Tabla 17. Comparación entre la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia a 3 días, según la amenaza.

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
Variabes	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 3 días (%)	2,3 - 4,8	42,2%	83,4%	95,4%
	4,8 - 7,3	47,0%	16,2%	
	7,3 - 9,8			
	9,8 - 12,3			
	12,3-14,8			

En la Tabla 18 se observa para la amenaza tipo 3, que la mayoría de su área está compuesta por la probabilidad de excedencia del umbral que va de 2,3 hasta 7,3%; para el caso de la amenaza tipo 4 predomina en forma significativa la probabilidad de 2,3 -4,8% y en menor medida de 4,8-7,3% y para la amenaza tipo 5 predomina la probabilidad de 2,3-4,8%. Como factor común para todos los tipos de amenaza se observa que

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

predominan los valores más bajos de la probabilidad de excedencia del umbral para lluvia de tres días.

Tabla 18. Comparación entre la probabilidad de excedencia del umbral de lluvia a 15 días, según la amenaza

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
Variables	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Probabilidad de excedencia del umbral de lluvia de 15 días (%)	13,5 - 28,6			
	28,6-43,6		31,9%	80,0%
	43,6-58,6	62,8%	65,1%	
	58,6-73,6	30,3%		
	73,6-88,7			

En la Tabla 19 se observa para la amenaza tipo 3 que predomina la probabilidad entre 43,6-73,6%, para la amenaza tipo 4 predomina el intervalo de probabilidad de 28,6 -58,6% y para la amenaza tipo 5 predomina la probabilidad entre un 28,6-43,6%. Se observa que a medida que se incrementa el nivel de amenaza el disminuye la probabilidad de excedencia del umbral.

Tabla 19. Comparación entre la geología, según la amenaza

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
Variables	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Geología	Flujos		43,7%	30,7%
	Rocas básicas			17,9%
	Ígneos	43,6%	25,9%	
	Gneis			
	Anfibolita- Dunita		18,5%	35,2%
	Volcanicos	15,0%		
	Aluviales			
	Esquistos	12,8%		
	Migmatitas de Puente Peláez			
	Depósitos de deslizamiento			
	Llenos antrópicos			

Teniendo como base la Tabla 20, se observa para la amenaza tipo 3 que predominan las unidades geológicas del tipo ígneo, volcánico y esquistos; para la amenaza tipo 4 predominan las unidades geológicas del tipo flujos, ígneos y las anfibolitas -dunitas; para la amenaza tipo 5 predominan los flujos las rocas básicas y las anfibolitas - dunitas. Se observa que en la amenaza tipo 4 y 5 predominan los flujos, la cual es una unidad geológica que es predisponente para la ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 20. Comparación entre la geomorfología, según la amenaza

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
VARIABLES	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Geomorfología	Valle superior bloque colinas en depósitos de vertiente			
	Morfotectónicos			
	Fondo de valle			
	Cuenca; Valle Medio y Valle inferior			
	Superficies Incisadas	11,4%	47,6%	50,0%
	Valle Medio Bloque	76,2%	50,4%	45,9%
	Altiplanos escarpes regional			

En la Tabla 21 se observa que para todos los tipos de amenaza la mayoría de su área está compuesta por la unidad geomorfológica del tipo superficies incisadas y valle medio, sin embargo a medida que se incrementa el nivel de amenaza se incrementa el área por superficies incisadas.

Tabla 21. Comparación entre los usos del suelo, según la amenaza

Área amz 3,4,5 respectivamente(km ²)		17,84	18,39	12,85
VARIABLES	Categorías	% del área de la amenaza 3	% del área de la amenaza 4	% del área de la amenaza 5
Usos del suelo	Urbano		28,9%	66,1%
	Pasto	22,6%	21,4%	
	Agrícola	60,7%	32,8%	
	Bosques			24,6%

En la Tabla 22 se observa para la amenaza tipo 3 predomina el uso del suelo agrícola y en una menor proporción el uso para pastoreo, en la amenaza tipo 4 predominan los usos agrícolas, urbano y de pasto; para la amenaza tipo 5 predomina el uso de suelo tipo urbano y en menor medida el uso para bosques.

8.5 CONCLUSIONES DEL EJERCICIO

Por medio de este ejercicio se pudo hacer una descripción de las variables que se encuentran sobre los polígonos de amenaza tipo 3, 4 y 5 para todo el Valle de Aburrá, y

se conoce para cada variable las unidades que tienen un mayor peso en dichos polígonos.

Se observa que la lluvia acumulada a 3 días no tiene mucha influencia sobre los diferentes tipos de amenaza, ya que se presentan en general probabilidades de excedencia del umbral muy bajas.

Para la amenaza tipo 3 por movimientos en masa lo más destacable que se encontró es que las pendientes tienden a ser de gran magnitud, que la lluvia acumulada a 15 días tiene gran influencia, que el tipo de unidad geológica que predomina son los ígneos (cuyo material residual tiende a ser arenoso cuando la meteorización química no es muy intensa, lo cual puede generar inestabilidad) y el uso del suelo predominante es agrícola, por lo que se puede inferir que la amenaza también puede ser detonada por factores antrópicos debido a prácticas agrícolas.

Para la amenaza tipo 4 se encuentra que predomina un amplio rango de pendientes, que la probabilidad de excedencia del umbral de la lluvia acumulada a 15 días presenta valores significativos, que la unidad geológica que predominan son los flujos superficiales, en cuanto a la geomorfología se presenta de manera significativa las superficies incisadas y se observa una igual participación de los usos de suelo urbanos, agrícolas y de pasto, por lo que se puede decir que sumado a lo anterior, este tipo de amenaza se detona en parte por factores antrópicos debido probablemente a los malos hábitos constructivos y a prácticas agrícolas.

Para la amenaza tipo 5 se observa que predomina un rango de pendiente de mediana magnitud, que la lluvia acumulada a 3 y 15 días tiene muy poca influencia sobre los eventos de movimientos en masa, ya que ambas presentan en su mayoría valores muy bajos de probabilidad de excedencia; se observa que predominan las unidades geológicas de dunitas-anfibolitas y los flujos superficiales, en la geomorfología se observa que las superficies incisadas tienen una influencia significativa y por parte del uso del suelo se observa que el uso urbano predomina significativamente por encima de los otros usos. Por lo anterior se puede concluir que esta amenaza es detonada de forma significativa por procesos antrópicos, ya que las probabilidades de exceder el umbral de lluvias para esta región es poca, más bien la acción en conjunto de unidades geológicas, geomorfológicas, pendientes desfavorables y malos hábitos constructivos, generan los movimientos en masa.

8.6 RESTRICCIONES

A continuación se presentan, las restricciones según el tipo de amenaza, (Tabla 23), las cuales fueron definidas en función de la probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa para el Valle de Aburrá y en base a las características generales de cada tipo de amenaza. En la última columna de dicha tabla se presentan los requerimientos mínimos de estudios geotécnicos a realizar, los cuales deberán atender adicionalmente las siguientes recomendaciones.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- Para cortes en roca, no se admitirán bloques rocosos que salgan exageradamente del plano de diseño de la cara del talud o que, debido a su disposición, puedan representar una amenaza por caída o desplome.
- Después de su ejecución, los taludes deberán tener la geometría presentada en los diseños. Cualquier tipo de alteración de esta geometría deberá ser aprobada por la interventoría de la obra previa justificación técnica de la misma por parte del responsable.
- Todos los cortes indicados en el proyecto, además de aquellos en los que la interventoría pueda observar señales de inestabilidad, serán revisados en sus diseños detalladamente y las obras nuevas de estabilización serán ejecutadas de inmediato.
- Las obras de protección contra la erosión, así como las obras de control de aguas de escorrentía y subsuperficiales serán ejecutadas inmediatamente después de la construcción de los cortes.
- Toda construcción nueva deberá garantizar la estabilidad del terreno de la obra y de la ladera a su alrededor aun estando por fuera de los límites de la obra.
- Los propietarios de los terrenos están obligados a garantizar las condiciones de estabilidad de los mismos por medio de obras o medidas preventivas contra erosión, deslizamiento y generación de escombros o residuos en vaguadas, quebradas, canales u obras de drenaje. Así mismo, están obligados a realizar el mantenimiento y la restauración periódica de dichas obras.
- Los propietarios que causen inestabilidad en predios vecinos por alteraciones en las condiciones topográficas de sus terrenos, son responsables por las obras de contención o estabilización necesarias, así como por los estudios requeridos para las mismas y por los daños causados.

Todos los estudios de suelos deberán constar como mínimo, además de las exigencias anteriores y de las especificaciones de ley, de los siguientes puntos:

1. Memorias de cálculo.
2. Planta de localización de las obras sobre levantamiento alti-planimétrico con curvas de nivel cada metro, incluyendo la futura edificación con sus niveles de desplante, niveles de los terrenos adyacentes y los límites de las construcciones existentes.
3. Plano de ejecución de la excavación general inicial incluyendo la inclinación de los taludes provisionales.

4. Cortes transversales y longitudinales en escala vertical y horizontal adecuadas e iguales, indicando los perfiles existentes y de diseño, las obras de contención y edificaciones del proyecto, así como las obras localizadas en terrenos adyacentes.
5. Detalles de las fases de ejecución de las obras, principalmente cuando la implantación de las mismas represente algún tipo de amenaza para los terrenos vecinos.
6. Especificaciones técnicas y fases de ejecución de llenos.
7. Cuando sea necesaria la remoción, excavación o desmonte de material rocoso de cualquier naturaleza, será necesario un informe geológico concluyente en relación a las condiciones locales de estabilidad y a los posibles efectos producidos por el alivio de tensiones en el macizo rocoso o por la actividad de excavación.
8. En el caso de laderas con condiciones geológicas desfavorables o con niveles de amenaza 4 o 5 por movimientos en masa, será indispensable un informe geológico específico y concluyente sobre las condiciones locales de estabilidad incluyendo la definición de las medidas y obras necesarias.
9. Para cualquier tipo de estructura de contención de más de 4.0 m de altura es indispensable presentar los diagramas de presiones de suelo y empujes totales los cuales deberán ser considerados en el proyecto estructural para el dimensionamiento de la estructura. Se hace indispensable presentar además las fases de ejecución.
10. Para el caso particular de proyectos que tengan prevista la ejecución de drenajes o cualquier tipo de anclaje que pasen a terrenos vecinos será necesaria la autorización de los propietarios de los mismos. En caso de ejecución de anclajes de cualquier tipo por debajo de terrenos públicos será necesaria una carta de responsabilidad con la municipalidad que incluya la obligación, por parte del contratista o dueño de la obra, de salvaguardar la integridad de las instalaciones públicas enterradas como: red de aguas lluvias, acueducto, alcantarillado, red de gas, redes de telefonía o transmisión de datos, redes eléctricas etc. En cualquier caso, la profundidad mínima de los anclajes será de 2.0 m en relación al nivel del terreno.
 - Para taludes de más de 4 m de altura se deberá incluir un análisis de confiabilidad (opcional en zonas A1, A2 y A3; obligatorio en A4 y A5) que permita cuantificar la probabilidad de falla del talud. Este análisis de confiabilidad deberá contener como mínimo lo siguiente: Identificación de las variables que controlan la estabilidad del talud y evaluación cuantitativa de la importancia relativa de las incertidumbres asociadas a cada una de las variables identificadas. Casi todas las variables involucradas en los análisis geotécnicos de estabilidad de taludes y laderas son del tipo aleatorio, es decir, pueden adoptar cualquier valor dentro de un número grande de posibles valores, no obstante, algunas de ellas presentan menos incertidumbre que otras. Con una apropiada evaluación de esta incertidumbre, el

ingeniero puede, con el uso de la teoría de la probabilidad, evaluar el nivel de incertidumbre de las variables involucradas.

- Identificación de la función de probabilidad asociada a cada una de las variables que controlan la estabilidad del talud.
- Estimación, para cada una de las distribuciones asociadas a las variables identificadas, de la media o valor esperado, la varianza y el coeficiente de variación. Este último es especialmente útil para medir el nivel de incertidumbre de la variable. Típicamente un valor bajo del coeficiente de variación, del orden de 0.05 o menor, indica un nivel bajo de incertidumbre, en contraste, valores del orden de 0.5 o mayores indican incertidumbres grandes.
- Análisis probabilístico del factor de seguridad (FS) del talud indicando el valor esperado o medio del FS y una medida de su variabilidad, la cual puede estar dada por la desviación estándar o la varianza. Se debe mostrar la función de densidad de probabilidad (FDP) del FS y la probabilidad de ruptura medida como el área por debajo de la curva de la FDP a la izquierda del valor FS=1.
- Para el análisis probabilístico del FS se podrá usar cualquiera de los tres métodos siguientes: (a) Método de Taylor, también conocido como el método del Primero Orden Segundo Momento o con su sigla en inglés FOSM (First Order Second Moment), (b) Método de las estimativas puntuales, también conocido como el método de Rosenblueth, (c) Método de Montecarlo.
- Para cualquier caso, se deberá calcular el índice de confiabilidad de acuerdo a la ecuación 7, la cual, si bien es cierto que se considera rigurosamente válida sólo cuando el FS tiene una distribución normal, puede ser usada con buena aproximación para otras distribuciones de probabilidad cuando $\beta < 2.5$. En la Ecuación 7 \overline{FS} es el valor medio del factor de seguridad y σ_{FS} es la desviación estándar del factor de seguridad.

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad \text{Ec (7)}$$

- La probabilidad de ruptura máxima aceptable es de 2% o un índice de confiabilidad de 2.0. El cumplimiento de cualquiera de estos dos valores puede considerarse como límite para un desempeño satisfactorio de taludes y laderas.
- Los valores de probabilidad de ruptura e índice de confiabilidad mencionados anteriormente no consideran aquellos casos en los cuales las estructuras requeridas no puedan soportar deformaciones excesivas o fisuramiento. En estos casos el diseñador deberá adoptar criterios de diseño más rigurosos.
- La ejecución de análisis probabilísticas de estabilidad de talud es y laderas no sustituye los análisis determinísticos en los cuales se obtiene el factor de seguridad. Los dos análisis deben realizarse y sus resultados usados

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

conjuntamente para proporcionar un mejor entendimiento del proyecto. Por ejemplo, casos en los cuales las probabilidades de ruptura sean bajas, pueden aceptarse factores de seguridad relativamente bajos.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 22. Restricciones según tipo de amenaza

Amenaza	Prob. Ocurrencia de movimiento en masa anual (%)	Características generales	Tipo de detonación	Tipo de ocupación que se permite	Estudios a ejecutar
1	0-0,2	Presenta significativa influencia de la lluvia a 15 días, sin embargo en general las pendientes son medias, se presentan muy poca cantidad de procesos asociados a este tipo de amenaza	Principalmente debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada a 15 días y las pendientes	Cualquier tipo de estructura pública o privada	mínimamente la NSR-98
2	0,2-3,2	Presentan significativa influencia de la lluvia a 15 días; en general las pendientes son medias, e igualmente como en el caso de la amenaza tipo 1 se presentan muy poca cantidad de procesos asociados a este tipo de amenaza	Principalmente debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada a 15 días y las pendientes	Cualquier tipo de estructura pública o privada	NSR-98, y a criterio del diseñador ejecutar o no, estudios de estabilidad de laderas y taludes
3	3,2 – 5,5	Se caracteriza por presentar pendientes altas y gran influencia de la lluvia acumulada a 15 días, y un gran uso agrícola	Principalmente debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada a 15 días y las pendientes, y en menor medida factores antrópicos como practicas agrícolas	Cualquier tipo de estructura pública o privada	NSR-98, estudios de estabilidad de laderas y taludes, y de manera opcional, según criterio del diseñador, ejecutar o no estudio para determinar la probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa
4	5,5- 8,5	Significativa influencia de la lluvia acumulada a 15 días, con pendientes medias y con características geológicas y geomorfológicas desfavorables. Presenta un	Principalmente por la acción en conjunto de lluvia acumulada a 15 días, y por una geología y geomorfología desfavorables y en menor medida por factores	Cualquier tipo de estructura pública o privada	NSR-98, estudios de estabilidad de laderas y taludes, y estudio para determinar la probabilidad de

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Amenaza	Prob. Ocurrencia de movimiento en masa anual (%)	Características generales	Tipo de detonación	Tipo de ocupación que se permite	Estudios a ejecutar
		uso urbano y agrícola significativo	antrópicos		ocurrencia de movimiento en masa
5	8,5-16,5	Poca influencia de la lluvia, se considera que debido al alto uso urbano que existe, los malos hábitos de construcción sumados a unidades geológicas, geomorfológicas y pendientes desfavorables, son las causales de una alta probabilidad de movimientos en masa	Principalmente antrópica unido a las condiciones desfavorables del terreno	Únicamente el estado decide sobre que proyectos se pueden ejecutar	Estudios geotécnicos de alto detalle

La anterior propuesta debe entenderse como una herramienta de planificación para las construcciones venideras, de tal forma que se deberá cumplir con unos estudios mínimos necesarios (según el nivel de amenaza), antes de iniciar una obra. Los estudios requeridos se dividen en dos: El estudio geotécnico tiene como objetivo reducir significativamente la amenaza por movimientos en masa y el estudio estructural (NSR-98) tiene como objetivo garantizar un diseño seguro de la obra en cuestión.

Se observa que en el nivel de amenaza tipo 5 será el estado quien decida que proyectos se ejecutan y además se deberán hacer estudios geotécnicos más rigurosos, por lo cual dichas zonas deberán ser observadas en más detalle a la hora de hacer una obra ; sin embargo, estos lugares no dejan de ser aprovechables, esto va en contraste con algunas creencias populares y sentencias como las del POT, que sugieren que una zona al estar en amenaza alta es irrecuperable. Por esta misma razón en el presente estudio se evitó calificar con adjetivos a los diferentes niveles de amenaza, ya que esto generalmente provoca estigmatización en las zonas que presenten los niveles más altos de amenaza.

Se observa como el factor antrópico influye a medida que aumenta el nivel de amenaza, lo cual concuerda con la realidad, ya que muchos eventos de movimientos en masa son detonados directa o indirectamente por la acción del hombre, éste en conjunto con condiciones del terreno y climatológicas desfavorables.

9. REFERENCIAS

- Alarcón G. Jorge E. (2007). Integración de información geotécnica del Valle de Aburrá a un sistema de información geográfica SIG. Universidad Nacional sede Medellín, Colombia.
- Álvarez V. Oscar D, Alarcón G. Jorge E. (2004). Evaluación de La Amenaza de Deslizamiento Superficial Empleando Sistemas De Información Geográfica SIG. Universidad Nacional sede Medellín, Colombia.
- AMVA, 1999. Instrumentación y Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá. Universidad Nacional de Colombia, EAFIT, INGEOMINAS, Integral S.A.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA, CORNARE y Universidad Nacional de Colombia. (2007a). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (POMCA) Aspectos Principales.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia (2007b). Base de datos de estaciones de monitoreo de lluvia. Red río fase II.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2007c). Micro -zonificación sísmica en el Valle de Aburrá y definición del riesgo a deslizamientos e inundaciones. Medellín.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006. Revisión técnica del plan de ordenamiento territorial del Valle de Aburrá.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2008. Base de datos "Desinventar". Red Riesgos. Base de eventos recopilados desde abril de 1880 hasta Noviembre de 2007.
- Chica-Olmo, M., 1987, Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España.
- Cuador, J. Q. (2003). Elementos de Geoestadística. Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- Cuador, J. Q. (2001). Simulación condicional de variables regionalizadas y su aplicación al comportamiento de la porosidad efectiva en un yacimiento fracturado -poroso. Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- FAO, 2007. Irrigation and drainage paper. Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems

FRANCK OLIVIER A, B,* , JEAN-PIERRE GOURC, 2006. Hydro-mechanical behavior of municipal solid waste subject to leachate recirculation in a large -scale compression reactor cell

García, H. (2004). Evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de masa usando sistemas de información geográfica y redes neuronales artificiales. Disertación de Maestría, Universidad de Brasilia, Brasilia. (En Portugués).

Haykin S. (1999) Redes Neurais, Principios e Prática. Prentice Hall, Inc., Porto Alegre, RS, 899p.

Journel, A. G. y Huijbregts, C. J., 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 600 p.

Kasabov N. K. (1996). Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. Bradford Book – Massachusetts Institute of Technology , Londres, Inglaterra, 550p.

KESSLER, J., OOSTERBAAN, R. J., (1971) Holanda. Determinación de la conductividad hidráulica de los suelos. Principios y aplicaciones del drenaje, estudios e investigaciones Vol. 3. Págs. 275-320. International institute for land reclamation and improvement, wageningen.

Lee S., Ryu J., Won J. E Park H.. (2004). Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. Engineering Geology, 71: 289-302.

Martín D, Viera. (2002). Geoestadística Aplicada. Instituto de geofísica, UNAM. Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, cuba.

Martínez H. E. (2006). Modelamiento constitutivo de arenas usando redes neuronales artificiales. Tesis de Doctorado, Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil. (En Portugués).

Montoya J. D., Vélez M. V., Moreno H., Rhenals R. L., Polanco C. (2002). La lluvia y su influencia sobre los deslizamientos en el departamento de Antioquia, Colombia . XV Seminario De Hidráulica E Hidrología.

PIZARRO CABELLO, F. 1978. Madrid España. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Págs. 47-61

SALGUIERO ENRIQUEZ, J. L; ALVAREZ, P. 1986 Cuba. La conductividad hidráulica de algunos de los principales suelos agrícolas cubanos y su relación con el drenaje. Págs. 1-16.

The MathWorks, Inc (2002).Neural network toolbox for use with Matlab: user's guide, version 4.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

VAN HOORN, J.W. 1979. Determining hydraulic conductivity with the inversed auger hole and infiltrometer methods. In J. Wesseling, ed. Proceedings of the International Drainage Workshop, pp. 150–154. ILRI Publication 25. Wageningen, The Netherlands, ILRI.

Varnes D. J. (1984). Landslide Hazard zonation: a Review of Principles and Practice. - Unesco, Paris, France.



Libro II CAPITULO II

ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN EL VALLE DE ABURRÁ.

TABLA DE CONTENIDO

1. AMENAZAS ASOCIADAS A INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES. VALLE DEL ABURRÁ	1
1.1 AMENAZA POR INUNDACIONES LENTAS	3
1.2 AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES RÁPIDAS	5
1.2.1 Características de los flujos torrenciales	6
1.2.2 Causas que inician un flujo torrencial	7
1.2.3 Características de las cuencas torrenciales	8
1.2.4 Avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá	9
1.3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES	11
1.3.1 Metodología utilizada	17
1.3.2 Análisis de la información sobre inundaciones y avenidas torrenciales de los POT de los municipios del Valle de Aburrá	19
1.3.3 Análisis de los eventos reportados en DESINVENTAR	22
1.3.4 Fotointerpretación	27
1.3.5 Trabajo De Campo	32
1.3.6 Propuesta metodológica: análisis con lógica difusa SIG ArcGis 9.2 para determinar zonas susceptibles a inundaciones Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	32
1.4 RESULTADOS	45
1.4.1 Análisis general de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en el valle de aburrá	45
1.4.2 Análisis de la Amenaza por Inundación Lenta en el Valle de Aburra	46
1.4.3 Análisis de la Amenaza por Avenidas Torrenciales e Inundaciones Rápidas en el Valle de Aburra	49
1.4.4 Validación de Resultados	51
1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	51
2. CONCLUSIONES	52

3. RECOMENDACIONES PARA GESTIÓN 54

4. BIBLIOGRAFIA 55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama según tipo de eventos principales ocurridos entre 1880 y 2007 en el Valle de Aburrá según la base de datos DesInventar (AMVA, 2008) **10**

Figura 2. Manchas de inundación para periodos de retorno de 100 años calculadas con modelamiento hidráulico, software HEC RAS. a) Quebrada Altavista, calculadas por Montoya y Patiño (2001); b) Quebrada Altavista calculadas en el PIOM (2006); c) Quebrada La Quintana, calculadas por Montoya y Patiño (2001); d) Quebrada La Quintana calculadas en el PIOM de la misma quebrada, A.G.S (2006) **12**

Figura 3. Esquema de perfil longitudinal con zonas de ocurrencia. **14**

Figura 4. Esquema de la metodología aplicada para la determinación de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales **19**

Figura 5. Distribución de las Inundaciones reportadas en la Base de datos Desinventar para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008) **23**

Figura 6. Distribución de las Avenidas Torrenciales reportadas en la Base de datos Desinventar para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008) **24**

Figura 7 Distribución de las causas reportadas para las Inundaciones en el Valle de Aburrá (AMVA, 2008). **25**

Figura 8 Distribución de las causas reportadas para las avenidas torrenciales del Valle de Aburrá (AMVA, 2008). **26**

Figura 9. Fajas y líneas de vuelo del Área Metropolitana del valle de aburrá utilizadas para la fotointerpretación. **29**

Figura 10 Modelo de elevación digital Área Metropolitana del Valle de Aburrá. **34**

Figura 11 Mapa de Pendientes del Valle de Aburrá e histograma de pendientes **35**

Figura 12 Ejemplo de dirección de flujo, si la dirección del flujo de la celda central en cuestión es hacia la esquina superior izquierda, entonces en la matriz resultante dicha celda tendrá un valor de 32. **36**

Figura 13 Conjuntos difusos para ángulo de la pendiente **37**

Figura 14 Mapa difuso de pendientes, entre más oscuro más susceptible a inundación	39
Figura 15 Histograma que representa los diferentes valores obtenidos en Arcgis para el cálculo de la curvatura.....	40
Figura 16 Representación del conjunto difuso para la curvatura.	40
Figura 17 Mapa difuso curvatura (concavidad o forma de la pendiente). Mientras más oscuro mayor susceptibilidad a la inundación.	41
Figura 18 Zonas de acumulación de flujos de agua obtenidas mediante lógica difusa para la acumulación de aguas correspondientes a un sector del Área Metropolitana.	42
Figura 19 Mapa difuso para Formaciones Superficiales	43
Figura 20 Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones; mientras más oscuro más susceptible a inundaciones. En el recuadro se observa un detalle mayor en el Corregimiento de San Antonio de Prado	44
Figura 21. Mapa de Amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales del Área Metropolitana del valle de Aburrá.	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eventos reportados en la Base de datos Desinventar, para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008).	23
Tabla 2. Causas de los eventos de inundaciones reportados en Desinventar (adaptadas de AMVA, 2008).	25
Tabla 3. Niveles de riesgo por inundación de las principales quebradas del Valle de Aburrá según el POMCA (AMVA et al., 2007)	26
Tabla 4. Fajas con la secuencia de fotografías para del Valle de Aburrá.	30
Tabla 5. Descripción de los mapas temáticos utilizados con sus parámetros de condición para el modelo.	38

1. AMENAZAS ASOCIADAS A INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES. VALLE DEL ABURRÁ

La riqueza hídrica del área metropolitana del Valle de Aburrá es notable y como consecuencia de esto, sirviéndose de la accesibilidad a este recurso que representan las vegas de las microcuencas o del mismo río Medellín, las comunidades construyeron sus primeros asentamientos en las laderas o a lo largo de las llanuras de inundación bastante planas y de buenas características en cuanto a los suelos; además la planificación de ese momento fue bastante fácil; incluso el modelo de cuadrícula implementado en la zona urbana fue heredada de las ciudades Españolas.

Dadas las características físicas de este valle, el espacio ofrecido fue rápidamente urbanizado y por lo tanto se agotaron las zonas donde el modelo antiguo de enmallado urbano podía ser usado, esto sumado a otras causas hicieron que las gentes buscaran otros sitios para construir dentro de las vertientes del valle y así acceder fácilmente a una ciudad en constante desarrollo.

Con lo anterior, se generaron dos escenarios. El primero, quizás en el que el modelo de enmallado aún es aplicable, se trata de la ocupación de las laderas con pendientes suaves a moderadas contiguas a los depósitos aluviales que constituyen el fondo del valle. En general la llanura de inundación, con un mejor desarrollo dentro de los municipios del Valle Medio del Aburrá, tiene una pendiente suave con algunas zonas cóncavas las cuales permiten la acumulación; a medida que nos alejamos de la base, éstas se hacen cada vez más inclinadas, en la margen transicional algunas veces, sobre grandes depósitos (flujos de escombros) o, sobre roca o saprolito, esta cambia bruscamente.

