

**APLICACIÓN DE SIG PARA LA ZONIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE
AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 14 DEL MUNICIPIO DE
BUCARAMANGA**

**LUIS ENRIQUE RODRIGUEZ BELTRAN
PEDRO JAVIER RUEDA POSADA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**APLICACIÓN DE SIG PARA LA ZONIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE
AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 14 DEL MUNICIPIO DE
BUCARAMANGA**

**LUIS ENRIQUE RODRIGUEZ BELTRAN
PEDRO JAVIER RUEDA POSADA**

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Director

JOHN JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ
Ingeniero Civil, Ph D.

Codirector

VANESSA MERCEDES QUIROGA ARCINIEGAS
Ingeniera Civil, Esp.



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que me han acompañado en mi formación y en mi vida, a mi familia por su apoyo, a mis padres, especialmente a mi madre a quien amo y debo todo lo que soy, a mis hermanas, mujeres a las que admiro y a las que estoy profundamente agradecido, a mi padre que era un gran hombre y le agradezco muchas de las enseñanzas que me brindo.

A la Universidad Industrial de Santander, la Escuela de ingeniería Civil y en especial al grupo de investigación Geomática sin el cual no habría sido posible concebir este proyecto, a nuestros directores el Ingeniero John Cáceres y a la Ingeniera Vanessa Quiroga por acompañarme y guiarme en este proceso, a los profesores que me han educado en especial a Leonor Pérez, Hernán Porras, Luz Marina Torrado y Mario Ramírez.

A mis amigos por brindarme tantos momentos felices y por el apoyo incondicional siempre: Tatiana, Sergio Andrés, Cindy, Alexandra, Doña Teya, Cindy Nathalia que no se encuentra en cuerpo presente pero la llevo en mi corazón.

Luis Enrique Rodríguez Beltrán

En primer lugar a Dios por haberme fortalecido en las adversidades que surgieron para culminar este ciclo de mi vida.

A mis padres, quienes hicieron todo lo posible para que pudiera salir triunfante a lo largo de todo este proceso.

A Edith Celis Franco, por acompañarme durante todo este arduo camino y compartir conmigo alegrías y ser de apoyo en los momentos difíciles.

A Luis Enrique Rodríguez compañero de proyecto, que con su ayuda logré el primer objetivo de este año. Y por demostrarme que podemos ser grandes amigos y compañeros de trabajo a la vez.

Finalmente, a la universidad Industrial de Santander, a la escuela de ingeniería Civil, y al grupo de investigación Geomática, a los Ingenieros John Y Vanessa, por guiarnos y compartir de sus conocimientos.

Pedro Javier Rueda Posada

DEDICATORIA

A toda mi familia, especialmente a mi madre Beatriz a quien amo infinitamente por su entrega incondicional y su esfuerzo constante, a mi padre, y mis hermanas y sobrinos.

Luis Enrique Rodríguez Beltrán

Dedico este proyecto a Dios y a mis padres. A Dios porque en los momentos de aflicción pudo levantarme y sostenerme con su diestra llevándome de victoria en victoria; toda la Gloria es para ÉL. A mis padres les dedico este triunfo con mucho amor y cariño porque sin la ayuda de ellos no estuviera donde ahora estoy.

Pedro Javier Rueda Posada

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Página</i>
INTRODUCCIÓN	17
1. CONCEPTOS PRINCIPALES	20
1.1. Amenaza	20
1.2. Amenaza por deslizamiento	20
1.3. Deslizamiento	20
1.4. Mapa	20
1.5. Sistema de información geográfica	21
1.6. Susceptibilidad a los deslizamientos	21
1.7. Periodo de retorno.....	21
1.8. Zonificación	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1. Métodos para la zonificación de amenazas por deslizamientos.....	23
2.2. Método Heurístico	23
2.2.1. Análisis geomorfológico	24
2.2.2. Combinación cualitativa de mapas.....	24
2.3. Método Mora - Vahrson.....	25
2.4. Metodología Aplicada.....	26
3. ACTIVIDADES DE PREPARACIÓN Y MAPAS PRELIMINARES	28
3.1. Actividades de Preparación.....	28
3.1.1. Elaboración de mapa base.....	29
3.1.2. Formulación del objetivo de estudio	29
3.1.3. Definición del nivel de estudio	30
3.1.4. Delimitación del área de estudio	30
3.1.5. Recopilación de información secundaria específica	31
3.1.6. Selección de imágenes satelitales	31

3.2. Mapas Preliminares.....	32
3.2.1. Mapa de pendientes.....	32
3.2.2. Mapa geológico.....	33
3.2.3. Mapa de humedad relativa del suelo.....	35
3.2.4. Mapa geomorfológico.....	35
3.2.5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.....	36
3.2.6. Mapa de precipitación.....	38
3.2.6.1. Información recopilada.....	38
4. APLICACIÓN DE SIG EN LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZAS	41
4.1. Evaluación de Parámetros.....	42
4.1.1. Parámetro pendiente (P).....	42
4.1.2. Parámetro litológico (L).....	43
4.1.3. Parámetro de humedad relativa (H).....	44
4.1.4. Parámetro geomorfológico (G).....	45
4.1.5. Parámetro de cobertura vegetal y uso del suelo (S).....	46
4.1.6. Parámetro de precipitación (Tp).....	46
4.2. Evaluación dela amenaza.....	47
5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	49
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS CON MAPA CDMB	53
7. CONCLUSIONES.....	54
8. RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema conceptual generalizado para la evaluación de amenazas por deslizamiento	27
Figura 2. Actividades principales para la elaboración inicial de mapas.....	28
Figura 3. Mapa base de la zona de estudio	29
Figura 4. Localización geográfica de la comuna 14 de Bucaramanga	30
Figura 5. Imagen satelital analizada de la comuna 14 de Bucaramanga	31
Figura 6. Esquema de operación de los factores extrínsecos de la comuna 14 del municipio de Bucaramanga.	47