Al igual que en el caso inicial, donde las amplias vegas, llanuras de inundación y laderas con pendientes suaves, fueron ocupadas totalmente, el segundo escenario, muy común en la actualidad, se presenta donde gran parte del desarrollo urbano, haya sido este planeado o no y bien sea por limitaciones económicas o por desconocimiento de las dinámicas físicas (Flórez y Sauvita, 1997), se da a lo largo y paralelamente a las corrientes sobre los estrechos valles de las microcuencas o de sus quebradas afluentes. En el Valle de Aburrá, esta modalidad de desarrollo urbano se encuentra en una de sus últimas fases, en cuanto a disponibilidad de espacio para la construcción adecuada de cualquier tipo de infraestructura.

El desarrollo urbano paralelo a las quebradas generó un creciente interés en las características y dinámicas de las principales corrientes del Valle de Aburrá, lo cual impulsó la necesidad de formular planes de ordenamiento para las microcuencas afluentes del río Medellín o para los afluentes de quebradas de orden superior que drenan

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

las laderas del valle (conocidos anteriormente como POMI y actualmente denominados PIOM, o Plan Integral de Ordenamiento de Microcuencas).

Los Planes Integrales de Ordenamiento de las Microcuencas muestran cuanto ha crecido el interés de los entes encargados acerca de la planificación territorial en aquellas zonas urbanas, las que se han ido extendiendo como nuevos brazos desde los grandes centros urbanos hacia las periferias a través de las quebradas. Estos estudios también se muestran como una importante herramienta para entender los fenómenos e interacciones entre la sociedad y el medio que allí se generen.

Como es de suponer, un gran número de familias desarrollan sus actividades cotidianas en estas zonas, mientras en su patio trasero se escucha el correr de la quebrada, la cual además presenta problemas de contaminación o deficiencias en cuanto a obras hidráulicas. Este es un panorama que aunque típico, es desconsolante; ver como numerosas personas se ven obligadas a poner en peligro sus vidas construyendo su casa o vías de comunicación dentro de la zona que topográficamente corresponde al cauce de la corriente, es decir dentro de su zona de influencia de las corrientes de agua.

Aunque el agua es un recurso sin el cual no podríamos vivir, este también puede llegar a constituir una amenaza, si no se comprenden las características que definen su comportamiento.

Las corrientes tienen un funcionamiento normal dentro de unos rangos promedios tanto de flujo, sedimentos en movimiento y temperatura, entre otras variables que en conjunto con el ecosistema que le rodea constituyen un "equilibrio dinámico". Cuando estas variables van más allá de sus rangos normales, este equilibrio puede perderse y el resultado de los ajustes necesarios de todo el ecosistema puede acarrear un conflicto focalizado en las zonas de influencia del fenómeno, con un fuerte impacto sobre las actividades económicas y sociales cotidianas, desarrolladas en las zonas de influencia de éste.

Actualmente las quebradas son consideradas más como un problema higiénico que como un recurso urbano y paisajístico, por lo que las acciones que se acometen sobre ellas apuntan más a su cubrimiento para conformar urbanizaciones y barrios, mas que a su conservación en estado natural (Vásquez, 1994).

1.1 AMENAZA POR INUNDACIONES LENTAS

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (Flórez y Suavita, 1997; INETER y COSUDE, 2005)

Las zonas inundables pueden permanecer varios años sin sufrir este fenómeno ya que dependen de los periodos de recurrencia de las crecientes máximas. El resultado de las inundaciones implica en muchos casos pérdidas de vidas humanas y daños en infraestructura según la magnitud e intensidad del evento.

Las condiciones topográficas, la dominancia de materiales finos (características litológicas que induzcan baja permeabilidad en las capas infrayacentes) y un nivel freático alto conforman las características propias de un área inundable (Flórez y Suavita, 1997).

La velocidad del flujo determina tanto su impacto directo como el poder erosivo de la corriente, lo cual genera que a mayores velocidades mayor posibilidad de daño. De ahí que las zonas de inundación se dividan en lentas y rápidas, según la posible velocidad del flujo en caso de una creciente.

A pesar que las inundaciones son fenómenos propios de la dinámica natural de toda corriente, hay varios factores antrópicos que generan en muchos casos un aumento desproporcionado en la demanda del recurso agua y una presión física extrema sobre el sistema hídrico lo cual incide en el aumento de la amenaza por inundación. Estos factores incluyen:

- Manipulación antrópica de las corrientes para numerosas actividades como: riego, transporte, hidroeléctricas, depositación de desechos, minería, recreación, etc.
- Urbanización informal y formal (legalizadas) en los retiros de las quebradas constituyendo una alta amenaza socio-natural.
- Realización de obras para recuperar zonas inundables, modificando la geometría natural de las llanuras de inundación, muchas veces de forma negativa, y por lo tanto, afectando el equilibrio dinámico de las corrientes.

Para definir la amenaza por inundación en una cuenca determinada, es necesario considerar varios factores dentro de los que se destacan la pendiente, la geología, la geomorfología, intervenciones antrópicas, uso del suelo y la zona de ocurrencia del evento, la cual puede ser zona de montaña o de cabeceras, zona de transición (que incluye el cono o abanico aluvial) y la planicie o llanura aluvial (Instituto Mi Río, CORANTIOQUIA, Universidad Nacional, 2003a; González y Hermelin, 2004). Además de los anteriores factores también se pueden tomar en cuenta factores propios del posible evento como la magnitud, la velocidad y la profundidad del flujo.

La zona de montaña en el Valle de Aburrá se distingue por presentar altas pendientes del orden de 5 al 80% y corrientes usualmente muy encajonadas lo cual ocasiona que las condiciones socio - naturales de amenaza por inundación lenta no sea alta, pero que en el 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 (González y Hermelin, 2004). Esto se genera porque la pendiente disminuye hasta 1 a 10% (Rendón, 1997) 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, que se ensanchan en el centro (Flórez y Suavita, 1997).

Las zonas de transición ubicadas cerca de la desembocadura en el río Medellín de las quebradas que drenan las laderas del Valle de Aburrá, donde se presentan topografías mas 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 la llanura aluvial con pendientes menores a 1% (Rendón, 1997), donde el Valle del Aburrá presenta su mayor extensión transversal al eje del río, los abanicos aluviales cubren amplias áreas casi planas y algunas veces bajo el nivel del canal activo de l río con una tendencia natural a presentar inundaciones ya que en un pasado constituían zonas cenagosas y pantanosas de constante intercambio con la corriente principal durante temporadas lluviosas donde el río y afluentes de orden superior, presentaban frecuentes desbordamientos y rupturas de su canal principal.

Las quebradas del Valle de Aburrá presentan, además de lo anterior, puntos críticos inundables generados por condiciones geológicas (zonas de baja permeabilidad) y/o geomorfológicas (cambios en la forma de la pendiente, topografías heredadas de antiguos canales), pero principalmente por la incidencia antrópica como bloqueo del cauce por basuras y escombros, insuficiencia en las obras hidráulicas, diferentes grados de incisión y cambios en la geometría de un mismo canal en tramos muy cortos, técnicas de construcción no adecuadas, explotación y remoción de material de playa, invasión de cauces, deforestación de las márgenes (lo cual disminuye el agarre del suelo facilitando su transporte e incorporación al flujo), presencia de vías e infraestructura con obras hidráulicas insuficientes, etc.

1.2 AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES E INUNDACIONES RÁPIDAS

Las avenidas o flujos torrenciales muchas veces denominadas crecientes, avalanchas, crecidas, borrasca o torrentes, son una amenaza muy común en cuencas de alta montaña y debido a sus características pueden causar grandes daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas.

En este trabajo el término avenida torrencial enmarca un gran número de flujos torrenciales como lo son flujos de lodos y/o escombros, avalanchas, lahares, lavas, flujos hiperconcentrados o superconcentrados, lava torrencial, entre otros (Costa, 1988; Medina, 1991; Coussot y Meunier, 1996; Lavigne y Suba, 2004; Díaz-Onofre, 2008). Estos flujos presentan claras diferencias en cuanto al mecanismo de generación y comportamiento del flujo, así como a la concentración de los sedimentos y densidad del flujo, pero desafortunadamente en el Valle de Aburrá no se cuentan con estudios detallados que permitan diferenciar los eventos que se presentan.

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 represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea, 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, como lo ocurrido en la quebrada El Barro, Municipio de Bello.

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, 1996; Flórez y Suavita, 1997; Smith y Ward, 1998; Castro, 2007).

En la parte superior de las vertientes o zona de montaña, donde las corrientes están encajonadas, 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 (Integral, 1990 en Urrea, 1996).

Las avenidas torrenciales modifican la morfología del cauce; incluyendo cambios en el ancho y profundidad del canal, así como de la competencia y el transporte de los sedimentos (Durán et al., 1985), lo cual se traduce en una modificación de su comportamiento y en algunas ocasiones hasta el curso de las corrientes .

Las avenidas constituyen un fenómeno ligado a la dinámica geológica que desde un punto de vista integrado, permite la renovación del agua subterránea y de nutrientes de los suelos de las áreas inundables (Morisawa, 1985) . Según Durán et al. (1985), la crecida y el desbordamiento de un río no suponen en general, desde el punto de vista geológico, ningún acontecimiento fuera de lo normal. Lo que para el hombre constituye un hecho catastrófico, no tiene el mismo sentido dentro de la evolución del relieve, sino que la catástrofe en geología forma parte de la dinámica natural.

Se decidió trabajar las avenidas torrenciales y las inundaciones rápidas en conjunto debido a varias razones, dentro de las que se destacan: la característica de ocurrencia súbita de ambas amenazas, el alto poder destructivo de ambos fenómenos respecto a las inundaciones lentas y la poca información disponible sobre los eventos pasados cuyas descripciones se prestan a confusión respecto al tipo de fenómeno al que pertenecen.

1.2.1 Características de los flujos torrenciales

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), recorrer cauces de altas rugosidades y altas pendientes

(superior al 1%). Estos flujos presentan un problema hidráulico complejo que no puede ser resuelto adecuadamente con las ecuaciones clásicas de hidráulica fluvial (Rendón, 1997).

Una de las razones por las cuales es tan difícil definir los flujos torrenciales de manera precisa es que a lo largo del cauce del río y dependiendo de la pendiente del mismo y del material disponible, una avenida torrencial puede cambiar sus características hidráulicas e hidrológicas y por ende recibir diferentes nombres (Costa, 1988). Además, lo anterior también define el tipo de material que es depositado en las márgenes de los drenajes a medida que el flujo va pasando y cambiando su régimen (Parra, en preparación).

Cuando se presentan avenidas torrenciales las corrientes aumentan la capacidad para transportar sedimentos gruesos donde además se incorporan restos vegetales y lodo con una zona de influencia amplia de gran potencial destructivo y 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, razones que contribuyen al gran desconocimiento que hay sobre ellos, lo cual es muy delicado debido a su alto poder destructivo (Durán *et al*, 1985; Piedrahíta, 1996; Castro, 2007, Parra, en preparación).

1.2.2 Causas que inician un flujo torrencial

Para los eventos de carácter torrencial, y con base en estudios realizados en áreas donde han ocurrido fenómenos similares, se ha podido reconocer la influencia de factores geológicos y geomorfológicos descritos en el numeral 1.2.3 de este trabajo. (Parra *et al.*, 1995; Rúa & Marín, 2006; Aristizabal, 2007; Castro, 2007). Además, otros factores tales como usos del suelo, condiciones climatológicas e hidrológicas así como intervenciones de tipo hidráulico, interactúan entre sí, propiciando las condiciones que favorecen el desarrollo de tal fenómeno.

De esta manera, las causas de las avenidas torrenciales son la combinación de factores geológicos y geomorfológicos de la cuenca (forma, pendiente, masa o material disponible) con factores meteorológicos de lluvias de alta intensidad (Castro, 2007), que pueden generar un aumento de escorrentía y activar en laderas de la cuenca, movimientos en masa que caen al cauce. Todo lo anterior confluye junto con la extensión del valle para determinar la magnitud del evento y por ende su velocidad y poder destructivo.

Dentro de las principales causas generadoras de avenidas torrenciales sobresalen los eventos de precipitación de alta intensidad de carácter local. Desafortunadamente, en el

país son pocos los datos obtenidos durante avenidas torrenciales y los registros de lluvia, en las cuencas donde se han registrado los eventos, son de baja calidad o han sido registrados en estaciones demasiado alejadas de las cuencas afectadas por lo cual los datos no indican las condiciones reales en la zona del evento, ya que en su mayoría reportan la lluvia diaria, mas no la intensidad y duración de esta.

Dentro de los pocos registros de precipitaciones para avenidas torrenciales con los que se cuentan en el Valle de Aburrá, sobresale el del evento de la Quebrada La Llorona en el Municipio de La Estrella, donde Cadavid, (2001) reporta que el día del evento se registraron 62 mm en una estación a 1.5 km de la cuenca afectada. Por su parte, González y Hermelin, (2004) reportan registros de 91 mm en estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca afectada.

1.2.3 Características de las cuencas torrenciales

Las cuencas torrenciales son entonces aquellas que tienen la capacidad de generar eventos de caudales muy grandes producidos en pocas horas durante los períodos invernales. Durante estos eventos de gran caudal, flujo no uniforme y alta velocidad, la cuenca adquiere una amplia capacidad de arrastre de materiales heterogéneos de gran magnitud, los cuales provienen usualmente de movimientos en masa generados en las márgenes del cauce, que van aumentando gradualmente su poder destructivo al incrementar la cantidad y tamaño del material disponible que puede incluir árboles, sedimentos gruesos, bloques de roca, entre otros.

De esta manera, las masas removidas se convierten en flujos de suelo y roca, donde el material sólido puede constituir hasta el 80% del peso total de la mezcla, que caen pendiente abajo hasta encontrar los cauces donde unidos a otros, aumentan el caudal de la corriente y se convierten en una avenida torrencial (Rendón, 1997; Castro, 2007).

Varios autores han intentado establecer unos indicadores claros que permitan identificar cuales cuencas presentan una mayor susceptibilidad ante este tipo de amenaza socio-natural, o incluso de establecer parámetros físicos con unos rangos para los cuales exista la posibilidad o no de ocurrencia del fenómeno (Rico & Benito, 2002), pero dada la esporadicidad de estos fenómenos es muy difícil establecer unos rangos fijos y determinar cuales factores son o no los necesarios como desencadenantes, ya que estos varían para cada cuenca.

Vásquez (1993), mediante el estudio del desastre generado por una avenida torrencial del río Tapartó de 1993, define las características básicas de las cuencas torrenciales, las cuales son en su mayoría cuencas “jóvenes” o en evolución. Estas características son: 1) Cuencas relativamente pequeñas en las cuales los eventos de lluvia pueden cubrir

completamente toda al área de captación; 2) cuencas situadas en regiones montañosas fuertemente escarpadas; 3) pendientes escarpadas del lecho o canal del río principal y de sus afluentes; 4) gran capacidad del río para socavar y profundizar su propio lecho; 5) alta capacidad de transporte de rocas y materiales; 6) presencia de valles estrechos en forma de "V" con laderas muy pendientes, propio de drenajes jóvenes; y 7) gran variabilidad entre los caudales máximos y mínimos, hasta el punto de que una creciente puede presentar un caudal 100 veces mayor al caudal medio de la corriente.

Dentro de las características antes mencionadas, Riedl y Zachar (1984) destacan el tamaño de la cuenca, afirmando que estos eventos sólo se presentan en cuencas pequeñas, de entre 0,3 y 150 km², para que ésta pueda ser afectada por una sola lluvia al mismo tiempo, puesto que para áreas más grandes la probabilidad es muy baja de que sean cubiertas en su totalidad por un solo aguacero. Por su parte González y Hermelin (2004), amplían este rango hasta 300 km².

Varios autores afirman que la forma de la cuenca también es un factor importante, siendo las cuencas circulares las más propensas a presentar avenidas torrenciales (Chorley, et al., 1984; González y Hermelin, 2004). Estos mismos autores sostienen, que una red densa de drenaje o altamente desarrollada, contribuye significativamente a la reducción del tiempo de concentración favoreciendo la generación de avenidas torrenciales.

1.2.4 Avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá

El agotamiento del suelo apto para la ampliación de la zona urbana en la llanura aluvial ha conllevado a la consolidación de asentamientos informales en valles y cañones estrechos de las quebradas afluentes del río Medellín.

Además infraestructura como bocatomas, tanques de almacenamiento, viviendas, puentes, obras que cada vez suben más alto aguas arriba de las quebradas, incrementan los procesos erosivos sobre la ladera y en la misma medida las probabilidades de ocurrencia de este tipo de desastres.

Las viviendas no solo están construidas paralelamente al cauce, a algunas veces se encunetran sobre él, a modo de boxcolvert sin ninguna planeación o diseño con base a parámetros hidráulicos. A esto se le suma el problema de contaminación principalmente por residuos sólidos importantes detonantes de un desastre debido a que obstruyen el cauce de las quebradas.

Dentro de las avenidas torrenciales históricas reportadas en el Valle de Aburrá se destacan por su alto poder destructivo los eventos de la Quebrada La Hueso, Municipio

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

de Medellín (1984), Quebrada Ayurá, Municipio de Envigado (1988), Quebrada La Honda (1955, 1971, 1988 y 1989), Quebrada La Llorona, Municipio de La Estrella (2000) y más recientemente en la Quebrada El Barro, Municipio de Bello (2005). A nivel nacional se deben destacar el evento de San Carlos (1990), Tapartó y Curumaní (1991), Caquetá (1992), Murindó (1993), Páez (1994), río Fraile (1999), entre muchos otros (Caballero y Mejía, 1988; Correa, A., 1988; Vásquez, 1994; Rendón, 1997; Valencia, et al., 1998; Cadavid, 2001; González y Hermelin, 2004).

Según la base de datos Desinventar del AMVA (2008), a nivel del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las avenidas torrenciales con un 1.5% ocupan el cuarto lugar como fenómeno generador de desastres, encontrándose en los primeros lugares los movimientos en masa con 33% y las inundaciones con 41% (Ver Figura 1).

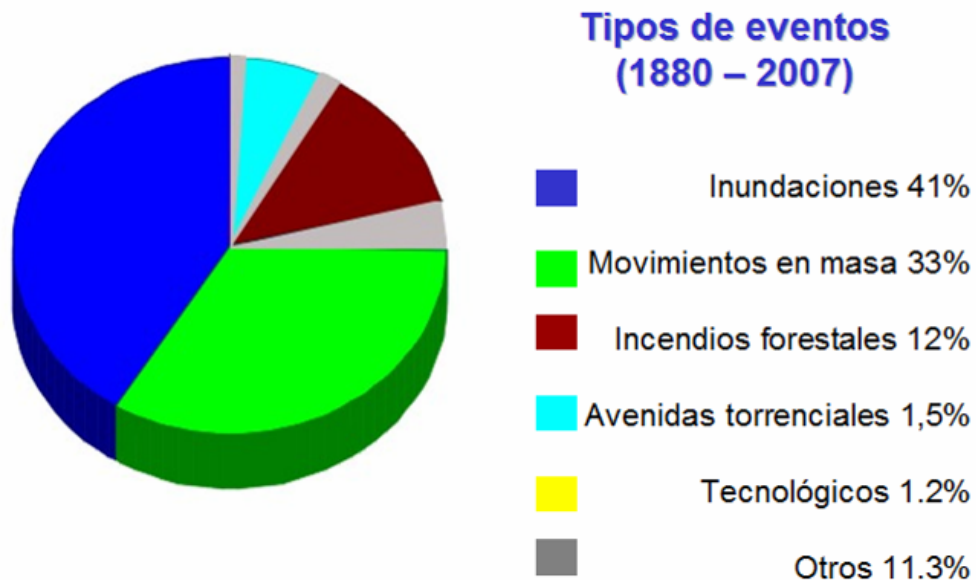


Figura 1. Diagrama según tipo de eventos principales ocurridos entre 1880 y 2007 en el Valle de Aburrá según la base de datos DesInventar (AMVA, 2008).

Lo anterior se podría interpretar inicialmente que como proceso morfodinámico, este fenómeno es de relativa baja relevancia respecto a otros en el Valle de Aburrá, pero dada la alta intensidad del fenómeno y debido a las características físicas de las microcuencas, junto con la actual forma como ha venido dándose la ocupación del territorio con la expansión de las zonas urbanas, se ha generado una nueva expectativa en cuanto al efecto potencial que podría tener un fenómeno de este tipo (Castro, 2007).

Hay numerosos depósitos de tipo torrencial identificables sobre las laderas del Valle de Aburrá y específicamente sobre las vertientes de muchas de las microcuencas afluentes del río Medellín. Este tipo de eventos han tenido lugar desde la formación del valle hasta hoy, cuando las corrientes todavía poseen gradientes altos en su cauce, pero también es importante analizar como el propio terreno se encuentra predispuesto geológicamente o mediante transformaciones antrópicas en determinados puntos del propio cauce o sobre las vertientes, generando un nuevo equilibrio dinámico en la corriente.

Si se toman en cuenta los factores que intervienen en la generación de avenidas torrenciales, a grandes rasgos se podría afirmar que prácticamente todas las cuencas del Valle de Aburrá tienen una alta probabilidad de ser torrenciales, especialmente las que presentan una pendiente fuerte y se encuentran ubicadas sobre saprolitos arenosos.

Para hacer un análisis riguroso de la amenaza de avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá sería necesario realizar un análisis de los diferentes microclimas, incluyendo para cada una de las cuencas un análisis local de lluvia y de sus respectivos pulsos, así como un análisis temporal de la variabilidad de la temperatura. Además de lo anterior, se debe considerar la altura, intensidad y dirección del viento y forma de la pendiente (cóncava - convexa) (Mejía, comunicación verbal).

En las zonas expuestas a amenazas por avenidas torrenciales es recomendable darle un apropiado uso al suelo, evitando la erosión o mecanismos de desestabilización del terreno por medio de un adecuado planeamiento territorial y fomentando la reforestación de las zonas cercanas a los cauces.

Debido a la baja recurrencia de las avenidas torrenciales en relación a otros fenómenos más frecuentes como inundaciones o movimientos en masa, es fundamental analizar las evidencias geomorfológicas y estratigráficas de eventos anteriores, para poder delimitar las zonas más propensas a presentar este tipo de eventos.

1.3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES

Los planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas -PIOM, realizados hasta el momento en sólo algunas cuencas del Valle del Aburrá, analizan las manchas de inundación mediante un modelamiento hidráulico con base en datos hidrometeorológicos, estimando así periodos de retorno, involucrando tanto la frecuencia como la magnitud del evento, utilizando el programa de modelamiento hidráulico *HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System)*, desarrollado por el *U. S. Army Corps of*

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Engineers. (Instituto Mi Río, Corantioquia, Universidad Nacional, 2003a; Montoya y Patiño, 2001).

Con el uso del modelo hidráulico de los PIOM se obtienen zonas de retiro para las microcuencas estudiadas para 2.33, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de retorno. Estas zonas de retiro, junto con rasgos geomorfológicos de eventos anteriores, se usan para establecer niveles de amenaza de acuerdo al tipo de corriente. El problema de estos métodos es que aún cuando utilizan la misma metodología e incluso el mismo software, presentan en algunos casos resultados muy diferentes para la misma zona de estudio (Figura 2), por lo cual, a pesar de que se tomaron en cuenta para el establecimiento preliminar de las zona de amenaza, no fueron decisivos a la hora de establecer los polígonos finales de amenaza.

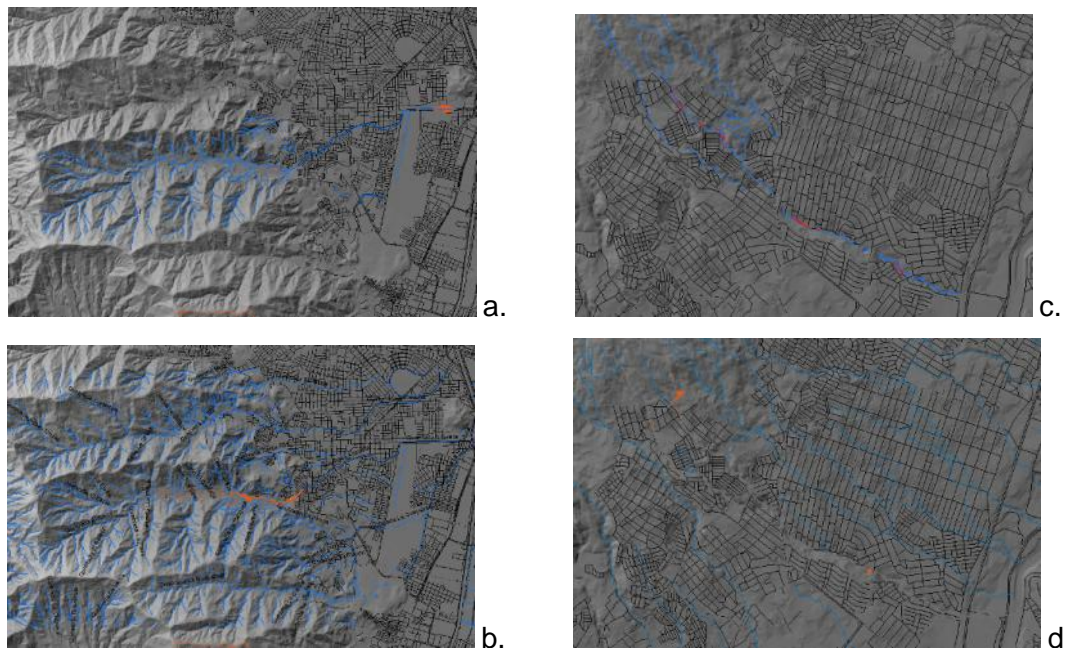


Figura 2. Manchas de inundación para periodos de retorno de 100 años calculadas con modelamiento hidráulico, software HEC RAS. a) Quebrada Altavista, calculadas por Montoya y Patiño (2001); b) Quebrada Altavista calculadas en el PIOM (2006); c) Quebrada La Quintana, calculadas por Montoya y Patiño (2001); d) Quebrada La Quintana calculadas en el PIOM de la misma quebrada, A.G.S (2006)

Luego de analizar la información sobre inundaciones y avenidas torrenciales disponible en todo el Valle de Aburrá y comparar las diferentes metodologías para determinar la amenaza por inundación, se encontró que a pesar de que en grandes zonas del Valle existen trabajos muy completos con análisis detallados y abundantes datos, para la

mayoría de las quebradas del Valle de Aburrá la información es insuficiente o de difícil acceso dado que gran parte de ella es generada por el sector privado para proyectos particulares o muy puntuales.

Debido a la heterogeneidad de la calidad de la información, la cual no ofrece una colección de datos sistémicos o descripciones apropiadas, y a los alcances de este estudio, los mapas de amenaza de inundación y de avenida torrencial se construyeron con una metodología basada en un análisis geomorfológico de las zonas que por sus características topográficas, geológicas e hidrológicas son susceptibles a la acumulación de grandes cantidades de agua o a presentar avenidas torrenciales. Lo anterior fue respaldado con la interpretación de fotografías aéreas, confirmado por medio de un trabajo de campo detallado en las zonas críticas, además complementado con la información secundaria disponible. Lo anterior busca interrelacionar la dinámica geomorfológica con la información hidrológica disponible (Parra *et al*, 1995; Durán *et al*, 1985; Flórez y Parra, 1988; Caballero y Mejía, 1988; Bloom, 1991; Delgado, 1995; Bruneton *et al.*, 2001; Naranjo y Arbeláez, 2002; Zuluaga, 2002, Aristizabal, 2007; Barbeito *et al.*, 2008; Espíritu, 2008; Kingma *et al*, 2008; López y Aragón, 2008; entre otros).

El análisis de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales se limitó a definir las áreas de amenaza alta ante eventos extremos, es decir, las zonas que según características geomorfológicas presentan una posibilidad alta de ocurrencia de daños severos y/o pérdida de vidas a causa del flujo de la inundación o avenida torrencial (Instituto Mi Río, Corantioquia, Universidad Nacional, 2003a).

De esta manera, la delimitación de las áreas con amenaza alta por inundación y/o avenidas torrenciales se basó en los siguientes criterios para las distintas zonas de ocurrencia (Figura 3):

- Zona de montaña: en esta zona predomina la amenaza alta por avenidas torrenciales según la pendiente, longitud de la cuenca y material aportante, aunque la zona afectada por la avenida es usualmente estrecha ya que depende del grado de encajonamiento de la corriente. La amenaza por inundación rápida y lenta es usualmente baja, excepto en puntos críticos generados principalmente por intervención antrópica.
- Zona de transición (conos de deyección): al ser la zona natural de depositación, es a su vez la zona de mayor peligro ya que incluye las zonas más extensas de inundación rápida generadas por la desembocadura de las avenidas torrenciales debido al cambio de pendiente.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- Llanura aluvial: excepto en ciertos casos, al llegar a esta zona , gran parte de los afluentes que pueden presentar avenidas torrenciales han perdido velocidad, altura de flujo y capacidad de carga , ya sea por condiciones naturales o por obras de mitigación antrópicas, lo cual genera que la amenaza por inundación rápida sea media a baja. Sin embargo esta es la zona más amplia de inundación lenta , generada principalmente por desbordamientos del río Medellín .

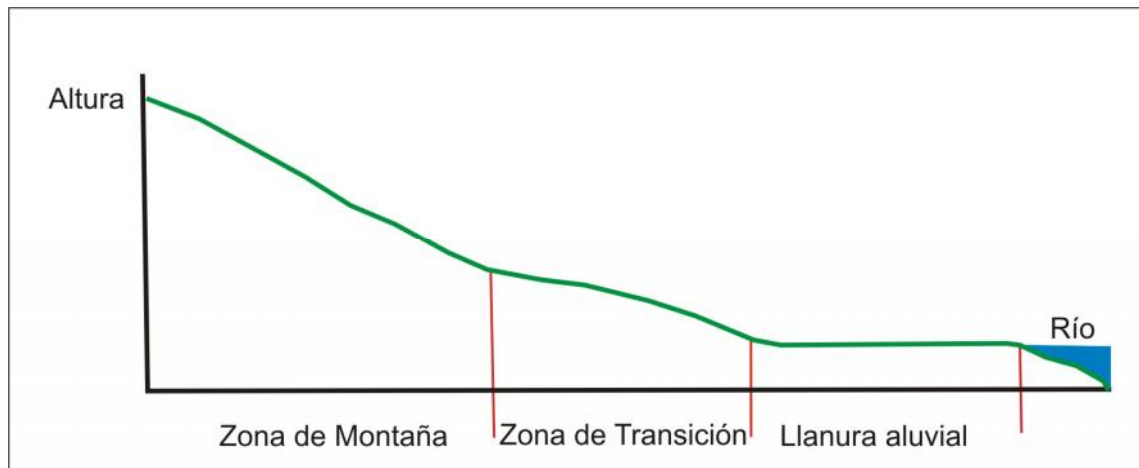


Figura 3. Esquema de perfil longitudinal con zonas de ocurrencia.

Las inundaciones lentas o de tipo aluvial se producen cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una misma cuenca. Se caracterizan por un aumento paulatino del nivel de las aguas hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento , generando el desbordamiento y la consecuente inundación de las áreas planas o con concavidades aledañas al cauce principal.

Por lo anterior, las inundaciones lentas, se caracterizan por el transporte de partículas finas a bajas velocidades o acumulaciones y con poco desplazamiento de materiales gruesos, de tal forma sus efectos están representados por el agua que anega viviendas y cultivos, cuya duración varía de días a algunos meses (Flórez y Suavita, 1997 ; INETER y COSUDE, 2005). En el valle de Aburrá sin embargo, las llamadas inundaciones lentas solo pueden durar hasta horas, dadas las condiciones morfológicas particulares. Este tipo de inundación es típico para la zona urbana de l Área Metropolitana del Valle de Aburrá sobre el fondo del valle, con algunas excepciones de aquellas áreas urbanas localizadas sobre los abanicos o conos de deyección.

Por las razones expuestas, las zonas de amenaza por inundación lenta se clasificaron como de amenaza alta, según la magnitud de los daños probables, tomando en cuenta la posible profundidad del flujo y el tiempo de residencia o almacenamiento de las aguas. De esta manera se considera que una zona de inundación muy probable pero de baja altura

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

de flujo, a pesar de que puede generar algunos daños materiales, presenta una probabilidad muy baja de ocasionar pérdida de vidas y destrucción de viviendas y estructuras, por lo tanto no es considerada para la evaluación del riesgo.

En las zonas urbanas donde la intervención antrópica ha modificado las condiciones geomorfológicas naturales, las zonas de inundación y avenidas torrenciales se delimitaron tomando en cuenta la geomorfología actual y se localizaron los puntos críticos donde se han presentado eventos en el pasado.

La metodología propuesta incluye el análisis y recopilación de información secundaria, dentro de las que se cuentan tesis universitarias, PIOM, POMI, PBOT, POMCA, entre otros informes específicos de diferentes cuencas, además de un trabajo de fotointerpretación, cotejando fotografías de diferentes épocas acompañado de un análisis de imágenes satelitales.

Por medio de la interpretación de las fotografías aéreas se delimitaron las planicies de inundación y los abanicos aluviales recientes, haciendo énfasis en las zonas bajas de las cuencas, además de definir las zonas de cabeceras susceptibles y tramos con evidencias de anteriores avenidas torrenciales.

En los perfiles longitudinales de las principales cuencas se analizaron los cambios de pendiente y se delimitaron las zonas de ocurrencia de los eventos de inundaciones y/o avenidas torrenciales.

Cabe aclarar que la delimitación de la llanura aluvial se realizó siguiendo criterios geomorfológicos, sin tener en cuenta la intervención antrópica, por lo cual, especialmente en el caso del río Medellín, algunas veces se incluye dentro de la mancha de la llanura de inundación, llenos antrópicos recientes ubicados en su mayoría a mayor nivel topográfico que el lecho del río y por lo tanto no inundables, así como algunas zonas que presentan obras de protección que han disminuido la intensidad de los efectos adversos, como lo son los procesos erosivos que aceleran los mecanismos generadores de eventos amenazadores.

Se realizó además un análisis regional de las zonas susceptibles a inundación por medio de lógica difusa aplicada en una plataforma SIG, lo cual generó un mapa de susceptibilidad preliminar.

Con la información secundaria, el mapa obtenido con lógica difusa y la fotointerpretación, se obtuvieron las zonas preliminares de inundación y de avenidas torrenciales. Posteriormente se realiza un trabajo de campo detallado, según la escala de trabajo definida previamente (1:5.000 para Medellín y 1:10.000 para los demás municipios del

Valle de Aburrá), durante el cual se analizaron las zonas de inundación preliminares y se hicieron las correcciones necesarias según los criterios de los expertos. Durante el trabajo de campo no sólo se verificó la zona de incidencia de la amenaza, sino que, siempre que fue posible, se solicitó a los vecinos de la zona información acerca del comportamiento de la quebrada y sobre la ocurrencia de eventos previos de inundación o avenidas torrenciales.

Durante el trabajo de campo se realizó un estudio geomorfológico de las zonas susceptibles de inundación analizando el relieve de las llanuras de inundación y las características geomorfológicas del sistema fluvial. Se hizo énfasis en las quebradas con evidencias de inundaciones o avenidas torrenciales previas, donde se realizó un análisis de las secuencias estratigráficas aluviales a nivel geomorfológico para determinar la naturaleza y disposición de los depósitos cercanos a los canales de drenaje analizando además la edad relativa de los depósitos, es decir, si son recientes o no. Se busca igualmente evidencias de diferentes niveles de inundación, analizando las características morfológicas del lecho fluvial y la presencia de grandes clastos en su cauce, evidencia de eventos de gran magnitud. Lo anterior con el fin de determinar las zonas susceptibles de ser inundadas así como para establecer la naturaleza torrencial de los diferentes drenajes.

Debido a la naturaleza de la metodología, no es posible establecer la frecuencia, periodo de retorno e intensidad de los eventos de inundación y avenidas torrenciales; así como tampoco establecer los umbrales de lluvia necesarios para desencadenar los.

Para la determinación de las zonas susceptibles a inundación rápida y de las zonas susceptibles a avenidas torrenciales se utilizó básicamente el mismo esquema metodológico. La diferencia radica en que debido al mayor intervalo de recurrencia de las avenidas torrenciales, no se tiene la misma cantidad de información secundaria que en el caso de los eventos de inundación, mucho más recurrentes. Lo anterior hace necesario complementar el análisis para avenida torrencial con fotografías aéreas ponderando sobre la fotointerpretación y a los recorridos de campo para hallar evidencias de torrencialidad histórica de los drenajes (Hurtado, 2002; Zuluaga, 2002; González y Hermelin, 2004; Aristizabal, 2007).

Además de las manchas de inundación y avenidas torrenciales, se incluyen también puntos críticos generados en su mayoría por intervención antrópica, los cuales por su naturaleza no son posibles de delimitar por criterios geomorfológicos, ya que incluyen factores como obstrucción de cauce por basuras, canalización de corrientes que alteran su capacidad natural de transporte, invasión de los cauces, etc.

Dentro de los puntos críticos se incluyen los definidos en los POT y otras fuentes bibliográficas, y los que se observan durante los recorridos de campo. Los puntos críticos corresponden a aquellos sitios donde se han reportado eventos en el pasado pero es

necesario tomar en cuenta que en el presente, algunos de estos puntos puede que ya no sean críticos debido a nuevas obras de mitigación realizadas.

1.3.1 Metodología utilizada

La metodología usada para el análisis de susceptibilidad por inundaciones y avenidas torrenciales, incluye los siguientes pasos esquematizados en la Figura 4:

- A. Recopilación de información secundaria: la búsqueda se enfocó en los centros de documentación del Área Metropolitana, Biblioteca de Planeación de los municipios del Valle de Aburrá, Aula Ambiental (antes Instituto Mi Río), Universidad Nacional, Universidad EAFIT, planotecas, entre otros.
 - Recopilación de estudios existentes: tales estudios incluyen tesis de grado, POMI, PIOM, POMCA, PBOT además de estudios puntuales relativos a una microcuenca en particular.
 - Revisión de estudios hidráulicos e hidrológicos para las quebradas con mayores registros de eventos o para aquellas que posean tal información.
 - Estudios anteriores relacionados concretamente al tema de inundaciones y avenidas torrenciales en el Área Metropolitana incluyendo estudios en zonas de inundación que especifiquen puntos críticos.
 - Revisión de toda la información cartográfica, en papel o medio magnético, como curvas de nivel, hidrografía, geología de las unidades superficiales, entre otros.
- B. Análisis geomorfológico por sensores remotos: a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas de múltiples años y de imágenes de satélite multiespectrales de diferentes escalas, de los años 1986 y 2000.
- C. SIG para validación: Elaboración de un mapa de susceptibilidad a la inundación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicando lógica difusa .
- D. Elaboración para cada municipio de un mapa preliminar de amenaza basado en información secundaria y análisis geomorfológico preliminar.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- E. Visitas a campo que permitan verificar, complementar y modificar los datos preexistentes y realizar en cada zona un análisis de susceptibilidad a inundaciones y avenidas torrenciales.
- F. Determinación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales
- En esta etapa se relaciona la información secundaria recopilada con el análisis geomorfológico y el trabajo de campo para generar mapas que incluyen las manchas por inundaciones rápidas y lentas y avenidas torrenciales, así como la ubicación de puntos críticos. Estos mapas incluyen: un mapa de amenaza por inundación escala 1:10.000 para el Valle de Aburrá, (1:5000 para Medellín) y un mapa de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:10.000 para el Valle de Aburrá (1:5000 para Medellín).
- G. Verificación de resultados: luego de producir el mapa de amenazas se realizará una verificación de los resultados en tres fases:
- Comparándolos con los mapas de los POT.
 - Realizando reuniones con funcionarios expertos de cada municipio para que analicen los mapas resultantes y den sus observaciones .
 - Visitas de campo opcionales que permitieran verificar los límites de algunos polígonos.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

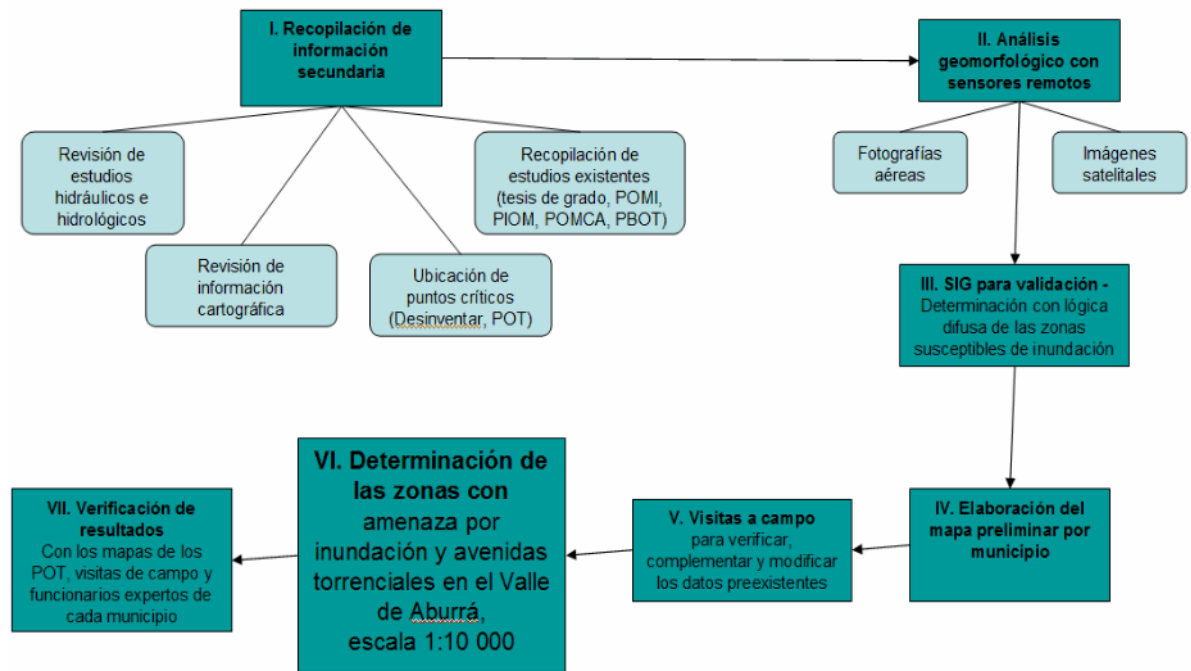


Figura 4. Esquema de la metodología aplicada para la determinación de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales

1.3.2 Análisis de la información sobre inundaciones y avenidas torrenciales de los POT de los municipios del Valle de Aburrá

De la información secundaria consultada, los documentos de revisión de los POT de los diferentes municipios constituyeron una de las fuentes principales, debido no sólo a que en general constituyen los estudios más recientes, sino que han constituido una herramienta fundamental en la planeación municipal. A continuación, se resaltan las características más relevantes por municipio en relación a estos eventos.

♦ **POT Municipio de Caldas**

Este trabajo presenta un capítulo completo sobre las amenazas por movimientos en masa como de inundaciones que incluye, además de otras secciones, la descripción de las zonas con mayor amenaza por inundaciones lentas y rápidas en la zona rural, soportada con fotografías y registradas con buena precisión en un mapa de amenazas escala 1:5000.

Dentro de los limitantes de este estudio se encuentra la falta de una caracterización para inundaciones en la zona rural y que a pesar de que incluyen un análisis de la amenaza

por inundaciones rápidas, no analiza la amenaza por avenidas torrenciales aunque sí incluye una buena descripción de los depósitos torrenciales.

◆ **POT Municipio de La Estrella**

El POT de La Estrella incluye una sección de evaluación de amenazas por fenómenos naturales identificadas en el municipio, dentro de la cual hay una descripción de las amenazas de origen hidroclimático de diferentes niveles. Presenta una descripción detallada de las zonas con amenaza por inundación en la zona rural y urbana y enumera sin discriminar las quebradas que considera con amenaza por inundaciones rápidas y avenidas torrenciales.

Este trabajo, es uno de los pocos POT a nivel regional, que incluye las amenazas por avenidas torrenciales, aunque una de sus deficiencias se refiere al mapa de amenazas:

- En cuanto a las zonas de inundación lenta, los polígonos en la zona del río no parecen seguir ningún criterio geomorfológico en sus formas, e incluso contienen zonas marcadas con amenaza de inundación que pasan por filos o colinas.
- En cuanto a las zonas con amenaza por avenidas torrenciales, los polígonos se presentan como zonas regulares alrededor de las quebradas torrenciales, sin analizar cambios en la topografía, ni incluyen el cambio morfológico que presentan las avenidas torrenciales en la zona de cambio de pendiente, donde se ubican las zonas más amplias de los depósitos torrenciales.

◆ **PBOT Municipio de Sabaneta**

El CLOPAD suministro un mapa preliminar de amenazas, el cual, contenía las zonas críticas de inundación y movimientos en masa, aunque no definía los polígonos correctamente. No se tuvo acceso al POT, debido a que el Municipio no había terminado su actualización.

◆ **POT Municipio de Itagüí**

El documento facilitado por este municipio contiene un mapa 1:10 000 de las zonas con distintos grados de amenaza de inundación definidas por medio de métodos hidráulicos. Desafortunadamente, no incluye la descripción del método utilizado ni la descripción de las zonas con amenaza alta.

◆ **POT Municipio de Medellín**

Se definen para el suelo Urbano y Rural (Corregimientos) zonas de riesgo no recuperable debido a que el asunto es más recurrente en esta zona de la región, sin desconocer que

en el resto del territorio también se presenta la problemática, en base a estudios geológico-geotécnicos con sus respectiva zonificación geológica de aptitud del suelo, los cuales se retomaron para la actualización de las zonas de alto riesgo. Así mismo se retomaron los estudios geológicos-geotécnicos, hidráulicos e hidrogeológico de firmas consultoras idóneas de la Ciudad.

En general, los parámetros que se tomaron para la determinación de la aptitud geológica del suelo (zonificación) fueron: (Pendiente, Geomorfología, Geología, Procesos morfodinámicos, Propiedades geomecánicas de los suelos) y con base en esta zonificación se adoptaron las zonas que presentaban mayor restricciones geológicas como son las zonas "C" y "D" y corresponden a zonas con riesgo a deslizamientos o inundaciones.

Dentro de los limitantes de este estudio tenemos:

- No se muestra un mapa con zonas de inundación para el municipio de Medellín a una misma escala de trabajo.
- Hay un análisis muy detallado mediante modelamiento hidráulico para algunas zonas, estos estudios se concentran en el suelo urbano.
- No existe un mapa de amenaza para inundaciones y/o avenidas torrenciales una escala determinada para todo el municipio.
- Existen más estudios de amenazas por inundaciones y pocos por avenidas torrenciales.
- Carecen estudios para los tributarios de los principales drenajes en los análisis hidráulicos

◆ **POT Municipio de Bello**

El POT de este municipio es uno de los más completos en cuanto al análisis de las amenazas de origen natural, dedicando un capítulo completo al diagnóstico de riesgos y amenazas, donde analiza diferentes metodologías para finalmente producir zonas depuradas. El mapa de amenazas presenta polígonos delimitados con una gran precisión.

◆ **PBOT Municipio de Copacabana**

El PBOT de este municipio presenta una sección de amenazas por inundación y avenidas torrenciales, con una descripción somera de las quebradas con mayores zonas de amenaza tanto por inundación y avenidas torrenciales.

En cuanto al mapa, éste contiene zonas de inundación bastante aproximadas, aunque no se especifica el tipo de método seguido para definir dichas zonas ni se incluye un mapa de amenaza por avenidas torrenciales.

◆ **PBOT Municipio de Girardota**

El documento técnico del POT de este municipio contiene un análisis de las amenazas de origen natural basadas primordialmente en criterios geológicos, según los cuales la presencia de depósitos en las partes bajas delimita las zonas de inundación y la presencia de conos de deyección delimita las zonas de amenaza ante eventos torrenciales.

No realiza una descripción de las principales zonas inundables y sólo se nombran algunas quebradas que presentan depósitos torrenciales asociados.

En cuanto al mapa de amenazas ante deslizamientos e inundación este contiene para la zona de montaña o cabeceras pasando por la zona de transición una delimitación de los retiros hidrológicos relativos a las quebradas más que de las zonas bajo amenaza y en el valle presenta las zonas de amenaza delimitadas por los depósitos aluviales, excepto en la parte baja de la zona urbana donde el polígono de amenaza fue disminuido ostensiblemente respecto al PBOT anterior “debido a que el PBOT del 2000 dejaba inhabilitada esta zona para los usos industriales” (Municipio de Girardota, 2007, pag. 8 6) por lo cual en el nuevo PBOT se disminuye ampliamente la zona amenazada.

◆ **PBOT Municipio de Barbosa**

El PBOT de este municipio es, junto con el del municipio de Bello, el más completo en cuanto al análisis y cartografía de las amenazas por deslizamiento e inundaciones. Contiene una descripción detallada de las zonas de amenaza y riesgo, principalmente de la zona urbana y de los alrededores del Río Medellín. Los mapas de amenazas, escala 1:5000 para la zona urbana y 1:20 000 para la zona rural, son de gran precisión para la escala de trabajo, incluyen las zonas de amenaza por inundaciones lentas y rápidas, dentro de estas últimas consideran las zonas de amenaza por avenidas torrenciales.

1.3.3 Análisis de los eventos reportados en DESINVENTAR

Según la Base de datos Desinventar (AMVA, 2008), desde abril de 1880 hasta Noviembre de 2007, en el Valle de Aburrá se han presentado un total de 2904 inundaciones y 124 avenidas torrenciales (Tabla 1).

Tabla 1 Eventos reportados en la Base de datos Desinventar, para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008).

Municipio	Tipo de Evento	
	Avenidas Torrenciales	Inundaciones
Medellín	85	2151
Barbosa	2	8
Bello	15	162
Caldas	3	45
Copacabana	1	36
Envigado	4	119
Girardota	1	27
Itagüí	9	246
La Estrella	3	44
Sabaneta	1	66
TOTAL	124	2904

En la Figura 1 se muestra la distribución de los eventos de inundación reportados para los diferentes municipios. De acuerdo a esta distribución se aprecia que Medellín presenta la mayor cantidad de reportes con 2151 eventos registrados, seguido de lejos por Itagüí con 246, Bello con 162 y Envigado con 119. Es necesario precisar que en la base de datos de Desinventar no se aclara si el evento reportado corresponde a una inundación lenta o rápida.

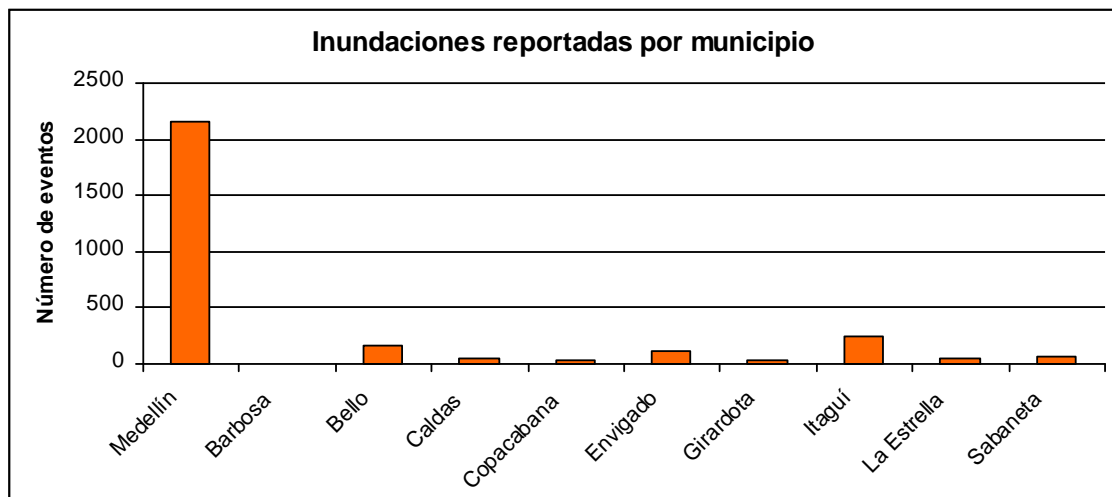


Figura 5. Distribución de las Inundaciones reportadas en la Base de datos Desinventar para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008)

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

En cuanto a las avenidas torrenciales, se observa en la Figura 6 un comportamiento muy similar, donde Medellín presenta 85 eventos, seguido de Bello con 15 eventos y posteriormente Itagüí con 9.

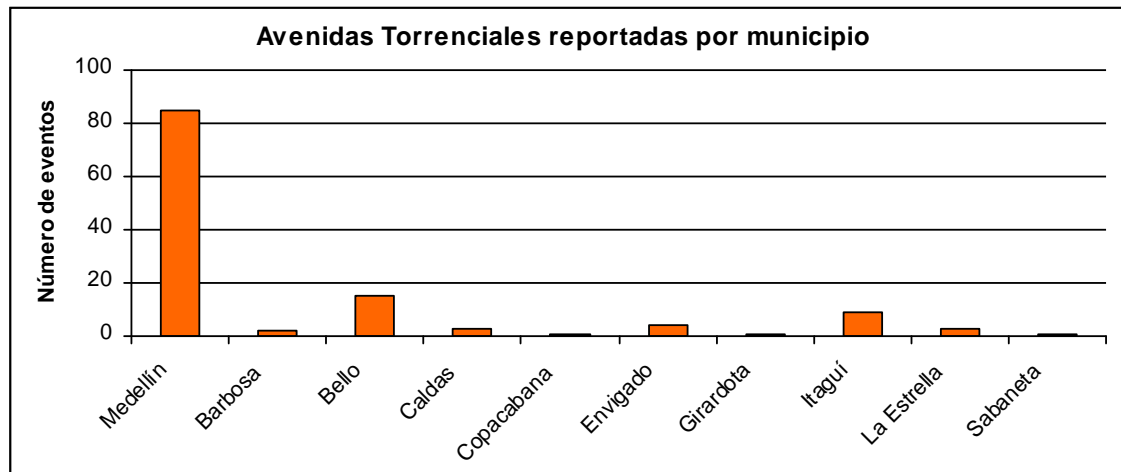


Figura 6. Distribución de las Avenidas Torrenciales reportadas en la Base de datos Desinventar para los diferentes Municipios del Valle de Aburrá (AMVA, 2008).

En ambos casos Medellín presenta la mayor cantidad de eventos reportados, lo cual es producto no sólo de su gran extensión y mayor zona urbana respecto a los otros municipios, sino que también se debe a que es el Municipio que tiene mayor información debido a que cuenta con el Sistema de Prevención y Atención de Desastres más estructurado de todo el Valle de Aburrá por lo cual los reportes de eventos, aunque no son consignados en su totalidad en la base de datos Desinventar, al menos se recopilan con mayor eficiencia, mientras que en los otros municipios, son pocos los eventos consignados en esta base de datos.

En cuanto a la causa de los eventos de inundación, en la Tabla 2, se muestran las principales causas separadas según sean de origen natural, antrópico o de origen desconocido.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Tabla 2 Causas de los eventos de inundaciones reportados en Desinventar (adaptadas de AMVA, 2008).

	Causa	Avenidas Torrenciales	Inundaciones
Naturales	Lluvias	17	488
	Bloqueo Natural de Cauce	2	36
Antrópicas	Extracción de material		1
	Infiltración de Acueducto		8
	Infiltración de Alcantarillado		5
	Obstrucción Antrópica del Cauce		61
	Obstrucción Antrópica del Acueducto		15
	Obstrucción Antrópica Alcantarillado		80
Desconocido		105	2210
TOTAL		124	2904

Sin tomar en cuenta los 2210 eventos con causa Desconocida, la principal causa reportada de inundaciones, como es de esperarse, es la lluvia con 488 eventos, seguida por causas antrópicas que incluyen la Obstrucción de Alcantarillado con 80 eventos y la Obstrucción del Cauce de la quebrada afectada con 61 eventos (Figura 7).

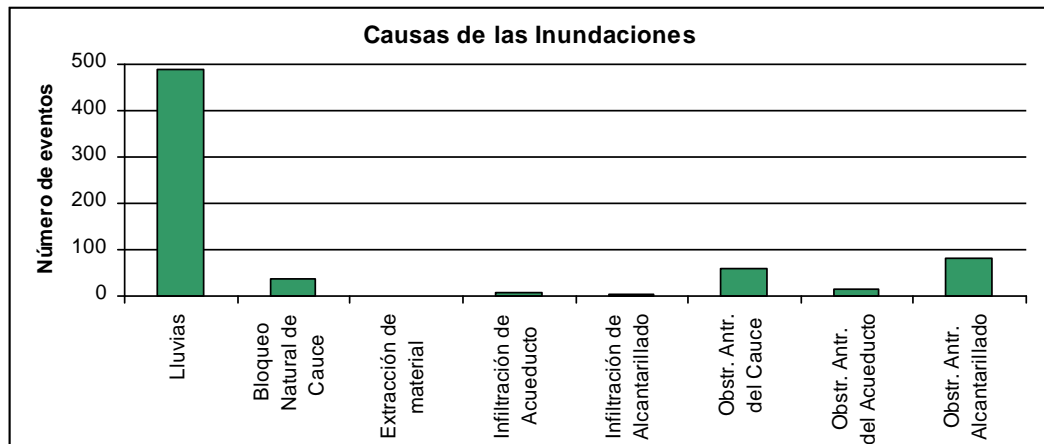


Figura 7 Distribución de las causas reportadas para las Inundaciones en el Valle de Aburrá (AMVA, 2008).

Respecto a las causas de las avenidas torrenciales, para este fenómeno la descripción de los eventos en la base de datos es muy restringida por lo cual se tiene que en la mayoría de los casos la causa del fenómeno se desconoce, 105 eventos, y sólo se reportan dos

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

tipos de causas, lluvias con 17 eventos y bloqueo natural del cauce con 2 eventos (Figura 8).

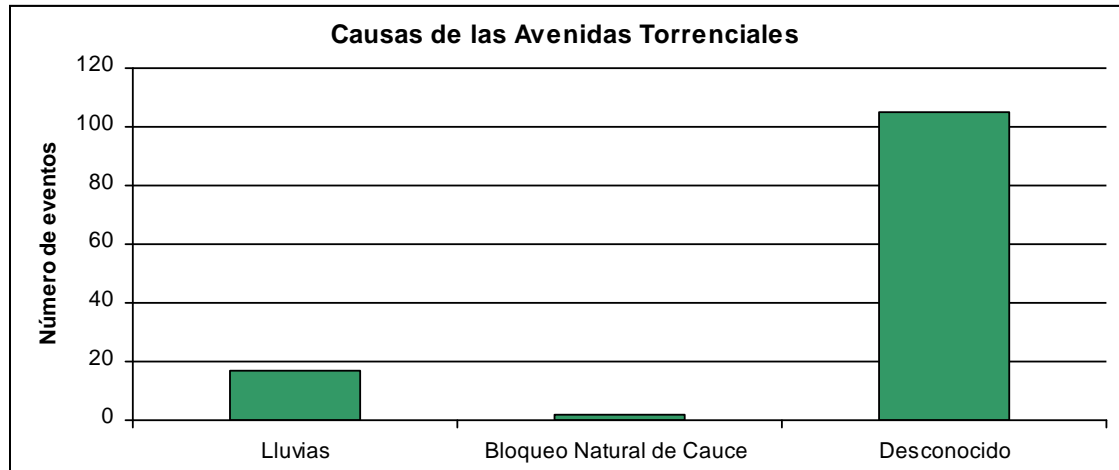


Figura 8 Distribución de las causas reportadas para las avenidas torrenciales del Valle de Aburrá (AMVA, 2008).

Por su parte el POMCA - Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (AMVA et al., 2007), usando la base de datos de DesInventar determinó parcialmente el riesgo de inundación de las principales quebradas del Valle de Aburrá (Tabla 3).

Tabla 3 Niveles de riesgo por inundación de las principales quebradas del Valle de Aburrá según el POMCA (AMVA et al., 2007)

Quebrada	Nivel de Riesgo	Mpio	Quebrada	Nivel de Riesgo	Mpio
Q. La García	Muy Alto	B	Q. La Cangreja	Medio	
Q. La Iguana	Muy Alto	M	Q. Mandalay	Medio	C
Q. La Muñoz	Muy Alto	I	Q. La Chuscala	Medio	C
Q. Quintana	Alto	M	Q. EL Zancudo	Medio	
Q. La Hueso	Alto	M	Q. El Ahorcado	Medio	
Q. La Minita	Alto	M	Q. El Salado	Medio	G
Q. La Tablaza	Alto	I	Q. Carevieja	Medio	
Q. La Arenala	Alto	I	Q. Aguas Frías o Picacha	Medio	M
Q. La Justa	Alto	I	Q. La Madera	Bajo	B
Q. La Doctora	Alto	S	Q. La Gómez	Bajo	I
Q. La Maquinita	Alto	M	Q. Malpaso	Bajo	M
Q. La Chorrera	Alto		Q. El Salado	Bajo	EN
Q. La Castro	Alto	M	Q. La Jabalcona o Pampa	Bajo	I
Q. Santa Helena	Alto	M	Q. La Pedregala	Bajo	I
Q. Altavista	Alto	M	Q. San Martín	Bajo	
Q. El Barro	Alto	B	Q. La Presidenta	Bajo	M

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Quebrada	Nivel de Riesgo	Mpio	Quebrada	Nivel de Riesgo	Mpio
Q. La Ayurá	Alto	EN	Q. La Sucia	Bajo	M
Q. Doña Maria	Alto	I	Q. La Bermejala P	Bajo	M
Q. La Palencia	Alto		Q. La Clara	Bajo	C
Q. El Hato	Medio	B	Q. Rodas	Bajo	B M
Q. La Loca	Medio	B	Q. La Seca	Bajo	B
Q. Ana Díaz	Medio	M	Q. La Herrera	Bajo	M
Q. La Bermejala	Medio	ES	Q. Santa Cruz	Bajo	
Q. La Guayabala	Medio	M	Q. La Aguacatala	Bajo	EN
Q. La Manguala	Medio	M	Q. Tierradentro	Bajo	
Q. La Olivares	Medio	I	Q. La Chiquita	Bajo	
Q. La Mina	Medio	EN	Q. La Cantera	Bajo	M
Q. La Grande	Medio	ES	Q. La Moreno	Bajo	
Q. La Chocha	Medio	ES	Q. La Honda	Bajo	S
Q. Cien Pesos	Medio	S	Q. La López	Bajo	BA
Q. La Sabanetica	Medio	S	Q. La Lorencita	Bajo	
Q. Tablacita	Medio	E	Q. Betania	Bajo	
Q. La Corrala	Medio	C	Q. Santa Rita	Bajo	
Q. Valeria	Medio	C	Q. Pela Hueso	Bajo	M
Q. La Rosa	Medio	M	Q. Juan Bobo	Bajo	M
Q. La Mansión	Medio	M	Q. La Picacha	Bajo	M
Q. Chorro Hondo	Medio		Q. La Corcovada	Bajo	
Q. La Gallinaza	Medio		Q. Cañada Negra	Bajo	
Q. La Pastora	Medio		Q. El Chupadero	Bajo	

1.3.4 **Fotointerpretación**

Durante el trabajo de fotointerpretación se realizó un diagnostico de zonas que en la actualidad son altamente susceptibles a presentar inundación y/o avenida torrencial. Se tuvieron en cuenta aspectos geomorfológicos desde los cuales se evalúan el origen, los mecanismos de generación, tipos de material y modos de evolución, volumen de material y área que puede llegar a ser afectada, velocidad probable de acuerdo a su grado de relación con el sistema hídrico.

Para cada municipio, a nivel particular de cada microcuenca aportante del río Medellín y otras no aportantes a éste, que aunque nacen dentro del territorio de los municipios que componen el Área Metropolitana de Medellín son afluentes de otras cuencas, se aplica el mismo análisis. Se reconocieron las áreas dentro del cauce topográfico y allí las

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

geoformas asociadas al sistema hídrico, cuyos mecanismos de generación están relacionadas ó son susceptibles a presentar nuevamente inundaciones o avenidas torrenciales. Esta misma evaluación, teniendo presente el grado de intervención y solo en lo que concierne a la amenaza por inundaciones lentas, se hizo dentro de la llanura de inundación del río Medellín.

Se trabajaron fotografías aéreas recolectadas en los entes territoriales, en este caso se revisó el material que pertenece el Área Metropolitana del Valle del Valle del Aburrá, entidad que permitió el acceso a estas fotografías para los municipios del sur y norte del Valle de Aburrá. Por otro lado, las secretarías de planeación municipales de Medellín y Bello facilitaron el acceso al material de sus territorios. En la Tabla 4. Se resumen las fotografías aéreas revisadas.

En la figura 9 se observan las líneas de vuelo utilizadas para la fotointerpretación.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

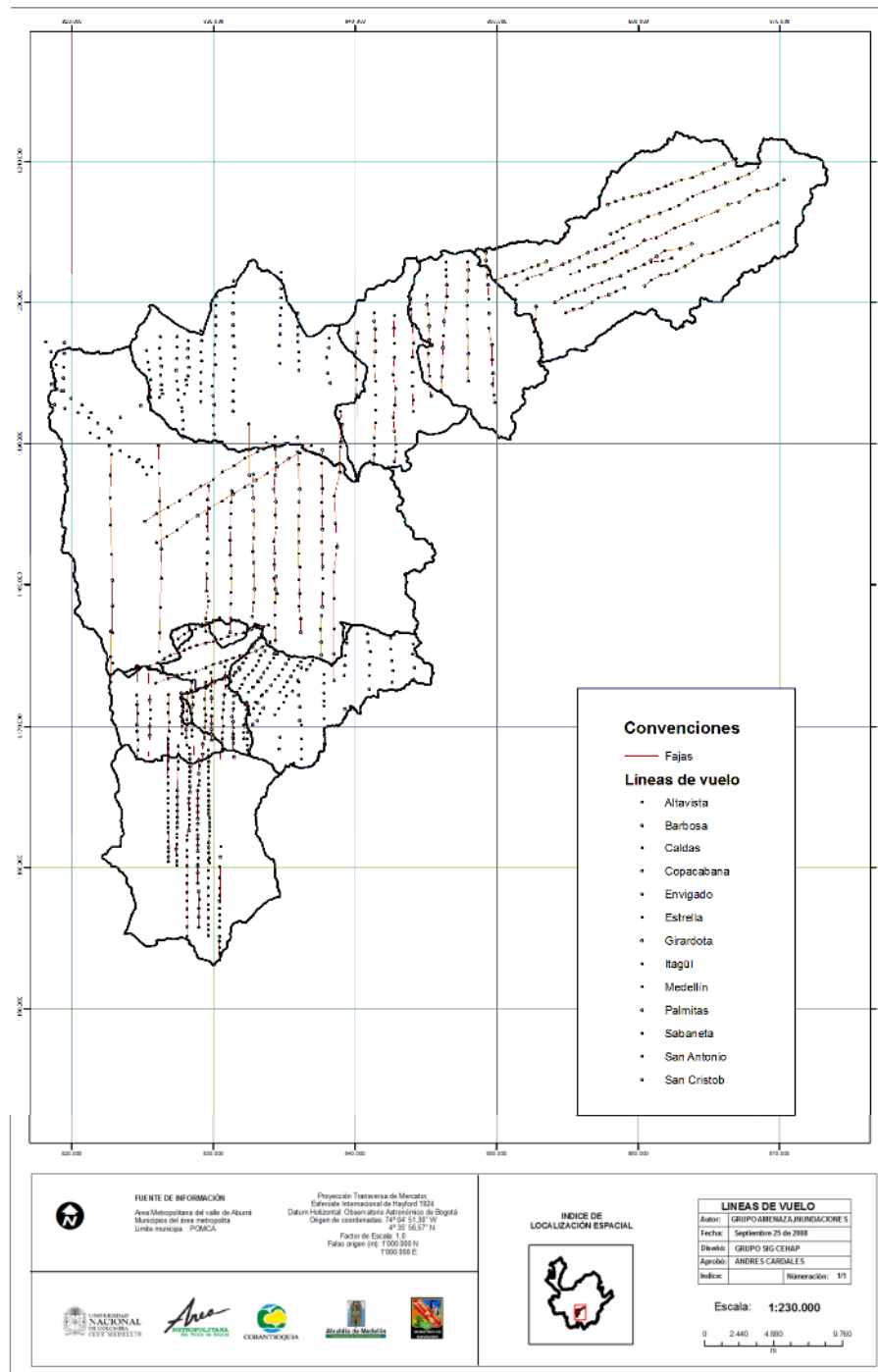


Figura 9. Fajas y líneas de vuelo del Área Metropolitana del valle de aburrá utilizadas para la fotointerpretación.

Tabla 4 Fajas con la secuencia de fotografías para del Valle de Aburrá.

MUNICIPIO	FAJA (secuencia de fotos)	AÑO DE TOMA	ESCALA APROXIMADA
BARBOSA	F4A (479-495)	1996	1: 8000-9000
	F05 (347-361)		
	F6/7 (859-870)		
	F07 (285-291)		
	F07A (274-268)		
	F07AR (304-313)		
	F08A (7030-7044)		
GIRARDOTA	F02 (168-177)	1995	5,597222222
	F03 (181-192)		
	F04 (199-208)		
	F05 (259-272)		
COPACABANA	F01(068-070)	1995	5,597222222
	F02 (046-051)		
	F03 (020-033)		
	F04(075-086)		
	F05 (148-156)		
BELLO	F01(519-528)	1996	6,291666667
	F01N (898-903)		
	F02 (510-518)		
	F02N (892-896)		
	F02EN (979-980)		
	F03N (135-141)		
	F03S (912-918)		
	F04N (103-108)		
	F05 (390-396)		
	F06 (002-004)		
	F06 (810-817)		
	F06N (112-120)		
	F07S (721-728)		
	F08S (711-720)		
F12 (980-992)			
MEDELLIN			Diferentes escalas
Corregimientos	FAL399 F08-2 (133-144)	1998	1: 20000

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

MUNICIPIO	FAJA (secuencia de fotos)	AÑO DE TOMA	ESCALA APROXIMADA
	FAL399 F15-1 (271-277)		
	FAL399 F16-1 (132-143)		
	FAL401 F14-2 (048-050)		
	FAL401 F16 (073-081)		
	FAL402 F08-1 (097-106)		
	FAL402 F16 (166-171)		
	FAL403 F10 (133-143)		
MEDELLIN			Diferentes escalas
Corregimientos	FAL403 F11 (122-132)	1998	1: 20000
	FAL403 F12 (111-121)		
	FAL403 F17-2 (052-061)		
	FAL404 F07-1 (015-019)		
	FAL404 F07-2 (67-70)		
	FAL404 F17-2 (080-082)		
Zona urbana	FAL398 F05-2 (146-158)	1998	1: 10000
	FAL398 F06-2 (077-090)		
	FAL398 F07-2 (095-106)		
	FAL399 F04-2 (051-066)		
	FAL399 F05-2 (093-099)		
	FAL399 F15-2 (258-267)		
	FAL400 F09-1 (192-194)		
	FAL401 F03-3 (141-153)		
	FAL401 F17-1 (107-112)		
	FAL402 F02 (103-114)		
FAL403 F18-1 (246-251)			
ITAGÜÍ	F01 (7862-7869)	1996	5.597.222.222
	F02 (7882-7898)		
	F03 (7906-7921)		
	F04 (7928-7936)		
SABANETA	F01 (238-244)	1996	5.597.222.222
	F03 (267-275)		
	F03A (835-842)		
	F05 (166-177)		
LA ESTRELLA	F01 (556-558)	1996	5.597.222.222
	F02 (383-387)		

MUNICIPIO	FAJA (secuencia de fotos)	AÑO DE TOMA	ESCALA APROXIMADA
	F03 (348-356)		
	F03S (787-791)		
	F04 (373-382)		
	F04S (371-372)		
	F05 (337-346)		
	F06N (571-579)		
	F06S (323-326)		
CALDAS	F07N (729-748)	1996	5.597.222.222
	F08N (709-728)		
	F09N (689-707)		
	F09S (111-121)		
	F10N (392-410)		
	F10S (122-129)		
	F11N (046-068)		
	F11S (150-160)		
	F12S (229-244)		

1.3.5 Trabajo De Campo

Para los recorridos dentro de la zona de interés y en el área de influencia de la misma, se hace énfasis en los puntos o zonas con amenaza de inundación determinados por el análisis de POT, análisis SIG (lógica difusa) y característica geomorfológicas y/o antrópicas; la información se lleva a una base de datos para su análisis en ArcGis 9.2. Se realizaron recorridos dentro de la zona de interés y en el área de influencia de la misma durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo del 2008 para obtener un total de 198 estaciones y 273 puntos críticos georeferenciados.

En este trabajo se detectaron puntos críticos con problemas de obras hidráulicas, basuras, invasión de causes con viviendas. Esta información se recopiló en la base de datos y en los mapas llevados para acompañar el recorrido

1.3.6 Propuesta metodológica: análisis con lógica difusa SIG Arc Gis 9.2 para determinar zonas susceptibles a inundaciones Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Se adoptó la metodología de lógica difusa y el método determinístico cuya elección estuvo fundamentada en la cantidad y calidad de información disponible y en el conocimiento tanto del fenómeno analizado como de la zona de estudio.

Para el análisis de la susceptibilidad a inundaciones desde una perspectiva de la lógica difusa, un territorio se zonifica con base en las apreciaciones y aportes de investigadores con experiencia y conocimiento del tema. Específicamente se usó la técnica de combinación cualitativa de mapas para lo cual se generó el mapa de amenaza por inundaciones lentas, rápidas y avenidas torrenciales

Para llevar a cabo este análisis se identificaron unas variables (formaciones superficiales, ángulo de la pendiente, forma de la pendiente, acumulación de flujo de agua), de las cuales se realizaron mapas temáticos para luego asignarles conjuntos difusos utilizando la herramienta Raster Calculator de ArcGis 9.2 (ArcMap), con la cual se pueden modelar los sistemas difusos (Kainz, 2007). Este se hace mediante una colección de funciones construidas en un ambiente numérico computacional que provee herramientas para crear y editar sistemas difusos de Inferencia. Una vez obtenidos los conjuntos difusos se realiza la unión de éstos para determinar zonas susceptibles a inundaciones en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La selección de la escala de representación cartográfica y modelamiento de susceptibilidad estuvo regida por la escala de las fuentes de datos (1:10000), por la calidad y cantidad de los mismos.

- **Cartografía Fuente** La información cartográfica fue suministrada por la firma de consultoría SOLINGRAL. Esta información incluye curvas de nivel cada 10 m y mapa de formaciones superficiales escala 1:10 000. Estas curvas de nivel se utilizaron para generar el Modelo de Elevación Digital (MDT) a partir del cual, mediante un análisis de superficie, se genera un mapa de pendientes, un mapa de curvatura, y un mapa de acumulación de flujos de agua.
- **Curvas de nivel** La capa de curvas de nivel suministrada corresponde a una escala 1:10 000 pero presenta problemas de edición, poco detalle y no está actualizada. Esto se debe tomar en cuenta pues entre menos detalle los resultados obtenidos presentarán un error mayor.
- **Modelo de Elevación Digital (MDT):** un Modelo de Elevación Digital representa una estructura raster en el que cada celda georeferenciada contiene la información de su cota o elevación, representando una superficie digital continua que corresponde a la superficie topográfica del terreno ver Figura 9.

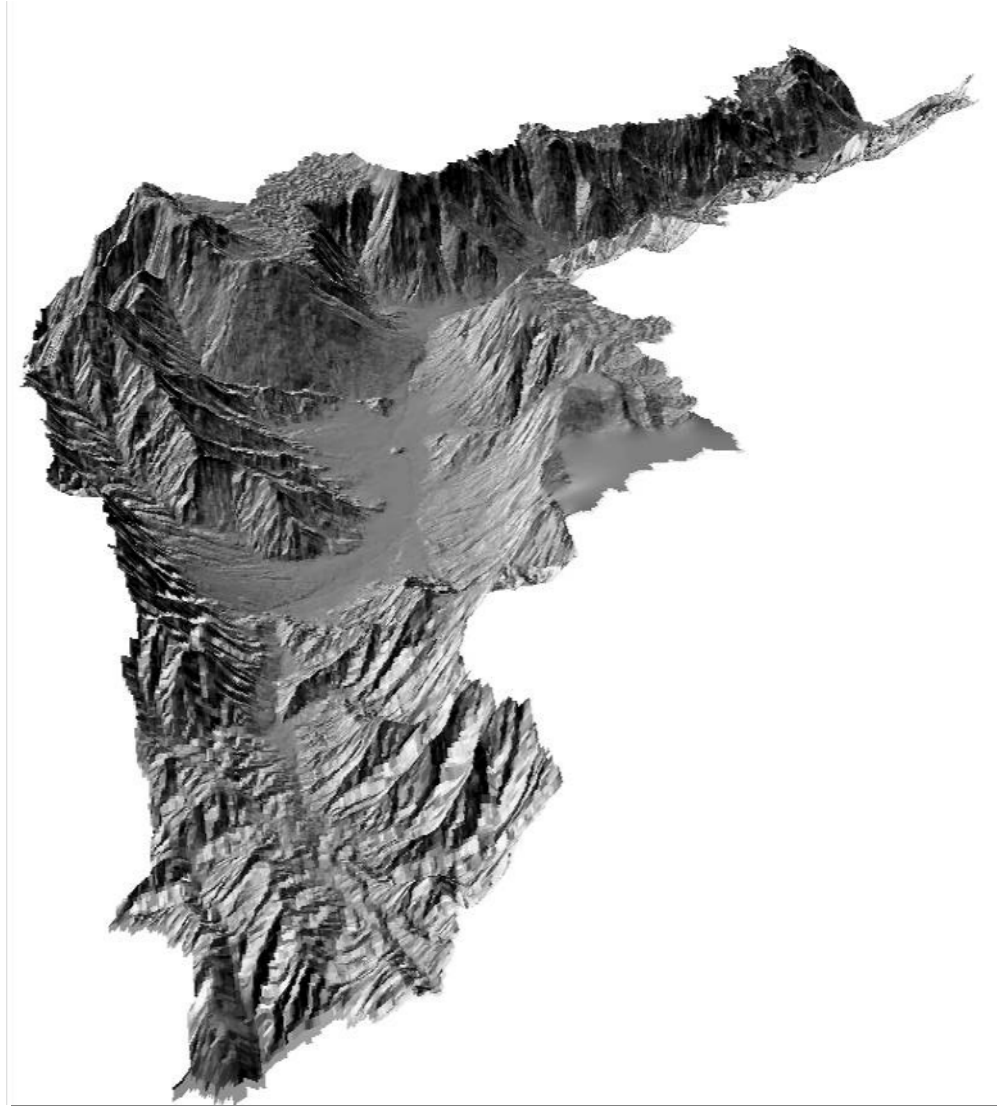


Figura 10 Modelo de elevación digital Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

El MDT, el cual constituye la base para el análisis de la superficie, se obtuvo mediante un proceso de transformación de la capa de curvas de nivel a TIN (red triangular) y luego a raster mediante ArcGis 9.2 con el módulo de análisis espacial 3D (3D Analyst Tool) para luego generar el mapa de pendientes, mapa de curvatura (concavidad) y la generación de matrices de dirección y acumulación de flujo.

El proceso para la obtención de los mapas de pendiente, curvatura y acumulación de flujos de agua en el sistema ArcInfo fue el siguiente:

- **Mapa de pendientes:** el análisis de pendientes se realizó mediante el estudio de superficie con el módulo de (Spatial Analyst de ArcToolbox) de ArcGis el cual arroja

el histograma de la Figura 10 donde se muestra que la pendiente promedio para la zona de estudio es de 19,8%, presenta un valor mínimo de 0% y un valor máximo de 78,4%.

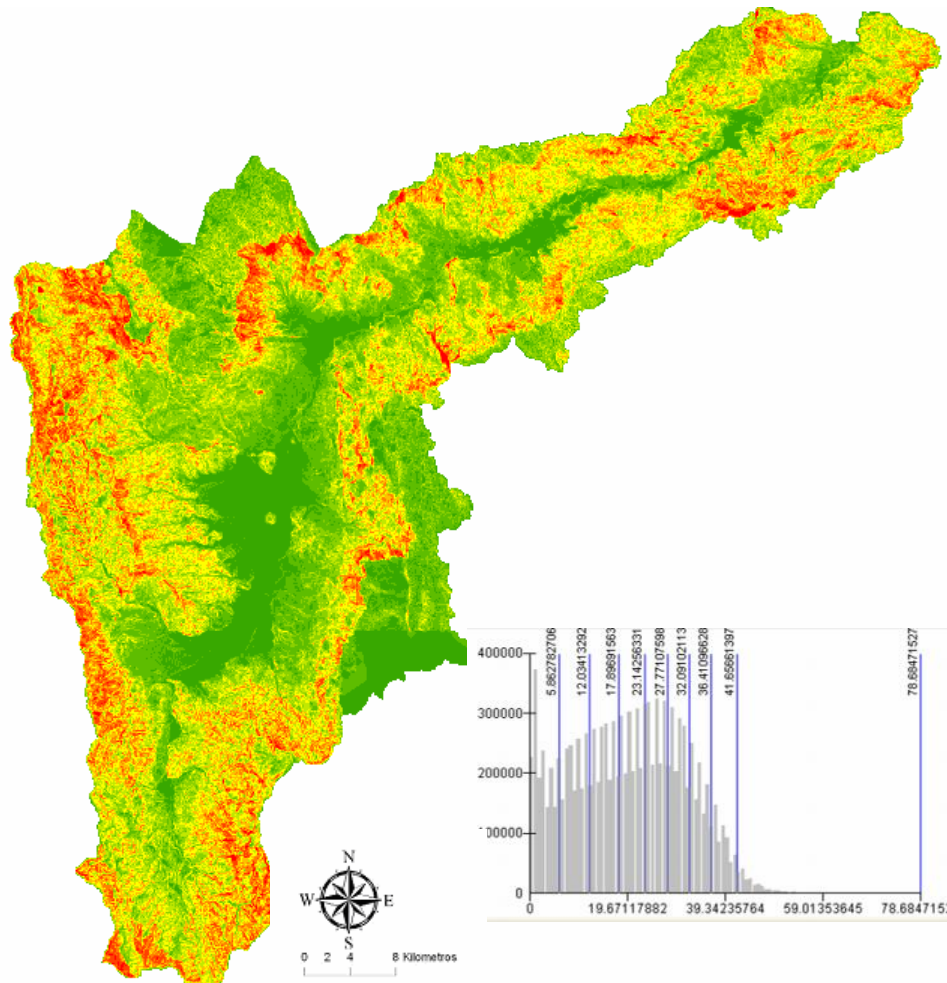


Figura 11 Mapa de Pendientes del Valle de Aburrá e histograma de pendientes.

- **Curvatura:** la curvatura de una superficie Raster es una variable cualitativa que se determina mediante el análisis de superficie en Arcgis con el modulo Spatial Analysis Tool Surface el cual determina zonas cóncavas (valores negativos), convexas (valores positivos) o planas (valores igual es a cero).
- **Acumulación flujos agua:** para determinar la acumulación de flujos de agua es necesario calcular primero la dirección de flujos de agua para posteriormente calcular las zonas acumulación.
 - **Dirección de Flujo de Agua:** Se determina aplicando al MDT el comando FLOWDIRECTION del análisis hidrológico del *Spatial Analysis tool Hidrology*)

de ArcGis 9.2. Dicha función define la dirección de flujo de una gota de agua en cada celda comparando el valor de la elevación de dicha celda con las elevaciones de las ocho celdas vecinas y le asigna un valor a la celda de acuerdo con la mayor diferencia de alturas (Figura 11):

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 12 Ejemplo de dirección de flujo, si la dirección del flujo de la celda central en cuestión es hacia la esquina superior izquierda, entonces en la matriz resultante dicha celda tendrá un valor de 32.

- **Acumulación flujos agua:** se determina aplicándole, al raster de dirección de flujos, el comando FLOWACCUMULATION del análisis hidrológico del modulo Spatial Analys Tool Hidrology de ArcGis. Esto genera una matriz de flujo acumulado para cada celda, calculando el total de celdas que fluyen hacia cada celda de la matriz.

Los parámetros de entrada son la matriz de dirección de flujo y una matriz de peso que representa el peso asignado a cada celda de la matriz. Así la matriz resultante es el número total de celdas que fluyen hacia cada celda por lo cual los valores altos muestran zonas de mayor acumulación.

- **Formaciones superficiales** Se seleccionó la información tomando en cuenta el detalle necesario según la escala de trabajo (1:10000) y buscando que fuese la más completa y actualizada. Debido al objetivo del análisis, sólo se seleccionaron los depósitos aluviales.

◆ **Herramienta**

Se realizó el análisis con lógica difusa, según Ortiz (2007), el cual fue seleccionado tomando en cuenta la calidad de la información disponible, el tipo de fenómeno analizado y las características de la zona de estudio.

◆ **Marco Conceptual**

La Lógica Difusa es una herramienta que proporciona un a manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta. Esta herramienta está basada en proposiciones que no cumplen con la ley de la media excluida de la lógica clásica, es decir, una proposición difusa no necesariamente es completamente falsa o completamente verdadera sino que puede tener valores intermedios.

El concepto clave para entender como trabaja la lógica difusa es el de conjuntos difusos,

definida por Méndez y Villegas, (2005) como la agrupación de varios elementos que poseen una característica común, pero que a diferencia de la lógica clásica, éstos no exigen la pertenencia absoluta de un elemento, sino que reconocen que no todos sus elementos poseen la característica en la misma magnitud. Un elemento puede pertenecer simultáneamente a varios conjuntos en diferente proporción siempre y cuando la suma de sus grados de pertenencia sea igual a la unidad. Este conjunto tiene una Función de Membresía (eje y) que sirve para definir el grado de pertenencia de un elemento x (eje x) a un conjunto difuso representada por $\mu_A(x)$, con dominio en el “Universo de Discurso”, que representa los números reales en los cuales toma valores la variable analizada, y rango en los números reales comprendidos en el intervalo cerrado $X = [0,1]$. Los elementos x dependen del criterio del experto que además define el rango de influencia de la variable teniendo un posible rango de valores al cual llamaremos U denominado Universo de Discurso.

Por ejemplo, supongamos que se desea representar con conjuntos difusos la variable ángulo de la pendiente, en este caso el universo de discurso será el rango de posibles valores de la pendiente que son susceptibles a inundaciones. Se elige un rango de pendientes $<5^\circ$ (Kainz, 2007) y para denominar los conjuntos difusos se suelen trabajar con etiquetas lingüísticas similares a las que se usan de manera coloquial por ejemplo, en la vida diaria decimos que una pendiente es mas Susceptible a Inundaciones (SI) y No Susceptible a Inundaciones (NSI). El universo de discurso $U_1 = [0, 5^\circ]$ y $U_2 = [5^\circ, >5^\circ]$ representan el rango de influencia de la variable pendiente para (SI) y (NSI) (Figura 12).

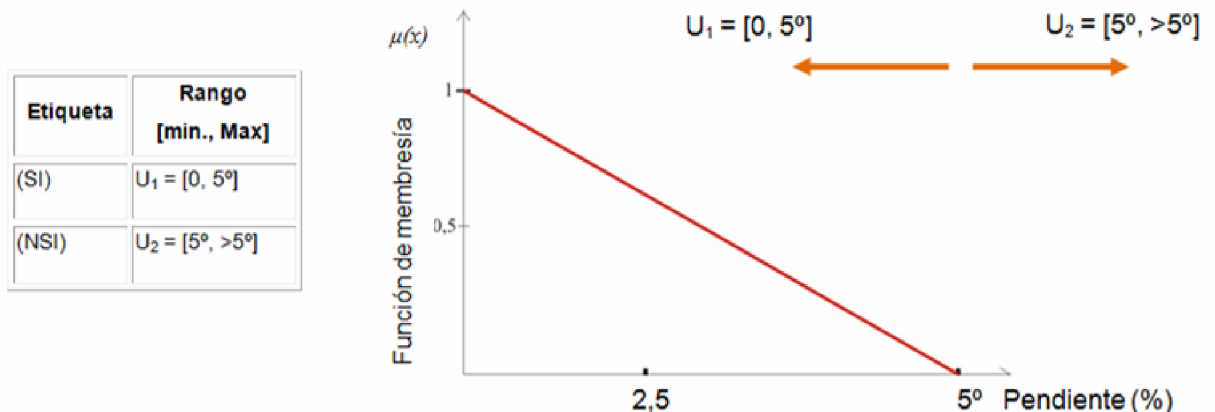


Figura 13 Conjuntos difusos para ángulo de la pendiente

◆ **Descripción del Modelo**

El primer paso consiste en la recopilación de la información para la elaboración de los mapas temáticos (formaciones superficiales, ángulo de la pendiente, forma de la pendiente y acumulación de flujo de agua) con el fin de construir un modelo capaz de inferir la susceptibilidad a inundaciones basado en variables cualitativas (lingüísticas) y cuantitativas; éstas últimas continuas y de carácter numérico, generadas a partir del MDT,

con valores vinculados a coordenadas geográficas (Tabla 5). Posteriormente se define un conjunto difuso para cada una de los mapas temáticos, donde se expresan cada una de las variables lingüísticas o numéricas.

Tabla 5 Descripción de los mapas temáticos utilizados con sus parámetros de condición para el modelo.

Mapas temáticos	unidad	Tipo*	Origen de datos	Descripción
Angulo de la pendiente	porcentaje	1	MDT	Porcentaje de la pendiente
Aspecto de la pendiente	porcentaje	1	MDT	Medida de la pendiente en grados positivos de 0 a 359.9 en el sentido del norte
Acumulación de flujos	píxel	1	MDT	Grilla de acumulación de flujo en cada celda. Los valores altos para áreas de concentración del flujos
Formaciones superficiales	clases	2	Mapa geológico, bibliografía	Formaciones superficiales de depósitos aluviales

*Tipo 1 variables cuantitativas, Tipo 2 variables cualitativas.

Para el análisis de la susceptibilidad a inundaciones desde una perspectiva de la lógica difusa, un territorio se zonifica con base en las apreciaciones y aportes de investigadores con experiencia y conocimiento del tema. Específicamente se utilizó la técnica de combinación cualitativa de mapas para lo cual se generaron mapas temáticos. A cada mapa temático se le asignó un peso indicativo de su grado de importancia según la opinión de expertos. Esta metodología fue aplicada por Juang *et al.* (1998) el cual desarrolló un sistema de evaluación cuantitativo para analizar la estabilidad de pendientes en una zona de Hong Kong basado en lógica difusa; por su parte Saboya *et al.* (2006) aplicó este tipo de análisis a una zona urbana de Itaperuna en Río de Janeiro, Brasil y Ortiz (2007) en una zona urbana del municipio de Medellín.

♦ **Aplicación del modelo: análisis difuso e integración de la información**

Durante el análisis e integración de la información, se tomaron las capas temáticas que a criterio del experto tienen más influencia. Se determina si es una variable cualitativa o cuantitativa para luego definir el universo del discurso a cada una de las etiquetas definidas con el fin de definir el conjunto difuso a cada una de las capas temáticas.

Para integrar la información en SIG ArcGis se definen los conjuntos difusos para cada uno de los mapas temáticos utilizados en la zona de estudio. De esta manera, las capas temáticas son las siguientes:

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- **Ángulo de la pendiente:** Este conjunto difuso fue definido en el marco conceptual, se desarrollo el conjunto difuso en ArcGis y se obtuvo la figura 7 que representa las zonas más oscuras como las más susceptibles a inundaciones. El análisis difuso arroja un rango de partencia de 0 a 100%, es decir entre más oscuro más susceptible a inundación es la zona ver Figura 13.

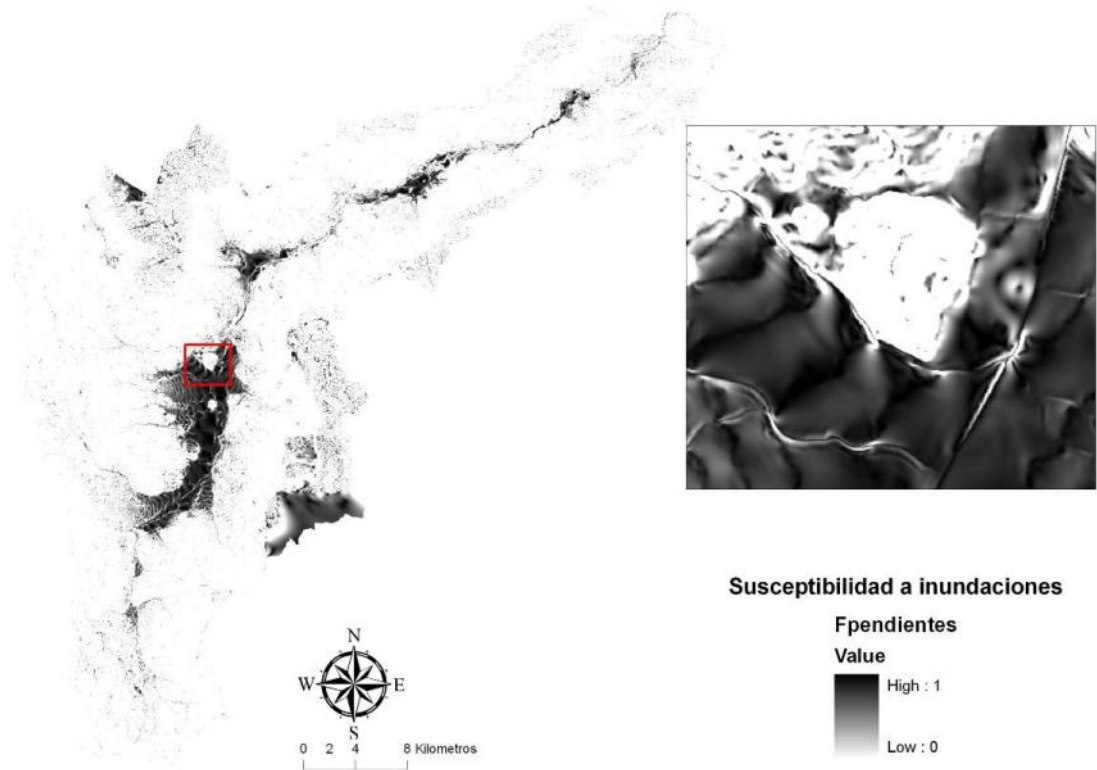


Figura 14 Mapa difuso de pendientes, entre más oscuro más susceptible a inundación

- **Forma de la pendiente** Las pendientes cóncavas y planas retienen más agua (más inundables) que pendientes convexas. Aunque esto depende también de las características de la litología y del suelo, en este caso el universo de discurso será el rango de posibles valores de pendiente cóncava, convexa o plana que pueden retener mayor cantidad de agua y mas susceptibles a inundaciones a las cuales se le asignaron las siguientes etiquetas Muy Retenedor (MR) y Retenedor (R) se representan en la Figura 14.

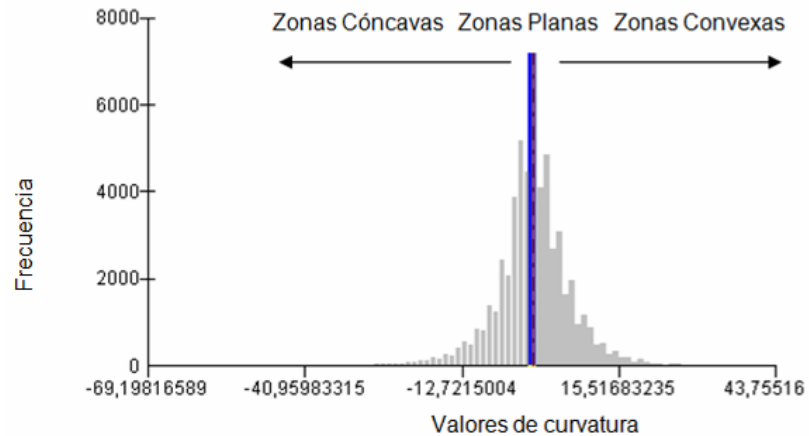


Figura 15 Histograma que representa los diferentes valores obtenidos en Arcgis para el cálculo de la curvatura.

Los universos de discursos se representan de la siguiente manera en la Figura 15

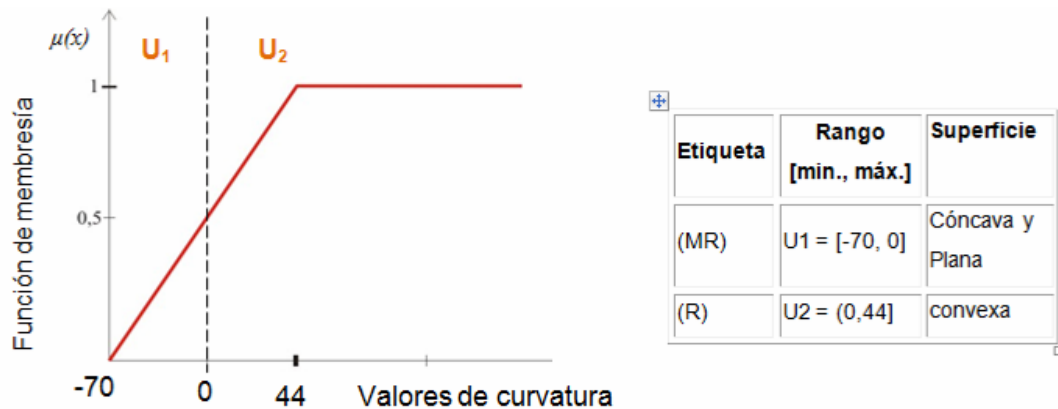


Figura 16 Representación del conjunto difuso para la curvatura.

El ingreso del conjunto difuso en ArcGis se hace mediante el modulo *Raster Calculator* con la función condicional que define cada rango (U_1 , U_2) con una ecuación para la variable (curvatura) para generar el mapa de la Figura 16 el cual representa las zonas claras como zonas cóncavas y las más oscuras convexas. El análisis difuso arroja un rango de pertenencia de 0 a 100%, es decir entre más oscuro más susceptible a inundación es la zona.

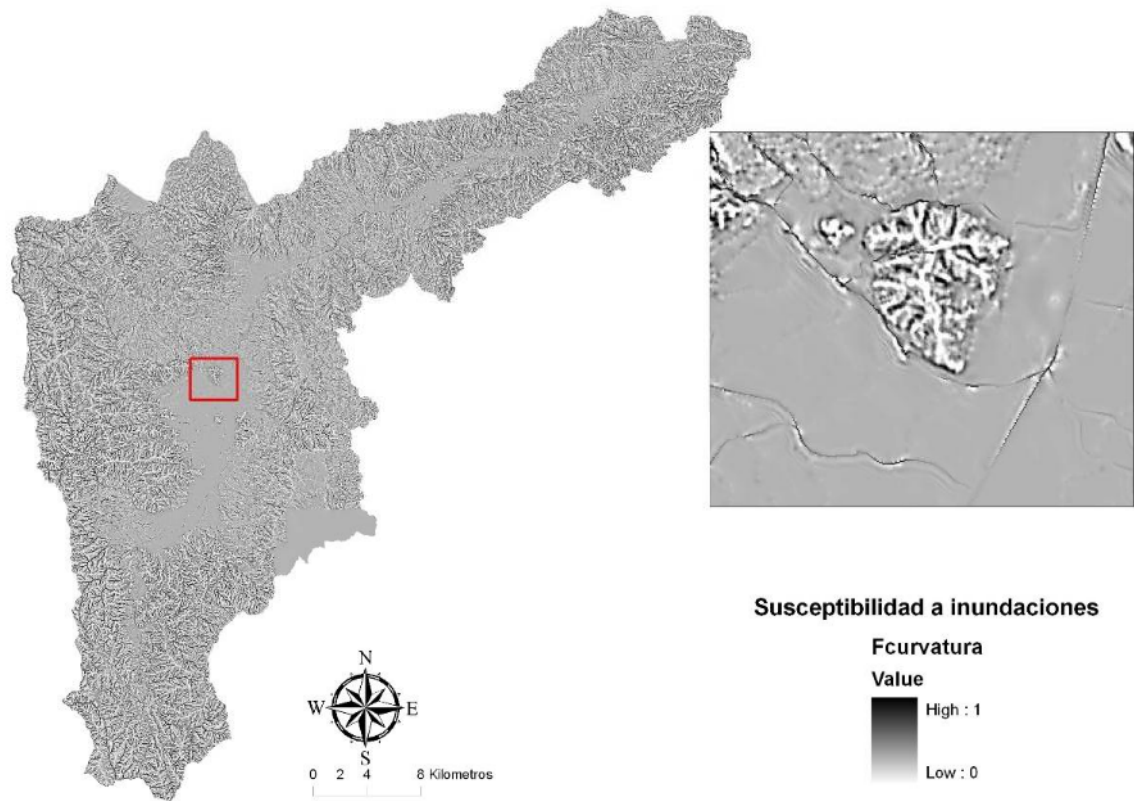


Figura 17 Mapa difuso curvatura (concavidad o forma de la pendiente). Mientras más oscuro mayor susceptibilidad a la inundación.

- Acumulación de flujos de agua: Constituye el peso acumulado en una celda determinada de todas celdas que fluyen pendiente abajo hacia la misma. De este modo es posible conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda dada Figura 17.

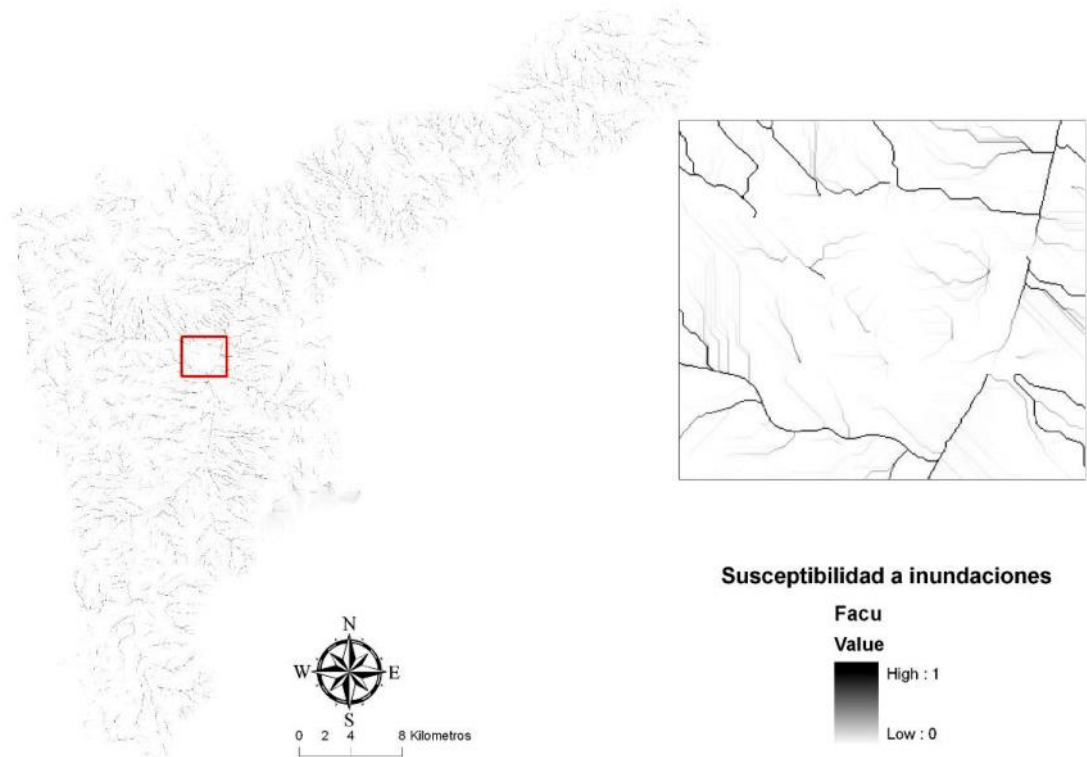


Figura 18 Zonas de acumulación de flujos de agua obtenidas mediante lógica difusa para la acumulación de aguas correspondientes a un sector del Área Metropolitana.

- Formaciones Superficiales Variable cualitativa, en este caso el universo del discurso será el rango de posibles valores de materiales que presentan mayor susceptibilidad a inundaciones. SOLINGRAL (2007) determina dos tipos de formaciones superficiales (flujos de lodos y depósitos aluviotorrenciales y aluviales utilizados para generar el conjunto difuso de la Figura 18.

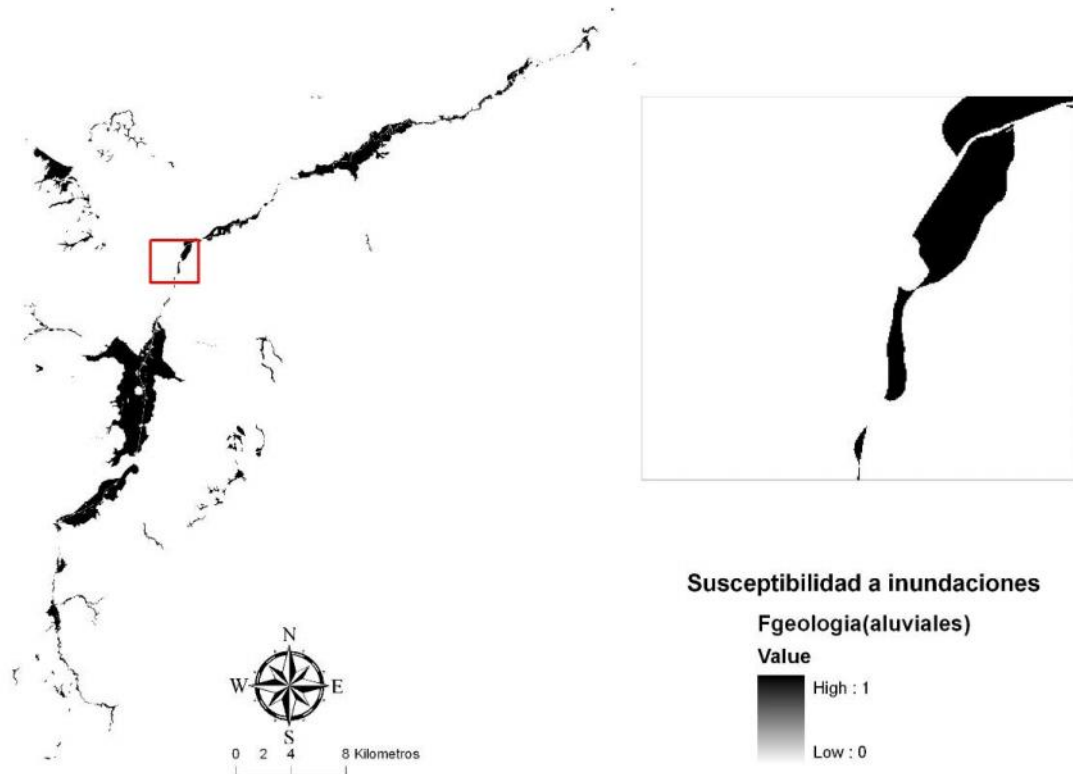


Figura 19 Mapa difuso para Formaciones Superficiales

◆ **Resultados de la Aplicación de Lógico Difusa en Plataforma SIG para generar un Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones**

Una vez obtenidos los mapas temáticos, estos son combinados utilizando la operación “unión de conjuntos difusos” mediante el álgebra de mapas de Arcgis con la herramienta *And* para obtener el Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá el cual contiene manchas de inundación con valores de 0 a 100, con 0 para zonas no susceptibles a inundaciones y 100 para zonas muy susceptibles a inundación.

El mapa obtenido con el análisis difuso muestra como las zonas más susceptibles a inundación lenta corresponde a la planicie del río Medellín, además de presentarse otras zonas en los cambios de pendiente cerca de las planicies (Figura 19)

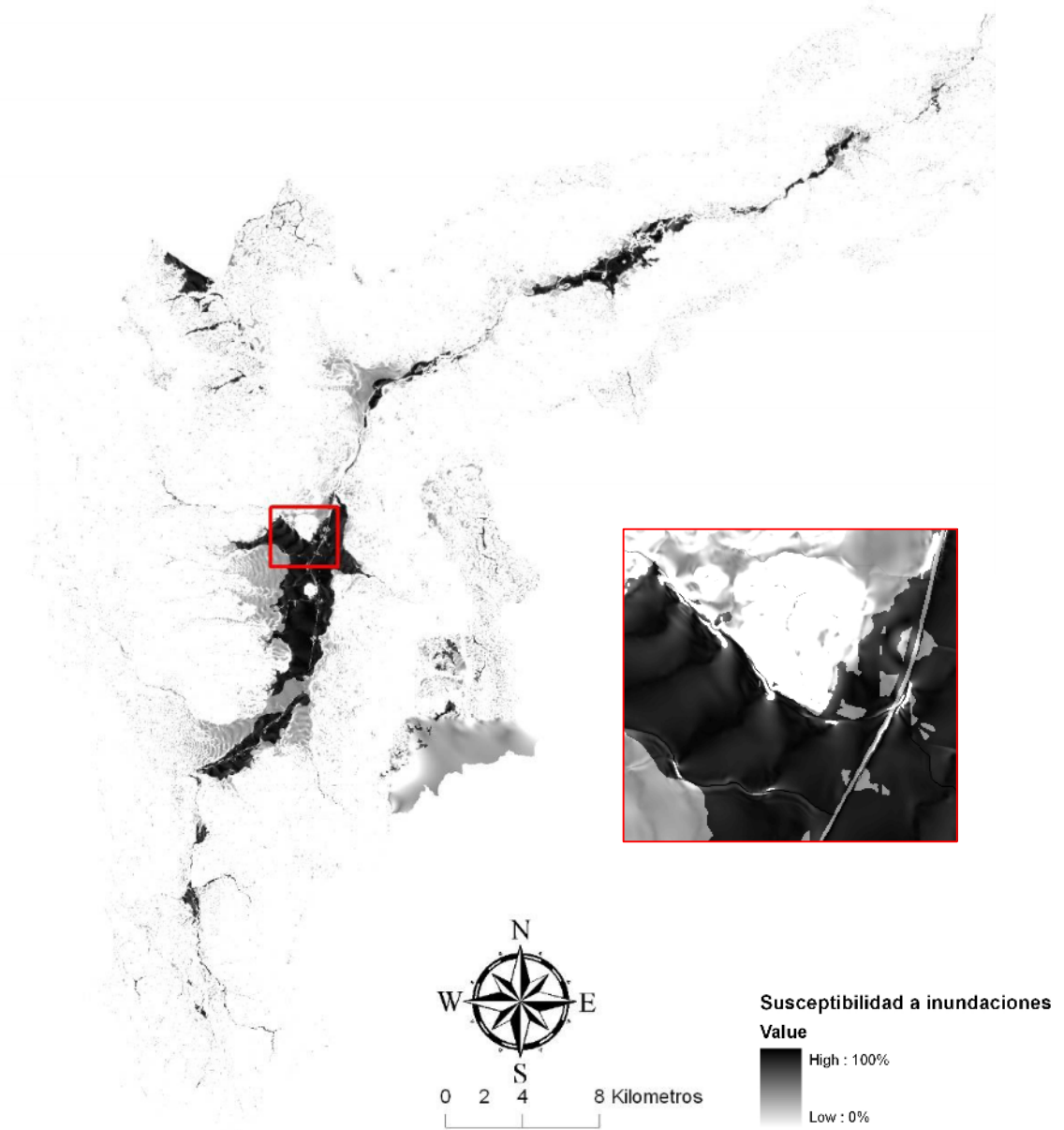


Figura 20 Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones; mientras más oscuro más susceptible a inundaciones. En el recuadro se observa un detalle mayor en el Corregimiento de San Antonio de Prado

Debido al carácter regional del tipo de análisis implementado y al nivel de detalle suministrado por el Modelo Digital de Elevación MDT producto de las curvas de nivel, las manchas de inundación obtenidas corresponden a zonas muy amplias no acordes con la

realidad, sin embargo útiles para hacer una aproximación de las zonas más susceptibles delimitando así la zona donde es necesario realizar los análisis geomorfológicos más detallados.

El limitado número de variables utilizadas (pendientes, curvatura, acumulación flujos de agua y formaciones superficiales) genera que las manchas de inundación son más extensas que las reales. Para mejorar los resultados se pueden utilizar otras variables como uso del suelo; caracterizar mejor los depósitos aluviales para discriminarlos según la edad y un realizar ajuste de los estudios existentes aunado a un trabajo de campo en zonas críticas representativas para obtener un mejor resultado. Este último paso se realizará con la metodología determinística enfocada en la geomorfología.

La variable que produce las mayores manchas de inundación y genera un mayor error corresponde a las formaciones superficiales mientras que la curvatura, las pendientes y la acumulación de flujos de agua si se consideran adecuados para la escala de trabajo.

Debido al carácter regional del resultado, los análisis obtenidos con la metodología de SIG no son tenidos en cuenta como resultado final pero son utilizados para enfocar el análisis geomorfológico en determinadas zonas y así optimizar el trabajo de campo donde se realiza la verificación de manchas de inundación.

Un problema para este tipo de análisis es que en el mapa de formaciones superficiales los depósitos no se discriminan según su edad lo que genera zonas de susceptibilidad a inundaciones mayores a las reales, pues los depósitos antiguos no se deben tener en cuenta para este tipo de análisis.

La cartografía base no es lo suficientemente detallada para este tipo de análisis por lo cual se recomienda utilizar cartografía base con curvas de nivel cada 2 o 5 metros para mejorar los resultados.

1.4 RESULTADOS

1.4.1 Análisis general de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá

Según el AMVA (2007), las condiciones de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá están definidas principalmente por los aspectos fisiográficos, climáticos y de intervención social y económica propios de la región

La avenidas torrenciales e inundaciones rápidas son las que suelen generar mayores daños debido a su fuerte intensidad y capacidad destructiva y al hecho de ser instantáneas, lo cual genera que el tiempo de reacción ante este tipo de fenómenos sea prácticamente nulo y por ende pone en peligro la vida de las personas ubicadas en su área de influencia (INETER y COSUDE, 2005). Por su parte, las inundaciones lentas, pueden llegar a afectar una zona mucho mayor y por más duración, pero su poder destructivo es mucho menor, ya que da tiempo para reaccionar y su efecto es un aumento lento del nivel de las aguas en las zonas afectadas, lo cual puede llegar a afectar propiedades y bienes, pero, excepto en muy contadas ocasiones, no pone en peligro la vida de las personas ubicadas en su área de influencia.

A pesar que las inundaciones y las avenidas torrenciales tienen un fuerte componente natural como lo son la precipitación, las condiciones de escorrentía y la capacidad hidráulica de los cauces para transportar los caudales generados naturalmente, la fuerte intervención antrópica en los cauces y sus alrededores, han generado cambios, muchas veces drásticos, en la dinámica natural de las corrientes, lo que se traduce, en la mayoría de las ocasiones, en un aumento de la amenaza (AMVA, 2007).

Como se explicó en la descripción metodológica, la delimitación de las zonas expuestas a estas amenazas se realizó basándose en criterios geomorfológicos el cual no establece un límite físico preciso entre inundaciones y avenidas torrenciales ya que en muchos casos, las avenidas torrenciales se transforman en inundaciones rápidas y lentas en las partes bajas de la vertiente (Parra, en preparación). De ahí que las áreas bajas de las zonas de amenaza por avenida torrencial, presenta en la mayoría de los casos una zona de inundación lenta en su base.

El análisis de la amenaza tanto por inundación es lentas como por avenidas torrenciales e inundaciones rápidas, incluyó el establecimiento de puntos críticos los cuales deben ser monitoreados constantemente. Estos puntos fueron establecidos según diversos criterios que incluyen:

- Cambio drástico en la morfología del cauce y geometría del canal de un drenaje.
- Presencia constante de abundantes escombros o basuras que pueden llegar a bloquear el cauce y generar un desbordamiento .
- Obras con insuficiencia hidráulica ante caudales extremos o con obras en mal estado que pueden llegar a colapsar y obstaculizar el cauce .
- Zona de entrada de un drenaje a la zona urbana, donde las condiciones hidráulicas cambian repentinamente, disminuyendo en muchas ocasiones la capacidad hidráulica de la quebrada.

1.4.2 Análisis de la Amenaza por Inundación Lenta en el Valle de Aburra

Del mapa de Amenaza por Inundación Lenta se puede concluir que las zonas más amplias se encuentran asociadas a la llanura de inundación del Río Medellín, especialmente al norte del Valle donde el cauce es más amplio y no está canalizado ya que en la zona central, hacia el Municipio de Medellín, la mayor susceptibilidad está restringida a una franja más estrecha debido que el cauce está canalizado.

Además de la zona cercana al río Medellín, se encuentran pequeñas áreas con amenaza por inundación lenta asociadas a varias quebradas del Valle, las cuales se caracterizan por presentar zonas de pendiente baja la cual favorece la acumulación de agua en el caso de un aumento excesivo de caudal.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Dentro de las quebradas con amenaza por inundación lenta en el Valle de Aburrá se destacan en cada municipio (ver Figura 21, mapa de inundaciones del valle de aburrá y anexo v-01):

- Caldas: Quebradas La Miel, La Valeria, Mandalay, La Corrala, La Corralita, La Chuscala y La Salada.
- La Estrella: Quebradas La Ospina, La Chocha, La Grande, La Chispa 1 y 2, La Bermejala, La Llorona, La Culebra, La Raya, San Miguel, Miraflores , La Chocolatea, La Estrella, La María, La Sillera, San Martín .
- Sabaneta: Quebradas La Doctora, Sabanetica, La Honda, Cien Pesos
- Itagüí: Quebradas Doña María, La Tablaza, La Muñoz, La Jabalcona, La Llorona, La Justa, La Sesteadero, Olivares, La Arenala.
- Medellín: se divide en zona urbana y zona rural correspondiente a los corregimientos
 - Zona Urbana: Quebradas, Río Medellín, La Iguañá, La Madera, La Guayabala, Altavista, La Picacha, La Hueso, El Chumbimbo, La Quintana, , La Seca, La Tinajita, La Honda, La Presidenta, La Poblada, La Aguacatala, La Cangreja, La Gallinaza, La Pastora, La Castro, Aguadita , Chorro Hondo, El Zancudo, La Rosa, La Bermejala, La Maquinita, La Chorrera, La Loca, El Ahorcado, El Molino, Juan Bobo, Santa Ana, El Burro, La Minita, Cantera o Culantrillo, La Quintana, La Malpaso, La Mononga, La Pabón.
 - San Antonio de Prado: Quebradas Doña María, La Limona La Manguala, La Cabuyala, El Buey, Chorro Hondo, La Candela, La Macana .
 - Palmitas: Quebradas La Lejia, La Volcana, La Frisola .
 - Altavista: Quebradas Ana Díaz, Aguas Frías – La Picacha, Altavista, La Jabalcona; La Guayabala, La Pabón .

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

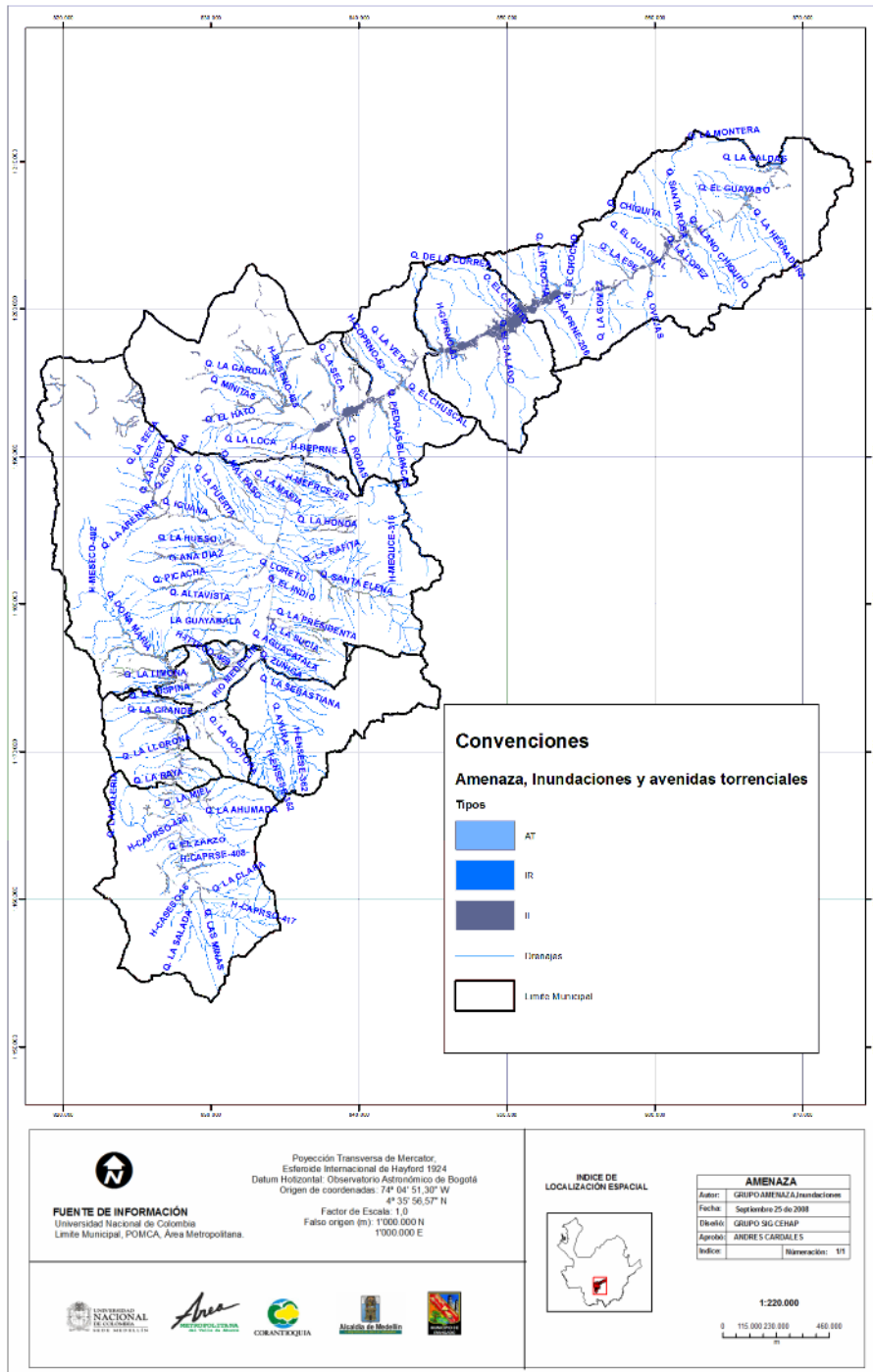


Figura 21. Mapa de Amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales del Área Metropolitana del valle de Aburrá .

- San Cristóbal: Quebradas La Iguaná, La San Francisca, La Corcovada, La García, Las Brujas, La Hondita, Agua Fría, El Li món, El Uvito, El Pato, La Palma, La Potrera, La Loma, La Leonarda La Salada, Quebrada La Hueso, Quebrada La Leonarda, Quebrada La Pelahueso, Quebrada La Quebra, La Mina y La Honda.
- Santa Elena: Quebradas Santa Elena, La Salada, La Espadera, Los Yarumos, La Seca, Cañada Negra, El Chupadero, La Presidenta, La Aguacatala, La Cangreja, La Pastora, Chorro Hondo, El Zancudo, La Rosa, La Bermejala, La Maquinita, La Chorrera, La Castro y Cañada Negra o Seca.
- Bello: Quebradas El Hato, La García, La Loca, La Montañita, La Seca.
- Copacabana: Quebradas Piedras Blancas, El Chuscal, Gusimal, La Tolda, El Mojón, Las Catas, La Azulita, La Puente, La Rodas, La Temería.
- Girardota: Los Ortegas, La Correa, El Calmito, Barbascal, El Salado, El Tábano, La Sopera, El Matadero.
- Barbosa: La López, Platanillo, La López, La Honda, El Niño, Aguas Calientes, Los Gallinazos o El Peñasco, Cestillal, La Sopera.

1.4.3 Análisis de la Amenaza por Avenidas Torrenciales e Inundaciones Rápidas en el Valle de Aburra

Como se planteo anteriormente, no hay suficiente información técnica para definir con exactitud las corrientes torrenciales del Valle de Aburrá, por lo cual se parte de la base que por las características geomorfológicas y climáticas del Valle, todas las quebradas son susceptibles a presentar avenidas torrenciales.

A pesar de lo anterior, se seleccionaron las quebradas con mayor posibilidad de presentar una avenida torrencial o inundaciones rápidas según criterios que incluyen: presencia de abundantes bloques en el cauce, lo cual se interpretó como un indicativo básico de actividad torrencial previa; morfología del drenaje con cambios bruscos de pendiente; longitud del drenaje, ya que se consideró que a mayor longitud del drenaje en la zona de pendiente fuerte, más posibilidad de presentarse obstrucciones de su cauce; conocimiento de eventos previos, reportados por entidades o por vecinos de la zona, entre otros.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Dentro de las quebradas con amenaza por Avenidas Torrenciales e Inundaciones Rápidas en el Valle de Aburrá se destacan en cada municipio:

- Caldas: Quebradas La Miel, La Romera, La Valeria, Mandalay, La Corralita, La Chuscala y La Salada.
- La Estrella: Quebradas La Ospina, La Chocha, La Grande, La Chispa 1 y 2, La Bermejala, La Llorona, La Culebra, La Raya, San Miguel, Miraflores .
- Sabaneta: Quebradas La Doctora, Sabanetica, La Honda, Cien Pesos .
- Itagüí: Quebradas Doña María, La Tablaza, La Muñoz, La Jabalcona, La Llorona, La Justa, La Sesteadero, Olivares .
- Medellín: se divide el municipio en zona urbana y rural correspondiente a los corregimientos.
 - Zona Urbana Quebradas La Iguaná, La Madera, La Guayabala, Altavista, La Picacha, La Hueso, La Quintana, La Tinajita, La Honda, La Presidenta, La Poblada, La Castro, Chorro Hondo, El Zancudo, La Rosa, La Bermejala, La Loca, El Ahorcado, El Molino, Juan Bobo, Santa Ana, El Burro, Cantera o Culantrillo, La Quintana, La Malpaso, La Mononga, La Pabón.
 - San Antonio de Prado: Quebradas Doña María, Caño Naranjitos, Chorro Hondo, La Manguala, La Candela, La Macana, La Chorrera .
 - Palmitas: Quebradas La Volcana, La Lejía, La Miserenga.
 - Altavista: Quebradas Ana Díaz, Aguas Frías – La Picacha, Altavista, La Guayabala.
 - San Cristóbal: Quebradas La Iguaná y parte alta de las quebradas de pendiente fuerte y encañonadas.
 - Santa Elena: Quebradas Santa Elena, Santa Bárbara, La Presidenta, La Poblada.

- Bello: Quebradas El Hato, La García, La Loca, La Montañita, La Seca .
- Copacabana: Quebradas Piedras Blancas, El Chuscal, Gusimal, La Tolda .
- Girardota: Los Ortegas, La Correa, El Calmito, Barbascal, El Salado .
- Barbosa: La López, aguas Calientes, Platanillo, La López, La Honda , aguas Calientes.

1.4.4 Validación de Resultados

Como seguimiento a este estudio se ha guiado un proceso de evaluación mediante el trabajo de campo con un detallado análisis de zonas y puntos críticos para amenaza a inundaciones lentas, rápidas y/o avenidas torrenciales para cada municipio. Validando las zonas con amenaza determinados por el análisis de lógica difusa en SIG y las fotografías aéreas

1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Dentro de las dificultades encontradas durante la realización de este proyecto para determinar la amenaza por inundaciones y avenidas torrencial se destaca la baja calidad de la información cartográfica a nivel del Valle de Aburrá, ya que aunque los municipios en general poseen una buena cartografía digital, no existe una cartografía actualizada de toda el Área que contenga una capa de drenajes de buena calidad.

Se cuenta con más de diez versiones de capas de drenajes para el Valle de Aburrá, pero todos presentan falencias que incluyen: desplazamientos respecto a las curvas de nivel por lo cual se pueden presentar drenajes que pasen sobre los filos de una montaña, nombres incompletos y desactualizados de los principales drenajes, trayectoria simplificada e incompleta de los drenajes, ausencia de drenajes secundarios, entre otros.

Otra dificultad encontrada durante el trabajo de campo era que a pesar de que se han hecho muchas campañas para señalar las principales cuencas del Valle de Aburrá, hay muchos drenajes sin ninguna señalización o en otros casos, presentan nombres diferentes a los definidos en la cartografía, e incluso a los nombres que utilizan las personas que viven en los alrededores del drenaje.

Gran parte del análisis de las zonas susceptibles a presentar este tipo de amenazas se realizó por interpretación de fotografías aéreas. Al respecto también se presentaron varias dificultades ya que a pesar que la mayoría de los municipios se mostraron solícitos a prestar la información y fotografías necesarias para este estudio, algunas entidades no se mostraron dispuestas a colaborar o presentaron exigencias muy altas para poder acceder a la información, la cual además presentaba niveles heterogéneos de calidad.

Ya que este proyecto se inició antes del cambio de mandato, esto presentó otros inconvenientes ya que el proyecto y la solicitud de información se tuvo que presentar en dos ocasiones a cada municipio, lo cual generó un atraso considerable en las diferentes actividades del proyecto que dependían de esta información.

En cuanto a la gestión del riesgo se decidió que no se censarán las zonas con amenaza por inundaciones lentas debido a su bajo poder destructivo y el hecho de que usualmente permite un alto tiempo para reaccionar. Por el contrario, las zonas de amenaza por avenidas torrenciales e inundaciones rápidas se van a censar en su totalidad debido a su alta potencia de daño y a pesar de su baja recurrencia.

2. CONCLUSIONES

- Varias de las principales cuencas del Valle de Aburrá presentan zonas con alta susceptibilidad a las inundaciones y/o avenidas torrenciales debido a la interacción de múltiples factores, tanto naturales como antrópicos.
- El déficit de información instrumental (datos hidroclimáticos: lluvias acumuladas, vientos, insolación anual, caudales máximos, etc.) ofrece un obstáculo al momento de aplicar métodos hidrometeorológicos de carácter estadístico, por lo tanto, los métodos determinísticos brindan argumentos válidos y aplicables al momento de evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia del evento, ya que este constituye un método subjetivo fundamentado en el conocimiento previo, el levantamiento de éste y la evaluación y compilación de información secundaria.
- Debido a la heterogeneidad de la calidad de la información solo fue posible realizar mapas de amenaza por inundación y por avenidas torrenciales escala 1: 10.000. Para Medellín se presenta la información a escala 1:5.000 pero con el mismo nivel de incertidumbre a que se ha hecho referencia antes.
- Los sitios puntuales con probabilidades de inundación o avenida torrencial, son el resultado del análisis y recopilación de información secundaria, dentro de las que se cuentan tesis universitarias, planes integrales de ordenamiento de microcuencas-PIOM, entre otros informes específicos a cada quebrada, acompañado de un trabajo de fotointerpretación y verificación de campo.
- Las manchas de inundaciones y avenidas torrenciales producto de este estudio permiten ver cuáles son las zonas o puntos críticos que requieren cuidado para la atención y prevención de los fenómenos mediante soluciones de tipo ingenieril y medidas no estructurales referidas a la educación y cambios en la normativa y regulación del uso del suelo.
- Del trabajo de campo se determinó que los factores que agravan las inundaciones son la falta de infraestructura adecuada, el retraso hidráulico y el crecimiento elevado de la población. Además de los factores sociales y económicos que se relaciona con los niveles de organización e institucionalización.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- La falta de mantenimiento del sistema de desagües, obras hidráulicas y los obstáculos al escurrimiento del agua son causantes de inundaciones y/o avenidas torrenciales, así como la falta de control en la disposición de la basura.
- Las lluvias son un desencadenante importante para las inundaciones y/o avenidas torrenciales.
- En la zona rural las malas prácticas de agricultura y las canalizaciones aumentan el escurrimiento de agua generando problemas de inundación.
- Debe mejorarse la información básica en todos sus aspectos que incluyen:
 - Capas temáticas (Uso del suelo, lluvias, geomorfología, geología, etc.)
 - Métodos de observación
 - Métodos de procesamiento y análisis
 - Disponibilidad y acceso a la información

3. RECOMENDACIONES PARA GESTIÓN

- Es fundamental establecer una red de pluviómetros para todas las cuencas torrenciales del Valle de Aburrá, para poder tener registros en tiempo real de la intensidad y magnitudes de las precipitaciones.
- Se recomienda hacer una cartografía detallada de los llenos recientes que incluya un análisis de la calidad geotécnica de los mismos, especialmente los ubicados en los márgenes de las quebradas y del río.
- Mejorar el levantamiento de mapas y metodologías utilizadas para determinar amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales, con el fin de tomar medidas ante una situación de emergencia y así diseñar planes de acción locales encaminados a determinar intervenciones estructurales y no estructurales para reducir la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.
- Mejorar la cartografía base con el fin de obtener mejores modelos mediante análisis SIG que sirven de apoyo para cualquier análisis de amenaza. En especial el uso del suelo que no está estructurado para el Valle de Aburrá.
- Acciones como mejoramiento y construcción de obras hidráulicas, el aumento de parques y la recuperación de áreas inundables para actividades recreativas.
- Institucionalizar el mapa de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que incorpore todos los estudios que se realicen en el futuro con el fin de estandarizar los criterios para la elaboración de mapas de amenaza.
- Crear una base de datos con todos los eventos registrados a partir de la fecha, georeferenciados y levantados por un experto, ya que éste es la base para cualquier estudio de amenaza.
- Realizar talleres participatorios que involucren la población afectada y la institucionalidad con el fin de buscar una articulación entre éstos.
- Comunicación y difusión de la información sobre el mapa de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales a los actores involucrados, información que debe constituirse, además, en un insumo para la toma de decisiones.
- Implementar soluciones accesibles mediante técnicas de mitigación a base de materiales prácticos de fácil acceso dentro de la misma zona afectada, como: barreras de piedra en las márgenes, presas en las corrientes a fin de tomar agua para regar o para otros usos como el recreativo, cubierta de árboles tumbados puestos a lo largo de las márgenes, deflectores de la corrientes ubicados en puntos estratégicos, entre otros controles de fácil construcción.

4. BIBLIOGRAFIA

- A.G.S. (Andean Geological Services). 2006. Formulación del Plan de Manejo de la Microcuenca de la Quebrada La Quintana, Zona Noroccidental de Medellín. Alcaldía de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Contrato No. 4700020398 de 2005
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), 2008. Base de datos "Desinventar". Red Riesgos. Base de eventos recopilados desde abril de 1880 hasta Noviembre de 2007.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), CORANTIOQUIA, CORNARE y Universidad Nacional de Colombia. 2007. Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (POMCA) Aspectos Principales. 238 p.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). 2007. Diseño del Sistema Metropolitano para la Prevención, atención y recuperación de desastres en el Valle de Aburrá. 148 p.
- Aristizabal, J.C., 2007. Estudio de los factores geológicos y geomorfológicas que inciden en la generación de avenidas torrenciales, en la cuenca de la quebrada El Barro Municipio de Bello. Tesis de Grado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Barbeito, O., Beltramone, C. y Ambrosino, S. 2008. La geomorfología en la predicción de inundaciones extremas frente al cambio climático global. Fecha de consulta: febrero 2008. En línea: <http://libnet.unse.edu.ar/Rhid/T/09002.PDF>.
- Bloom, A.L. 1991. Geomorphology: a Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall. 352 p.
- Bruneton, H., Arnaud-Fassetta, G., Provansal, M., Sistach, D. 2001. Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman period in the lower Rhone valley (southern France). En: Catena, vol. 45. p. 287-312.
- Caballero, H. y 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. En: Memorias 2da Conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburrá. Medellín.
- Cadavid, M.F. 2001. Análisis de los fenómenos asociados al aguacero torrencial del 29 de mayo de 2000. Municipios de La Estrella y Sabaneta, Antioquia. Tesis Universidad EAFIT. 128 p.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- Castro, J. A. 2007. Deslizamientos y Avenidas Torrenciales. En: Cosmos, Año 10, No. 41, Agosto 2007. p. 3.
- Chorley, R.J., Schumm, S.A. & Sugden, D.E., 1984. Geomorphology. London: Methuen, 605 p.
- Correa, A. 1988. Análisis geomorfológico del evento de la quebrada La Hueso el 20 de octubre de 1984 y su significado para planificadores de obra en el Valle de Aburrá. En: Memorias 2da Conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburra. Medellín.
- Costa, J.E. 1988. Rheologic, Geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flow. En Flood Geomorphology. Editores: Baker, V. R., Kochel, R. C. y Patton, P.C. John Wiley & Sons, Inc., p 113-122.
- Coussot, P. y Meunier, M. 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. En: Earth-Science Reviews, vol. 40, p. 209-227.
- Delgado, J. E., 1995. Identificación de zonas de riesgo por fenómenos naturales en el municipio de Bello. Departamento Administrativo de Planeación y Servicios Técnicos Municipio de Bello.
- Díaz-Onofre, O. 2008. Fundamentos de la Hidráulica de Huaycos. Fecha de consulta: enero 2008. En línea: es.geocities.com/donpedro10/huayco/huaycosi.pdf .
- Durán, J.J., Elízaga, E., Garzón, G., Lamas, J.L., Lendínez, A., Prieto, C. 1985. Geología y prevención de daños por inundaciones. Instituto Geológico Minero de España. 421 p.
- Espíritu, G. 2008. Detección de zonas de inundación por factores geomorfológicos e hidrológicos, en la cuenca de Coatán. Una propuesta metodológica". FOMIX COCyTECH. Fecha de consulta: febrero 2008. En línea: http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/descargas/cong_nal_06/tema_05/10_gloria_es_piritu3.pdf.
- Flórez, A. y Suavita, M. 1997. Génesis y manifestación de las inundaciones en Colombia. En: Cuadernos de Geografía, Vol. VI, No. 1-2. p. 60-110.
- Flórez, M.T. y Parra L.N., 1988. Avalancha de la quebrada Ayurá del 14 de Abril de 1988. 2da Conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburra. Medellín.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

González, J., Hermelin, M., 2004. Aspectos Geomorfológicos de la Avenida Torrencial del 31 de Enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados. Grupo de Geología Ambiental e Ingeniería Sísmica, Universidad EAFIT, Medellín, 23 pp.

Hurtado, C., 2002. Informe de visita técnica al municipio de Guayabetal como base para la formulación de un estudio de amenazas geológicas. Bogotá.

Instituto Mi Río-en liquidación, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA, Universidad Nacional, 2003a. Formulación de planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas-PIOM: diseño de la metodología: convenio 053 de 2001. Medellín.

Instituto Mi Río-en liquidación, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA, Universidad Nacional, 2003b. Formulación de planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas en la Parte Baja de la Cuenca de la Quebrada La Iguana: Aplicación de la metodología: convenio 053 de 2001. Medellín .

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo (COSUDE). 2005. Inundaciones Fluviales, Mapas de Amenazas, Recomendaciones Técnicas para su elaboración. Proyecto MET -ALARN. 71 p. Fecha de consulta: mayo 2008. En línea: <http://www.crid.or.cr/crid/idrc/documentos/MA1/inundaciones.pdf>.

Juang. C., Jhi, Y. y Lee. D., 1998. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty. En: Journal of Engineering Geology, vol. 49, p. 111 -122.

Kainz, W., 2007. Fuzzy Logic and Gis. Notas de clase. Laboratorio de cartografía computacional Universidad de Viena, Viena -Austria: última actualización octubre 10 de 2006. Fecha de consulta: septiembre de 2007. En línea: http://homepage.univie.ac.at/wolfgang.kainz/Lehrveranstaltungen/Fuzzy_Logic_and_GIS .

Kingma, N., van Westen, C. y Vargas, R. 2008. Evaluación de la amenaza por inundación: Introducción. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. UNESCO – RAPCA. Fecha de consulta: enero 2008. En línea: <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/08%20Amenaza%20por%20inundaciones/Amenaza%20por%20inundaciones.pdf>.

Lavigne, F. y Suba, H. 2004. Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. Geomorphology, vol. 61, p. 41–58.

López, J. y Aragón, R. 2008. Identificación de de áreas propensas a inundación a partir del conocimiento geomorfológico: El río Pánuco. Instituto de Geografía UNAM. Fecha de consulta: febrero 2008. En línea: <http://eventos.iingen.unam.mx/EncuentroAgua/Mesas/MESA%201/INUNDACIONES%20Jorge%20L%C3%B3pez%20Blanco.pdf>.

Medina, J. 1991. Fenómenos Geodinámicos: estudio y medidas de tratamiento. Tecnología Intermedia, Lima. p. 87.

Méndez. Z. y Villegas. P., 2005. Los Sistemas Difusos como Herramienta de Modelación de la Producción Frutícola. Día Matlab Universidad El Bosque. 4 p.

Montoya, J.J. y Patiño, J.E. 2001. Estudio Hidrometeorológico y Geomorfológico de Diez Quebradas del Valle de Aburrá. Trabajo de grado para el título de Geólogo. Universidad EAFIT. 196 p.

Morisawa, M. 1985. River forms and process. Longman, Londres, 222 p.

Municipio de Girardota, 2007. Revisión y Ajuste del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Municipio de Girardota. Asesoría Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Naranjo, C.A. y Arbeláez, J.P. 2002. Análisis y Zonificación de la Amenaza y el Riesgo en el Área Urbana y Zonificación de la Amenaza en el Área Rural del Municipio de Copacabana. Tesis de Grado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 135p.

Ortiz, J., 2007. Zonificación Geológica – Geotécnica del barrio María Cano Carambolas comuna tres municipio de Medellín por deslizamientos e inundaciones. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 37 p.

OSSO – La Red, 2003. Guía metodológica de DesInventar. Sistema de Inventario de Desastres. Fecha de consulta: diciembre 2007. En línea: <http://www.desinventar.org/sp/metodologia/DesInventar-MethodologicalGuide-Spanish.pdf>.

Parra, E (Sin publicar). Avenidas Torrenciales. En preparación.

Parra, E., Viana, R., González, M., 1995 Metodología para la evaluación de la torrencialidad caso oriente antioqueño.

- Piedrahíta, I. 1996. Estudio preliminar por eventos torrenciales en la vertiente occidental del Río San Juan, suroeste antioqueño. Trabajo de grado para el título de Geólogo. Universidad EAFIT. 127 p.
- Rendón, G. 1997. La Hidráulica Torrencial. En: DYNA, vol. 22. p. 23 -31.
- Rico, M.; y Benito, G., 2002. Estimación de caudales de crecida en pequeñas cuencas de montaña: Revisión metodológica y aplicación a la cuenca de Montardit (Pirineos Centrales, España). Revista Cuaternario y Geomorfología 16 (1 -4). P. 127-138.
- Riedl, O. y Zachar, D. 1984. Forest amelioration. Elsevier, Amsterdam. 623 p.
- Rúa, D.E., y Marín, M.J, 2006. Estudio de la susceptibilidad a los movimientos en masa en la cuenca de la quebrada el Barro, Municipio de Bello. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Archivo Electrónico.
- Saboya. F., Alves M., Díaz. W., 2006. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. En: Engineering geology, vol. 86, N° 4, p. 211-224.
- SOLINGRAL, 2007. Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundaciones en el Valle de Aburrá. En proceso.
- Urrea, H. y Vásquez, G. 1996. Caracterización, cartografía y estrategias de manejo de las cuencas hidrográficas torrenciales del municipio de Guatapé. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 87 p.
- Valencia, A. J.; Castro, E. y Moreno, M. 1998. Evaluación de la vulnerabilidad y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales en el Municipio de Florida – Valle del Cauca (Colombia). En: VII CCG 1998 – Sociedad Colombiana de Geología. P. 137 – 150.
- Vásquez, 1994. Reconsideración de la efectividad de la vegetación boscosa para el control de eventos hidráulicos torrenciales. Seminario Nacional “Políticas, silvicultura y protección forestal”. Ministerio del Medio Ambiente, INDERENA, ACIF. La Ceja, Antioquia, 13 p.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

Vásquez, G. 1993. El problema constante de las cuencas torrenciales, a propósito del desastre del río Tapartó (Ant.), 26/4/1993. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 5 p.

Smith, K. y Ward, R. 1998. Floods: Physical Processes and Human Impacts. Ed. Chichester, John & Wiley. 382 p.

Zuluaga, L., 2002. Análisis morfodinámico de cuencas fuertemente antropizadas. Aplicación a las cuencas de las quebradas Las Brujas y La Ahuyamera. Municipio de Envigado. Tesis de Grado Universidad Nacional de Colombia. Medellín.



Libro II Capítulo III

ZONIFICACION DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN EL MUNICIPIO DE ENVIGADO

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. HIDROGRAFÍA.....	2
3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	3
3.1 Llanura Aluvial:	3
3.2 Colinas:.....	3
3.3 Depósitos de Pie de Escarpe:	4
3.4 Filos altos:.....	4
3.5 Escarpe:	4
3.6 Altiplano:	5
3.7 Depósitos Aluviotorrenciales:	5
4. EVENTOS REGISTRADOS PARA EL MUNICIPIO DE ENVIGADO	6
5. ZONAS CON AMENAZA ALTA POR INUNDACIONES LENTAS	9
5.1 Quebrada La Ayurá:.....	9
5.2 Quebrada La Honda:	11
5.3 Quebrada La Sebastiana:	11
5.4 Quebrada La Zúñiga:	11
5.5 Quebrada La Sucia:	11
5.6 Quebrada Las Palmas:	12
5.7 Quebrada La Morgan:	13
5.8 Quebrada Espíritu Santo:.....	13
6. ZONAS CON AMENAZA ALTA POR INUNDACIONES RÁPIDAS Y AVENIDAS TORRENCIALES.	13
6.1 Quebrada La Ayurá:.....	13
6.2 Quebrada La Ahuyamera:	16
6.3 Quebrada El Salado:.....	17
6.4 Quebrada La Zúñiga:	18

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo .

6.5	Quebrada La Honda:	18
6.6	Quebrada La Mina	19
6.7	Quebrada La Minita:	20
6.8	Quebrada La Heliadora:	22
6.9	Quebrada La Sebastiana:	22
7.	CONCLUSIONES	25
8.	REFERENCIAS.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de ocurrencia de diferentes eventos de emergencia desde el año 1944 hasta el año 1999, de acuerdo con los datos registrados en DESINVENTAR. 9

Figura 2. Quebrada La Ayurá. **a)** Inicio de la canalización permanente antes del hospital Manuel Uribe Ángel. **b)** Interrupción de la canalización antes de la avenida El Poblado. . 10

Figura 3. Quebrada La Ayurá, sector avenida El Poblado. **a)** Interrupción del dique hacia la margen izquierda de la quebrada que favorece la ocurrencia de desbordamientos. **b)** Zona inundable a partir del puente de la Avenida El Poblado. 10

Figura 4. Quebrada La Sebastiana. **a)** Cauce de la quebrada La Sebastiana, sector La Inmaculada. **b)** Posible inundación de vías por escorrentía en el sector de la confluencia con la quebrada La Ayurá. 11

Figura 5. Quebrada La Sucia **a)** Cauce de la quebrada La Sucia, barrio Loma del Barro. **b)** Inicio de cobertura en box culvert, sector Señorial. 12

Figura 6. Quebrada Las Palmas. **a)** Llanura de inundación amplia hacia el sector del peaje Envigado. **b)** Posible inundación de viviendas localizadas hacia la margen izquierda de la quebrada en cercanías a la glorieta de Sancho Paisa. 12

Figura 7. Zona crítica de avenida torrencial representada por la confluencia de las quebradas La Ayurá, El Salado y la Ahuyamera. 14

Figura 8. Quebrada La Ayurá. **a)** Muros de contención construidos en la entrada al barrio Chinguí No. 2. Nótese la interrupción del muro hacia la margen izquierda de la quebrada. **b)** Interrupción del muro levantado en la margen derecha. El muro construido en la margen izquierda permanece constante hasta la desembocadura de la quebrada El Salado. 15

Figura 9. Quebrada La Ayurá a la altura del puente La Pava. Obsérvese el muro levantado hacia la margen izquierda, que pretende impedir que el flujo afecte las construcciones aledañas representadas por una placa polide portiva y algunas viviendas. 15

Figura 10. Quebrada La Ayurá, sector del parque ecológico El Salado. El cauce está completamente ocupado por la infraestructura del parque ecoturístico. 16

Figura 11. Quebrada La Ahuyamera, sector Chinguí No. 2, antes de la desembocadura a la quebrada La Ayurá. Obsérvese el tamaño de los bloques que se encuentran en el cauce. 17

Figura 12. Quebrada El Salado. **a)** Cauce de la quebrada en el sector de Salado Cristo. **b)** Desembocadura de la quebrada El Salado en la quebrada La Ayurá. 18

Figura 13. Quebrada La Zúñiga, barrio Zúñiga. Obsérvese la carga del cauce. 18

Figura 14. Quebrada La Honda, barrio El Esmeraldal. 19

Figura 15. Quebrada La Mina, barrio La Mina parte alta. En esta zona tiende a ampliarse la llanura de inundación, sobre la cual se han instalado construcciones industriales y residenciales. 19

Figura 16. Quebrada La Mina, barrio La Mina parte baja. a) Inicio de la cobertura en box culvert del cauce. b) Primer tramo de cobertura inundable por insuficiencia hidráulica de la obra	20
Figura 17. Cobertura de la quebrada La Minita en el barrio San Rafael. Estas áreas son debidamente aprovechadas como zonas de recreación y esparcimiento.	21
Figura 18. Inicio de la cobertura en box culvert del cauce de la quebrada La Minita a la altura del colegio El Comercial. Esta zona constituye el sector institucional del barrio San Rafael.	21
Figura 19. Inicio de cobertura en box culvert para la quebrada La Heliodora en el barrio La Paz.	22
Figura 20. Quebrada La Sebastiana, barrio La Inmaculada. Los bloques que reposan en el cauce presentan tamaños con siderables que reflejan la torrencialidad del drenaje.	23
Figura 21. Zona crítica de avenida torrencial representada por la confluencia de las quebradas La Sebastiana y El Atravesado.	24
Figura 22. Quebrada La Sebastiana, barrio El Chocho. a) Desembocadura de la quebrada El Atravesado en la quebrada La Sebastiana. Esta área es altamente susceptible a la ocurrencia de avenidas torrenciales. b) Movimientos de tierra asociados al cauce.	24

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eventos registrados para el municipio de Envigado en Desinventar 11

1. INTRODUCCION

En este informe se presenta un inventario de las áreas que son susceptibles a presentar inundaciones lentas, avenidas torrenciales e inundaciones rápidas del Municipio de Envigado. Para la cartografía de dichas áreas se utilizaron exclusivamente criterios geológicos y geomorfológicos, tales como la presencia de depósitos aluviales o aluvio-torrenciales, así como las características morfológicas de las cuencas relacionadas al cambio de pendientes y amplitud de las llanuras aluviales. La herramienta utilizada para identificar estas características fue en primera instancia la fotointerpretación, seguida posteriormente de una verificación en campo.

Este diagnóstico es el insumo para el censo de las viviendas y personas que se encuentran en amenaza alta por inundaciones lentas, avenidas torrenciales e inundaciones rápidas, lo que a su vez se convertirá en un elemento importante para el análisis del riesgo y la formulación de políticas para la gestión del riesgo.

Como ha sido dicho ya, este trabajo hace parte de un macroproyecto de carácter metropolitano cuyo objetivo general consiste en dotar al Área Metropolitana del Valle de Aburrá y a los Municipios que la conforman incluyendo Envigado, de herramientas conceptuales para la gestión del riesgo.

2. HIDROGRAFÍA

La hidrografía de Envigado comprende parte de la cuenca del río Medellín y las microcuencas de las quebradas Las Palmas, La Mina y La Ayurá, siendo esta última la que ocupa la mayor parte del territorio. Hacen parte de esta microcuenca de La Ayurá las quebradas La Zúñiga, La Sebastiana, Las Brujas, La Ahuyame ra, La Pavita y La Seca, las cuales desembocan en la margen derecha de la quebrada La Ayurá. Hacia la margen izquierda desembocan las quebradas El Salado y La Miel.

La microcuenca de la quebrada La Mina está conformada por los drenajes La Minita, La Sucia y La Heliadora. Los dos primeros desembocan hacia la margen izquierda de la quebrada La Mina. La Heliadora, en cambio, desemboca hacia la margen derecha de la quebrada La Sucia. En vista de que gran parte de esta microcuenca se encuentra bastante urbanizada, es común que estas quebradas presenten coberturas de tipo box culvert.

En el sector del altiplano, la microcuenca Las Palmas está conformada principalmente por las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo y La Morgan. La quebrada Las Palmas se une con la quebrada Espíritu Santo alimentando el embalse La Fe ubicado en el municipio de El Retiro. Por su parte, la quebrada La Morgan, desemboca hacia la margen izquierda de la quebrada Las Palmas.

3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

El municipio de Envigado ocupa parte de la vertiente oriental del Valle del Río Medellín y se localiza en la zona de transición del valle Superior y Medio del Aburrá en la cual el río Medellín cambia de dirección de N-S a SW-NE desplegando una planicie aluvial de mayor amplitud. La mayor parte del municipio, que incluye la zona urbana y peri-urbana, se enmarca dentro de la cuenca de la quebrada La Ayurá, la cual, excluyendo al río Medellín, constituye la corriente fluvial más importante del municipio. Los contrastes topográficos se hacen notar, pues se reconocen seis unidades geomorfológicas en las cuales se desarrollan fenómenos de inundación cuyo carácter lento, rápido o torrencial está determinado tanto por las condiciones geomorfológicas como por la disponibilidad de material de carga.

3.1 Llanura Aluvial:

Corresponde a los depósitos aluviales del río Medellín y de la quebrada La Ayurá que conforman la planicie sobre la cual se concentra la mayor parte del área urbana del Municipio. Los terrenos planos a suavemente ondulados que caracterizan la zona, sugieren que se pueden presentar inundaciones lentas o desbordamientos hacia los tramos finales de las quebradas La Ayurá, La Zúñiga, La Honda, La Sebastiana, La Mina, La Heliadora, La Sucia entre otras, aunque cabe señalar que algunas de las corrientes presentes en esta unidad se encuentran canalizadas o conducidas a través de box culvert, lo que tiende a reducir las amenazas por inundación, de manera que lo más probable es que se generen principalmente inundaciones de vías por escorrentía.

Esta unidad se encuentra fuertemente modificada por acción antrópica, de hecho es común encontrar que los cauces de las quebradas que atraviesan el área a través de box culvert se encuentran completamente urbanizados a partir del inicio de la obra hidráulica. Esta situación ocurre para las quebradas La Mina, La Minita, La Sucia y La Heliadora, pues los drenajes bajan desde zonas empinadas y en los cambios de pendiente se instalan las obras hidráulicas donde se generan puntos críticos de inundación.

3.2 Colinas:

La unidad geomorfológica de colinas corresponde a zonas de transición que terminan en planicies aluviales localizadas hacia el sector occidental del municipio. Se caracteriza por presentar colinas redondeadas con pendientes rectas y grado de incisión medio, modeladas en depósitos de vertiente tipo flujo mixto y algunos depósitos aluviales asociados a las quebradas La Mina y La Heliadora (Jaramillo y Lopera, 1996).

Las quebradas La Mina, La Minita, La Sucia, La Heliadora, entre otras, recorren esta unidad geomorfológica hacia la parte occidental del municipio en una subcuenca que drena directamente al río Medellín. A pesar de que las condiciones geomorfológicas podrían sugerir la ocurrencia de posibles eventos torrenciales, en

sus cauces no se observa una carga considerable que indique el carácter torrencial de estos drenajes.

3.3 Depósitos de Pie de Escarpe:

Se localizan sobre la vertiente derecha de la quebrada La Ayurá . Y constituyen las zonas de transición, con pendientes cóncavas altamente incisadas, que terminan en planicies aluviales. Estas zonas resultan propensas a la ocurrencia de inundaciones rápidas y avenidas torrenciales por tratarse de áreas con cambios fuertes de pendiente.

Las condiciones geomorfológicas de la unidad sugieren que se pueden presentar altos regímenes energéticos ya que las corrientes descienden desde las zonas más empinadas y descargan el material transportado en estas zonas de transición favoreciendo de este modo la generación de inundaciones rápidas o avenidas torrenciales.

Hacia la margen derecha de la quebrada La Ayurá, las quebradas La Ahuyamera, La Pavita, Las Brujas, El Atravesado, La Sebastiana, la Honda y la Zúñiga recorren esta unidad geomorfológica. La generación de inundaciones rápidas puede ser común a lo largo de los cauces de estas quebradas, sin embargo, debido a la presencia de carga gruesa y a las características geomorfológicas, en ciertos puntos específicos pueden ocurrir avenidas torrenciales, especialmente en el área de la confluencia de las quebradas La Sebastiana y El Atravesado en el sector Isla Santo Domingo y en el área de confluencia de las quebradas la Ahuyamera y La Ayurá en el barrio Chinguí 2.

3.4 Filos altos:

Ocupa el sector suroccidental del municipio hacia la margen izquierda de la quebrada La Ayurá y presenta un drenaje dendrítico a subdendrítico. Está representada por cerros con fuertes pendientes muy disectadas y es lugar de los nacimientos de las quebradas La Ayurá y dos de sus afluentes mayores, las quebradas La Miel y El Salado. En estas quebradas se pueden generar flujos torrenciales especialmente en su desembocadura a la quebrada La Ayurá donde los abanicos aluviales se abren para ocasionar cambios bruscos de pendiente y favorecer la depositación de material.

3.5 Escarpe:

Esta unidad geomorfológica se localiza en el sector centro-oriental del municipio extendiéndose como una franja alargada en dirección Norte-Sur que separa las subcuencas correspondientes a las quebradas Las Palmas y La Ayurá. Se trata de vertientes largas con pendientes entre fuertes y moderadas de formas cóncavas, convexas y planas. Los filos tienden a ser agudos y escalonados y corresponden a los nacimientos de las quebradas tributarias de la quebrada La Ayurá en su margen derecha (Solingral, 2004). Este escarpe presenta desarrollo de drenajes paralelos

en “V” cerrada poco incisados entre los cuales se desatacan las quebradas La Sebastiana, La Ahuyamera, La Zúñiga y La Honda.

A pesar de que algunas de las principales quebradas del municipio recorren esta unidad geomorfológica, es relevante señalar que estos drenajes tienden a encañonarse en estas zonas de escarpe, por lo cual la llanura aluvial no exhibe un desarrollo importante y por ende no se especifican zonas potencialmente inundables.

3.6 Altiplano:

Se localiza hacia el sector oriental del municipio y pertenece a la cuenca del río Negro. Las quebradas Las Palmas y una de sus tributarias, La Morgan, constituyen las corrientes fluviales que pueden generar mayor amenaza por inundación lenta dadas las condiciones de suaves pendientes y llanuras aluviales amplias. La quebrada Espíritu Santo, localizada hacia el oriente de este mismo altiplano, recorre un relieve más ondulado caracterizado por presentar colinas de tope redondeado con pendientes cortas de cóncavas a rectas, sin embargo a lo largo del cauce, se extienden pequeñas áreas que hacen parte de la llanura aluvial de la quebrada, las cuales pueden ser igualmente sometidas a fenómenos de inundación lenta.

3.7 Depósitos Aluviotorrenciales:

El mayor depósito aluvio-torrencial se presenta justamente en el área urbana y exhibe una forma característica de cono de deyección que se abre un poco más abajo de la confluencia entre las quebradas La Ahuyamera y La Ayurá y que indica que el cauce de esta última ha migrado antrópica o naturalmente hacia el oriente en vista de que el cauce actual se encuentra muy alejado de dicho depósito.

Asociado a la quebrada La Ayurá se presenta también un pequeño depósito aluvio-torrencial en la zona de confluencia de las quebradas Las Ahuyamera, El Salado y La Ayurá, lo cual corrobora la idea de que este sector es altamente susceptible a la ocurrencia de avenidas torrenciales. Igualmente, en el área de confluencia entre las quebradas El Atravesado y La Sebastiana se presenta un depósito aluvio-torrencial que respalda la afirmación de que esta zona presenta amenaza por eventos torrenciales.

Entre las quebradas La Heliodora y La Mina se ubica un depósito aluvio-torrencial que ocupa la parte baja de la zona de transición próxima a la planicie aluvial. Este depósito indica que este sector obedece a una zona de acumulación que actualmente presenta un desarrollo urbanístico total, pues ambas quebradas se encuentran cubiertas mediante la instalación de box culverts.

4. EVENTOS REGISTRADOS PARA EL MUNICIPIO DE ENVIGADO

En la base de datos DESINVENTAR del Área Metropolitana se encuentra registrados varios eventos de inundaciones y avenidas torrenciales para el Municipio de Envigado (Tabla 1 y figura 1). Es importante resaltar (figura 1) que del total de emergencias reportadas, hay un predominio de las inundaciones, seguido de los deslizamientos y en tercer lugar las avenidas torrenciales.

Tabla 1. Tomado de: Estudio de Riesgo al deslizamiento en el municipio de Envigado. SOLINGRAL.2004Eventos registrados para el municipio de Envigado en el Desinventar.

TIPO DE EVENTO	LOCALIZACIÓN	AÑO
Avenida Torrencial	Quebrada La Ayurá	1944
Avenida Torrencial	Quebrada La Ayurá	1950
Inundación	Zona Urbana	1979
Avenida Torrencial	Quebrada La Ayurá	1988
Inundación	Zona Urbana	1990
Inundación	Cr 42A N° 40 - 40	1996
Inundación	Cr 42 N° 39S. Primavera	1997
Inundación	Cr 42 N° 39S - 29. Guanteros	1997
Inundación	Cr 42 con Cr 39S. Guanteros	1997
Inundación	Cr 49 N° 45 S - 16. Primavera	1997
Inundación	Cr 44 N° 45 - 07	1997
Inundación	Diag. 29 N° 32AS - 70	1997
Inundación	Cll 33S con Cr 42. Parque infantil	1997
Inundación	Cr 43 N° 40HS - 29. El Dorado	1997
Inundación	Cr 44 N° 45CS - 07	1997

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

TIPO DE EVENTO	LOCALIZACIÓN	AÑO
Inundación	Cr 42 N° 39S - 29. Guanteros	1997
Inundación	Cr 53 N° 51 - 41. 2 cuadras arriba de Comfama	1997
Inundación	Cr 41 N° 39 S -70. Guanteros	1999
Inundación	Cll. 37BS N° 27 - 120. Loma de las Brujas	1999
Inundación	Cr 41B N° 44S - 36. El Dorado, por la cancha	1999
Inundación	Cll 39S N° 25 AA - 33. Chingui, cerca a los Billares	1999
Inundación	Cr 40A N° 40FS - 75. El Dorado, por la cancha	1999
Inundación	Cll 36DS N° 23 - 66. Cerca al Estadero El Farolito	1999
Inundación	Cll 29S N° 43ª - 60. Urb.Mi Morada	1999
Inundación	Cll 39DS N° 25 AA - 82. Chingui	1999
Inundación	Cll 39S N° 25 AA - 33. Chingui	1999
Inundación	Cll 35S N° 39 - 45B. Barrio Obrero, por el parquecito	1999
Inundación	Cll 35S N° 39 - 4B. Barrio Obrero, por el Colegio Restrepo Molina	1999
Inundación	Cll 41 Sr N° 24 S 91. La Mina	1999
Inundación	Cr 42 N° 26AS - 176. Barrio Las Orquídeas, por La Salle	1999
Inundación	Cr 28 N° 27S - 17. Chingui, arriba de Rocío de la Mañana	1999
Inundación	Cll 37AS N° 33 - 25. Por el Seguro Social	1999
Inundación	Diag. 30 N° 33S - 35. Por la Iglesia Sta Barbara	1999
Inundación	Sector de las Palmas (Al frente del puesto de salud)	1998
Inundación	Pasando el peaje que va hacia Rionegro	1999
Inundación	Cr 24FN 40 sur -155. Por la Iglesia Santiago Apóstol	1999

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

TIPO DE EVENTO	LOCALIZACIÓN	AÑO
Inundación*	Cr 24FNº40 Sur 155. El Salado, por la Iglesia	1999
Deslizamiento	Rosellón	1956
Deslizamiento	El Portal	1975
Deslizamiento	Barrios Rosellón y La Minita	1988
Deslizamiento	Barrio El Salado	1989
Deslizamiento	Barrio Rosellón	1988
Deslizamiento	Las Flores	1998
Deslizamiento	Transv 34BS con la 29. Uribe Ángel	1999
Deslizamiento	Diag 29 N° 33S - 07. Uribe Ángel, sector Alto de los Robles	1999
Deslizamiento	Cr 25D N° 40AS-60. Entre los barrios La Mina y Las Palmas	1999
Deslizamiento	Cr 24E N° 40 Sur - 48. El Salado, por la Capilla Santiago Apóstol	1999
Deslizamiento	Cr 24D N 40S-70. El Salado, sector de La García, entrada a La Catedral.	1999
Deslizamiento	Loma del Escobero, después de El Farolito	1999
Deslizamiento	Por San José, subiendo por La Catedral, en la vereda Arenales	1999
Deslizamiento	El Trianón, por la terminal antigua de buses Envigado	1999
Deslizamiento	Cll 46BS N° 37 - 28. El Trianón	1999
Deslizamiento	Cll 40BS N° 27B - 14. La Mina	1999
Deslizamiento	El Trianón	1999
Deslizamiento	Carretera Envigado - Alto de las Palmas, paraje La María	1999

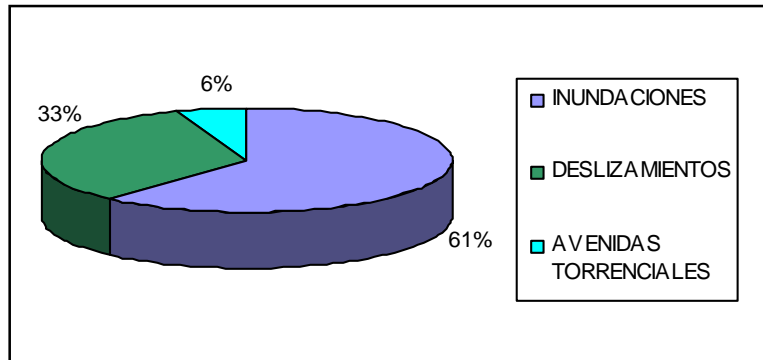


Figura 1. Porcentaje de ocurrencia de diferentes eventos de emergencia desde el año 1944 hasta el año 1999, de acuerdo con los datos registrados en DESINVENTAR.

5. ZONAS CON AMENAZA ALTA POR INUNDACIONES LENTAS

El municipio de Envigado exhibe fuertes contrastes geomorfológicos que inciden directamente en el carácter de las inundaciones. Las inundaciones lentas ocurren en las partes bajas con pendientes suaves donde los cauces no presentan carga significativa, de manera que estas pueden suceder tanto en la zona del altiplano como en la planicie aluvial, ocupada por el área urbana del municipio, que corresponde a la llanura aluvial del río Medellín y al abanico aluvial de la quebrada La Ayurá.

Al Occidente el municipio limita con el Río Medellín, el cual se encuentra canalizado en su recorrido por el municipio de Envigado. En la margen derecha del río la llanura aluvial es amplia y en caso de un evento extremo podrían ser afectadas varias construcciones predominantemente de tipo industrial y comercial.

En el municipio de Envigado, las quebradas que representan mayor amenaza por inundaciones lentas son:

5.1 Quebrada La Ayurá:

La quebrada La Ayurá atraviesa el municipio de Envigado de sureste a noroeste y su cuenca ocupa la mayor parte del territorio municipal. En el área urbana su cauce se encuentra canalizado a partir de la urbanización El Embrujo. A partir de aquí (aguas abajo), se considera que la quebrada La Ayurá no representa una amenaza potencial de inundación en vista de que en este tramo el canal cumple su función de mitigación, sin embargo, se pueden presentar inundaciones por lluvias intensas que generen aguas de escorrentía en las vías que se extienden paralelas al cauce. Un poco antes del puente de la avenida El Poblado, la canalización se interrumpe y el cauce se encuentra muy superficial, de modo que esta zona tiende a ser más susceptible a inundaciones lentas dada la ausencia de barreras de protección (figura 2).

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

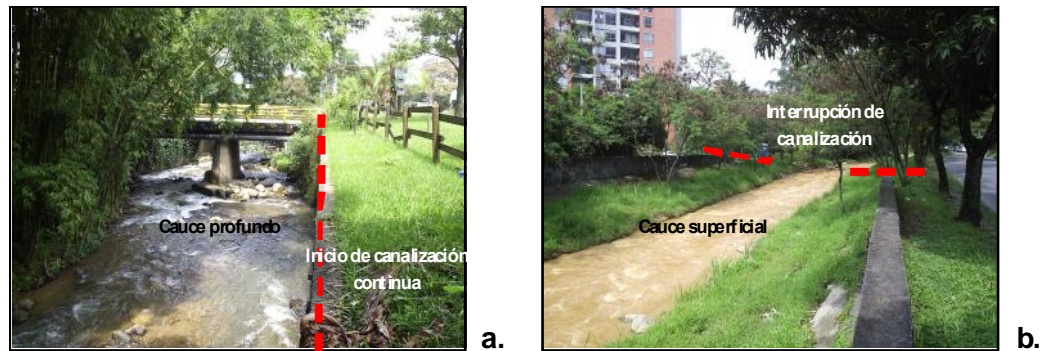


Figura 2. Quebrada La Ayurá. **a)** Inicio de la canalización permanente antes del hospital Manuel Uribe Ángel. **b)** Interrupción de la canalización antes de la avenida El Poblado.

Precisamente en la Avenida El Poblado, el pequeño dique que sirve de obstáculo para evitar desbordamientos se encuentra interrumpido por el puente vehicular, lo cual puede provocar el desbordamiento de la quebrada en este punto y la inundación en la calle 25 A Sur y en el centro comercial Villa Grande, construido en una ligera depresión que favorece la acumulación de aguas (figura 3).

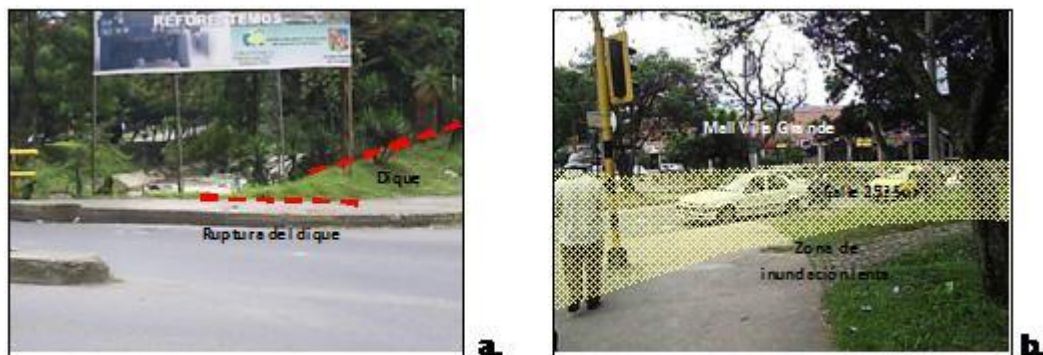


Figura 3. Quebrada La Ayurá, sector avenida El Poblado. **a)** Interrupción del dique hacia la margen izquierda de la quebrada que favorece la ocurrencia de desbordamientos. **b)** Zona inundable a partir del puente de la Avenida El Poblado.

Aguas abajo de este punto, en el barrio Bosques de Zúñiga, la quebrada vuelve a profundizar su cauce y las barreras de protección están representadas por pequeños diques o jarillones. Este cambio de pendiente es atenuado mediante disipadores de energía a partir de los cuales se inicia nuevamente la canalización del cauce.

5.2 Quebrada La Honda:

En el sector de La Frontera, hacia la desembocadura en la quebrada La Zúñiga, se presenta una zona de inundación lenta que ha registrado eventos relacionados con este fenómeno. Actualmente se lleva a cabo una construcción en este sector, que aparentemente va a otorgarle un manejo adecuado a la quebrada mediante la instalación de obras hidráulicas.

5.3 Quebrada La Sebastiana:

Hacia la desembocadura en la quebrada La Ayurá, a la altura del hospital Manuel Uribe Ángel, se presenta una zona de desbordamiento, corroborada en los eventos registrados en el municipio, que puede generar la inundación por escorrentía de la diagonal 31 A, vía paralela la quebrada La Ayurá, y las transversales 36 A Sur y 36 Sur (figura 4).



Figura 4. Quebrada La Sebastiana. **a)** Cauce de la quebrada La Sebastiana, sector La Inmaculada. **b)** Posible inundación de vías por escorrentía en el sector de la confluencia con la quebrada La Ayurá.

5.4 Quebrada La Zúñiga:

En el área de la confluencia con la quebrada La Honda, en el sector de La Frontera, se pueden presentar desbordamientos en épocas de fuertes lluvias. En el barrio Bosques de Zúñiga, hacia la calle 20 Sur con carrera 44, pueden ocurrir inundaciones lentas aunque la quebrada se encuentra intervenida.

5.5 Quebrada La Sucia:

Es posible que se generen inundaciones lentas en el barrio Loma del Barro asociadas a los puntos críticos localizados al inicio de la obra hidráulica, que pretende conducir la quebrada por debajo de la infraestructura urbana y que se encuentra interrumpida en algunas zonas. El inicio de la cobertura tiene lugar en la

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

urbanización Señorial, donde la quebrada entra en un box culvert de 1.50 m. x 1.50 m aproximadamente, extendiéndose hasta el restaurante Tierra Santa donde nuevamente se observa su cauce (figura 5). En el barrio La Paz, cerca de la Terminal de buses de La Paz, se señala un punto crítico a partir del cual la quebrada comienza nuevamente una cobertura en box culvert que permanece durante todo su recorrido.



Figura 5. Quebrada La Sucia **a)** Cauce de la quebrada La Sucia, barrio Loma del Barro. **b)** Inicio de cobertura en box culvert, sector Señorial.

5.6 Quebrada Las Palmas:

La llanura de inundación asociada a esta corriente fluvial es amplia desde el cruce de la quebrada con la glorieta de Sancho Paisa. A partir de este punto, especialmente en el tramo paralelo a la vía Las Palmas, se extiende una zona de inundación lenta que puede afectar las viviendas que se encuentran construidas inmediatamente alrededor de la margen izquierda de la quebrada (figura 6).

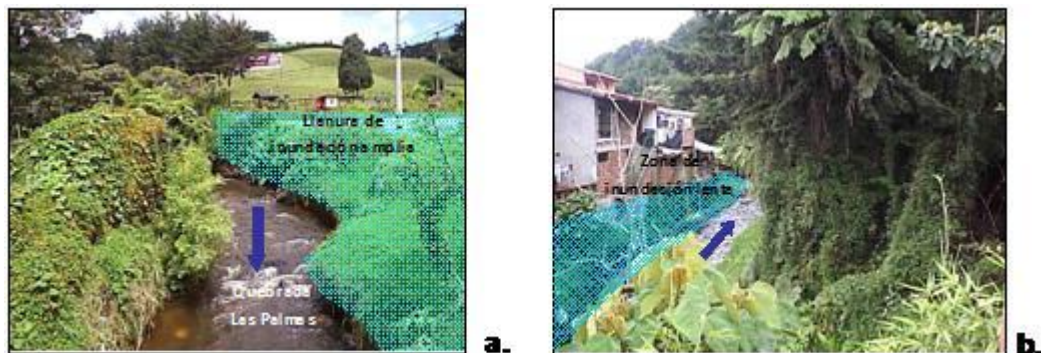


Figura 6. Quebrada Las Palmas. **a)** Llanura de inundación amplia hacia el sector del peaje Envigado. **b)** Posible inundación de viviendas localizadas hacia la margen izquierda de la quebrada en cercanías a la glorieta de Sancho Paisa.

5.7 Quebrada La Morgan:

La llanura aluvial de esta quebrada se amplía antes de la desembocadura a la quebrada Las Palmas. En esta zona se han registrado inundaciones en épocas invernales cerca de la inspección de policía de Palmitas¹.

5.8 Quebrada Espíritu Santo:

A lo largo del cauce se presentan pequeñas ampliaciones de la llanura aluvial que pueden ser susceptibles a ser inundadas lentamente.

6. ZONAS CON AMENAZA ALTA POR INUNDACIONES RÁPIDAS Y AVENIDAS TORRENCIALES.

Las zonas de transición, representadas por pendientes moderadas, constituyen el escenario de los fenómenos asociados a inundaciones rápidas y avenidas torrenciales. Las quebradas que descienden de las zonas escarpadas con pendientes fuertes descargan su flujo turbulento en dichas zonas de transición, de ahí el carácter rápido o torrencial de los fenómenos de inundación. El municipio de Envigado cuenta con contrastes geomorfológicos importantes que favorecen la ocurrencia de este tipo de inundaciones. De igual modo, la ocurrencia de procesos morfodinámicos asociados a los cauces en las zonas altas promueve la disponibilidad de material provocando la torrencialidad de los fenómenos.

Las áreas más susceptibles a presentar avenidas torrenciales en el municipio de Envigado están definidas por la confluencia de algunas quebradas. Se identificaron dos zonas críticas asociadas a las quebradas que presentan mayores comportamientos torrenciales reflejados en el tamaño de los bloques que han sido arrastrados por las aguas y que se encuentran estacionados en sus cauces.

En el municipio de Envigado las quebradas que representan mayor amenaza por inundaciones rápidas y avenidas torrenciales son:

6.1 Quebrada La Ayurá:

En múltiples ocasiones se han presentado fenómenos de inundación y avenidas torrenciales asociados a esta quebrada.

- ***Zona de confluencia de la quebrada La Ayurá con las quebradas La Ahuyamera y El Salado:*** Esta área se considera susceptible a la ocurrencia de una avenida torrencial por tratarse de una zona en la cual se presenta la

¹ Florez M., Parra N., Barrera J. Escobar A. Mapa de Amenaza, Vulnerabilidad y riesgo del municipio de Envigado-Antioquia. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental. Universidad de Antioquia.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

convergencia de los abanicos aluviales de cada una de las corrientes mencionadas (figura 7).



Figura 7. Zona crítica de avenida torrencial representada por la confluencia de las quebradas La Ayurá, El Salado y la Ahuyamera.

A lo largo del cauce, aproximadamente hasta el punto de confluencia con la quebrada La Sebastiana, se pueden presentar inundaciones rápidas que adquieren un carácter torrencial en una amplia zona que se extiende aproximadamente desde la desembocadura de la quebrada La Miel hasta la desembocadura de la quebrada La Ahuyamera, haciéndose más crítica en el abanico aluvial conformado en el área que abarca las confluencias mencionadas de las quebradas El Salado y La Ahuyamera. Las obras de mitigación levantadas en este sector, a raíz de la avenida torrencial de 1988, están constituidas por muros de contención que se extienden discontinuamente desde la desembocadura de la quebrada El Salado hasta el puente de la carrera 24 EE (figura 8). En ciertos tramos los muros no fueron levantados en ambos márgenes de la quebrada sino que el inicio de un muro en un margen determinada marca el final del otro en el margen contraria, situación que es contraproducente porque conlleva a que el margen opuesta al muro sea fuertemente afectada en el caso de una crecida. Esta situación es especialmente más crítica hacia el margen izquierda de la quebrada en el sector El Remanso, considerando que en este se encuentran viviendas a pocos metros del cauce.

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.



Figura 8. Quebrada La Ayurá. **a)** Muros de contención construidos en la entrada al barrio Chingú No. 2. Nótese la interrupción del muro hacia la margen izquierda de la quebrada. **b)** Interrupción del muro levantado en la margen derecha. El muro construido en la margen izquierda permanece constante hasta la desembocadura de la quebrada El Salado.

Aguas arriba del área donde confluyen las quebradas El Salado y La Ayurá, en la zona donde se encuentra construido el nuevo puente La Pava que conduce hacia el Parque Ecológico, se abre el abanico aluvial que se manifiesta con la ampliación de la llanura aluvial principalmente hacia la margen izquierda de la quebrada, de modo que esta zona se considera crítica a pesar de que está intervenida mediante la construcción de un muro en enrocado, que tiende a impedir que el flujo se desborde y afecte las construcciones levantadas en el sector (figura 9).



Figura 9. Quebrada La Ayurá a la altura del puente La Pava. Obsérvese el muro levantado hacia la margen izquierda, que pretende impedir que el flujo afecte las construcciones aledañas representadas por una placa polideportiva y algunas viviendas.

El parque ecológico El Salado construido a lo largo del cauce de la quebrada La Ayurá, aguas arriba del puente La Pava, se encuentra en amenaza potencial por avenida torrencial, debido a que su infraestructura ocupa completamente el cauce de la quebrada y la llanura aluvial (figura 10). A manera de recomendación y por

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

tratarse de un sitio de esparcimiento metropolitano de asistencia masiva, es oportuno desarrollar un plan de emergencias que contemple rutas de evacuación y sistemas de alerta.



Figura 10. Quebrada La Ayurá, sector del parque ecológico El Salado. El cauce está completamente ocupado por la infraestructura del parque ecoturístico.

6.2 Quebrada La Ahuyamera:

Esta quebrada ha sido reconocida como una corriente de fuertes crecidas y avenidas torrenciales evidenciadas en el tamaño grueso de los bloques que reposan sobre el lecho, principalmente en cercanías a la desembocadura a la quebrada La Ayurá, en el sector Chinguí No. 2 (figura 11). Los registros de eventos de inundación y las condiciones geomorfológicas convierten esta área en una zona crítica altamente susceptible a la ocurrencia de avenidas torrenciales .



Figura 11. Quebrada La Ahuyamera, sector Chinguí No. 2, antes de la desembocadura a la quebrada La Ayurá. Obsérvese el tamaño de los bloques que se encuentran en el cauce.

6.3 Quebrada El Salado:

Esta quebrada viene encañonada aproximadamente hasta el puente localizado en el barrio Salado Cristo, donde se abre el abanico aluvial asociado a esta corriente fluvial. En este punto, las viviendas ubicadas hacia la margen derecha de la quebrada se encuentran expuestas a la amenaza potencial por inundación rápida, así como la vía que conduce hacia el sector de La Catedral y que se localiza hacia la margen izquierda de la quebrada (figura 12a)

El sector de la desembocadura a la quebrada La Ayurá constituye el área más crítica para la ocurrencia de avenidas torrenciales (figura 12b). A partir de este punto se levanta uno de los muros de contención que intenta impedir la circulación del flujo hacia la margen izquierda de la quebrada La Ayurá en caso de una crecida. Cabe aclarar que en este sector el muro correspondiente a la margen derecha está ausente.



Figura 12. Quebrada El Salado. a) Cauce de la quebrada en el sector de Salado Cristo. b) Desembocadura de la quebrada El Salado en la quebrada La Ayurá.

6.4 Quebrada La Zúñiga:

Las inundaciones rápidas tienen lugar en las ampliaciones de la llanura aluvial que se acentúan hacia al barrio Zúñiga (figura 13). En el puente localizado en la Carrera 20 con calle 23 Sur se generan inundaciones con carga gruesa que ocasionan la afectación de viviendas y fincas.



Figura 13. Quebrada La Zúñiga, barrio Zúñiga. Obsérvese la carga del cauce.

6.5 Quebrada La Honda:

Se asocia a este drenaje una llanura aluvial estrecha en el barrio El Esmeralda donde se pueden generar inundaciones rápidas (figura 14).



Figura 14. Quebrada La Honda, barrio El Esmeraldal.

6.6 Quebrada La Mina

La quebrada fluye en un cauce muy encañonado hasta la calle 40F Sur donde comienza a ampliarse la llanura de inundación. Aguas abajo, en la calle 40F Sur con la carrera 25 A, se localiza un puente para acceder a la infraestructura de la empresa G.M.G. que representa un punto crítico por tratarse de un lleno artificial que impide la circulación del flujo de la quebrada, provocando un posible represamiento en este punto y la consecuente inundación del sector (figura 15).

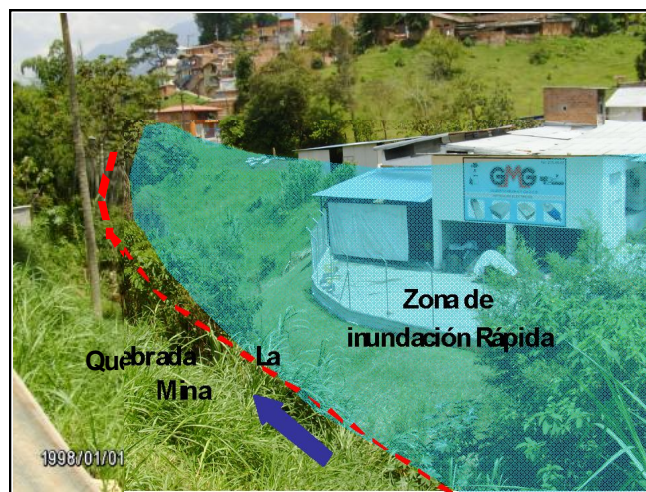


Figura 15. Quebrada La Mina, barrio La Mina parte alta. En esta zona tiende a ampliarse la llanura de inundación, sobre la cual se han instalado construcciones industriales y residenciales.

Hacia la calle 40 D Sur, en el barrio denominado La Mina parte Baja, comienza la obra hidráulica representada por un box culvert de 2 m. * 1.50 m. que cubre en su

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

totalidad la quebrada hasta la avenida Las Vegas. A partir de este punto el cauce de la quebrada La Mina se encuentra totalmente urbanizado. Este punto se considera crítico en la medida en que las crecientes pueden sobrepasar fácilmente estas dimensiones de la obra provocando la inundación de la vía que se extiende por encima de la quebrada y las viviendas aledañas. En este orden de ideas se considera que la calle 40D Sur y parte de la carrera 26 pueden ser zonas inundables (figura 16).



Figura 16. Quebrada La Mina, barrio La Mina parte baja. **a)** Inicio de la cobertura en box culvert del cauce. **b)** Primer tramo de cobertura inundable por insuficiencia hidráulica de la obra

6.7 Quebrada La Minita:

Se identificó un punto crítico hacia el sector institucional del barrio La Mina, más específicamente a la altura del colegio Comercial. En esta zona se inicia el box culvert que pretende cubrir la quebrada La Minita hasta la confluencia con la quebrada La Mina (figura 17). La insuficiencia hidráulica de la obra provoca el desbordamiento de las aguas en épocas de lluvia generando principalmente la inundación por escorrentía en la calle 41 Sur y por ende la inundación de las viviendas, cuya vía constituye el acceso directo, ubicadas en la calle 41 Sur con carrera 25, las cuales se encuentran localizadas en una depresión que favorece la acumulación de las aguas.

A partir de este punto se presenta una llanura de inundación relativamente amplia y urbanizada, pero la quebrada permanece cubierta en gran parte por unas placas removibles que permiten la rápida solución de problemas relacionados con la dinámica fluvial de la quebrada (figura 18).



Figura 17. Cobertura de la quebrada La Minita en el barrio San Rafael. Estas áreas son debidamente aprovechadas como zonas de recreación y esparcimiento.



Figura 18. Inicio de la cobertura en box culvert del cauce de la quebrada La Minita a la altura del colegio El Comercial. Esta zona constituye el sector institucional del barrio San Rafael.

6.8 Quebrada La Heliadora:

Este drenaje fluye sobre un cauce encañonado donde se pueden presentar inundaciones rápidas en las pequeñas ampliaciones de la llanura aluvial cerca de la urbanización Gualandayes. Se señala un punto crítico donde inicia la cobertura del cauce, la cual está representada por un box culvert de 2 m. x 1.50 m. localizado en los alrededores de la unidad residencial Torres de Badalona (figura 19).



Figura 19. Inicio de cobertura en box culvert para la quebrada La Heliadora en el barrio La Paz.

6.9 Quebrada La Sebastiana:

En el barrio La Inmaculada, antes de la desembocadura en la quebrada La Ayurá, se localiza una zona de inundación rápida crítica dadas las condiciones geomorfológicas y la disponibilidad de material en el cauce (figura 20). El puente ubicado hacia la parte trasera del hospital Manuel Uribe Ángel es considerado como un punto crítico ya que puede favorecer bloqueos del cauce en caso de presentarse una creciente de la quebrada. Aguas arriba de este sector, la quebrada comienza a encañonarse generando pequeñas ampliaciones de la llanura aluvial propensas a inundaciones. En una de estas ampliaciones se ubica la urbanización Gascuña, la cual, de acuerdo con la información de eventos ocurridos, ha registrado inundaciones para las que se han calculado un periodo de retorno de cinco años².

² Florez M., Parra N., Barrera J. Escobar A. Mapa de Amenaza, Vulnerabilidad y riesgo del municipio de Envigado-Antioquia. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental. Universidad de Antioquia.



Figura 20. Quebrada La Sebastiana, barrio La Inmaculada. Los bloques que reposan en el cauce presentan tamaños considerables que reflejan la torrencialidad del drenaje.

- **Zona de confluencia entre las quebradas La Sebastiana y El Atravesado:** Esta zona, se caracteriza por presentar una gran acumulación de material grueso representado por bloques de tamaños considerables que evidencian el carácter torrencial de la confluencia (figura 21).

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

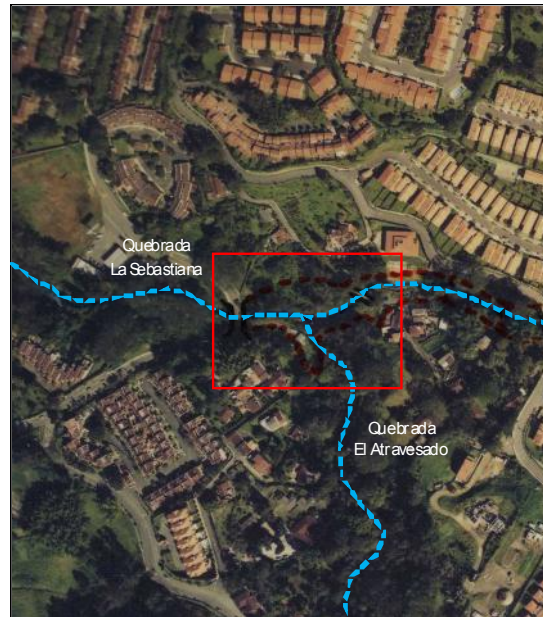


Figura 21. Zona crítica de avenida torrencial representada por la confluencia de las quebradas La Sebastiana y El Atravesado.

Como se mencionó anteriormente, la presencia de bloques de tamaños métricos en los cauces da cuenta de la torrencialidad de ambas quebradas, la cual afecta directamente algunas viviendas pertenecientes al sector Isla Santo Domingo. Según comunicación verbal con uno de los habitantes del sector, el cauce de la quebrada ha migrado a través de los años debido a la acumulación de tierra y escombros asociada al cauce, pues los movimientos de tierra son constantes, dado que el crecimiento poblacional a lo largo de las márgenes de la quebrada ha generado el desarrollo constante de explanaciones (figura 22).



Figura 22. Quebrada La Sebastiana, barrio El Chocho. **a)** Desembocadura de la quebrada El Atravesado en la quebrada La Sebastiana. Esta área es altamente susceptible a la ocurrencia de avenidas torrenciales. **b)** Movimientos de tierra asociados al cauce.

7. CONCLUSIONES

- Los contrastes geomorfológicos del municipio de Envigado generan condiciones propicias para la ocurrencia de eventos relacionados con inundaciones lentas y rápidas y avenidas torrenciales. Los sitios de cambio de pendiente y las llanuras aluviales amplias constituyen los mayores escenarios para la generación de dichos fenómenos, los cuales están condicionados a su vez por la disponibilidad de material de arrastre y lluvias de gran intensidad.
- El carácter torrencial de algunas quebradas que recorren el municipio se encuentra evidenciado por el tamaño del material presente en el cauce. Las quebradas La Ayurá, La Ahuyamera, La Sebastiana y El Atravesado exhiben en sus cauces bloques de tamaños importantes que sugieren la alta disponibilidad de material grueso en las zonas de escarpe y pie de escarpe que es transportado especialmente en épocas de fuertes lluvias.
- En la literatura existente se tiene referencia de eventos anteriores desde el año 1944. Las avenidas torrenciales se encuentran únicamente asociadas a la quebrada La Ayurá y las inundaciones en general se relacionan con las crecidas de múltiples quebradas que recorren especialmente los barrios El Dorado, Guateros, La Mina, Chingú, El Salado, Primavera y el sector de Las Palmas.
- La amenaza por inundaciones lentas está con frecuencia representada por aguas que fluyen por escorrentía a raíz del desbordamiento de las quebradas generando principalmente la inundación de vías. Las áreas más susceptibles a ser afectadas por fenómenos de inundación lenta están asociadas a las siguientes quebradas:
 - **Quebradas La Ayurá y La Sebastiana:** Zona de confluencia localizada a la altura del hospital Manuel Uribe Ángel.
 - **Quebrada Las Palmas:** Vía Las Palmas, entre la glorieta de Sancho Paisa y el peaje Envigado.
 - **Quebrada La Morgan:** Sector Las Palmas, cerca de la estación de policía de Palmitas.
 - **Quebrada La Ayurá:** Sector Villa Grande ubicado a la altura de la avenida El Poblado.
 - **Quebradas La Honda y La Zúñiga:** Zona de confluencia en el sector de La Frontera.
 - **Quebrada La Sucia:** Sector Señorial
- Las inundaciones rápidas ocurren en las zonas de transición, siendo importantes las que se encuentran asociadas a las principales quebradas que hacen parte de las microcuencas La Mina y La Ayurá:

Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de Propuestas de gestión del riesgo.

- Quebrada La Ayurá:** Tramo comprendido entre la desembocadura de la quebrada La Ahuyamera y la desembocadura de la quebrada La Sebastiana.
- **Quebrada La Sebastiana:** Sector La Inmaculada
- **Quebrada La Zúñiga:** Sector Zúñiga
- Quebrada La Honda: Sector El Esmeraldal
- **Quebrada El Salado:** Sector Salado Cristo
- **Quebrada La Ahuyamera:** Sector Chinguí No. 2
- **Quebrada La Heliodora:** Sector El Dorado, cerca de la unidad residencial Torres de Badalona.
- **Quebrada La Mina:** Sector La Mina parte alta y baja.
- **Quebrada La Minita:** Sector institucional del barrio San Rafael.

• Los sectores en los que se ha identificado una alta amenaza por avenidas torrenciales están representados por algunas confluencias de quebradas importantes pertenecientes a la microcuenca de La Ayurá. El tramo en el cual confluye la quebrada La Ayurá con las quebradas El Salado y La Ahuyamera, que abarca los barrios Chinguí No. 2 y El Remanso, constituyen una zona bastante crítica cuya amenaza ha sido mitigada mediante la instalación de muros de contención sobre las márgenes de la quebrada La Ayurá. Asimismo, la confluencia de las quebradas La Sebastiana y El Atravesado, en el barrio Isla Santo Domingo, representa una zona crítica en la que pueden ser fuertemente afectadas las viviendas aledañas a ambos cauces.

• El parque ecológico El Salado se encuentra ocupando una zona de alta amenaza por inundaciones rápidas y avenidas torrenciales, siendo vulnerables a este tipo de fenómenos tanto las personas que visitan el parque, como la infraestructura instalada.

8. REFERENCIAS.

Florez M., Parra N., Barrera J. Escobar A. (2007). Mapa de Amenaza, Vulnerabilidad y riesgo del municipio de Envigado-Antioquia. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental. Universidad de Antioquia.

SOLINGRAL (2004). Estudio de Riesgo al deslizamiento en el municipio de Envigado.