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Fuente consultada en la investigación.....	32
Tabla 2. Unidades aflorantes en el sector comuna 14.....	34
Tabla 3. Leyenda del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.....	36
Tabla 4. Estaciones meteorológicas utilizadas.....	39
Tabla 5. Grupos de parámetros para la evaluación de amenazas	42
Tabla 6. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro pendiente (P)	43
Tabla 7. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro litológico (L).....	44
Tabla 8. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro de humedad relativa del suelo (H)	44
Tabla 9. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro geomorfológico (G)	45
Tabla 10. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro de cobertura vegetal y uso del suelo (S).....	46
Tabla 11. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro de precipitación (Tp)	47
Tabla 12. Clasificación utilizada para evaluar la amenaza	48
Tabla 13. Porcentaje de área por rango de pendiente	49
Tabla 14. Porcentaje de área por unidad litológica.....	50
Tabla 15. Porcentaje de área por uso de suelo.....	51
Tabla 16. Niveles de amenaza en la comuna 14 (Año 2013).....	52
Tabla 17. Niveles de amenaza en la comuna 14 (Año 2010).....	53

Tabla 18. Variación de amenazas en la comuna 14 entre los años 2010-2013	53
Tabla 19. Funciones de distribución seleccionadas para cada estación para el cálculo de la precipitación máxima en 24 horas	80
Tabla 20. Precipitación máxima en 24 H en cada estación para distintos periodo de retorno	81
Tabla 21. Funciones de distribución seleccionadas para cada estación para el cálculo de la precipitación para diferentes duraciones de lluvia	81
Tabla 22. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 20 minutos para la estación de Llano Grande	82
Tabla 23. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 20 y 200 minutos para la estación de Llano Grande	82
Tabla 24. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 10 minutos para la estación de La Granja	83
Tabla 25. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 10 y 120 minutos para la estación de La Granja	83
Tabla 26. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 30 minutos para la estación de Club Campestre	84
Tabla 27. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 30 y 240 minutos para la estación de Club Campestre	84
Tabla 28. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 10 minutos para la estación de El Rasgón	85
Tabla 29. Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 10 y 90 minutos para la estación de El Rasgón.....	85

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo A. Cartera topográfica.....	62
Anexo B. Mapa de pendientes	63
Anexo C. Mapa geológico	64
Anexo D. Mapa de humedad relativa del suelo.....	65
Anexo E. Mapa geomorfológico	66
Anexo F. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo	67
Anexo G. Mapa de precipitación	68
Anexo H. Mapa con valoración del parámetro pendiente.....	69
Anexo I. Mapa con valoración del parámetro litológico	70
Anexo J. Mapa con valoración del parámetro humedad relativa.....	71
Anexo K. Mapa con valoración del parámetro geomorfológico	72
Anexo L. Mapa con valoración del parámetro cobertura vegetal y uso del suelo.....	73
Anexo M. Mapa con valoración del parámetro precipitación.....	74
Anexo N. Mapa de Amenazas obtenido a partir de la metodología aplicada	75
Anexo O. Mapa de Amenazas obtenido por la CDMB	76
Anexo P. Mapa de ubicación de los sondeos geotécnicos.	77
Anexo Q. Tratamiento probabilístico de la información	78
Anexo R. Estudio Geomorfológico	86

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE SIG PARA LA ZONIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 14 DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA.¹

AUTORES: Luis Enrique Rodríguez Beltrán
Pedro Javier Rueda Posada²

PALABRAS CLAVE: Zonificación de amenazas, Fenómenos de remoción en masa, Susceptibilidad a los deslizamientos, Sistemas de Información Geográfica SIG, Evento detonante.

CONTENIDO:

En este artículo se presenta un estudio de zonificación de amenazas por deslizamientos para una zona crítica de la ciudad de Bucaramanga, la comuna 14 (Morrongo), con el propósito de comparar los resultados con el estudio realizado por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) en el año 2010 en esa misma zona. La zonificación de amenazas fue realizada mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica SIG, herramienta computacional que ha sido de gran importancia en la gestión del riesgo en diferentes países del mundo. Este estudio consideró especialmente la variación de un evento detonante, la precipitación, que debido a la ola invernal ocurrida 2010 – 2011 en Colombia, pudo haber efectuado cambios en el nivel de amenaza sectorial por deslizamiento en la zona objeto de estudio. La metodología aplicada en esta investigación, fue con base en la metodología Mora – Vahrson, la cual consistió específicamente en la asignación de pesos a los parámetros involucrados en los deslizamientos y la combinación cualitativa de mapas. A partir de este estudio, se concluyó que la ola invernal 2010-2011 ocurrida en el país produjo cambios significativos en el nivel de amenazas por deslizamiento que se presentaban en varios sectores de la zona, por lo que la mayoría de los sectores que estaban en amenaza media, ahora se encuentran en amenaza alta.

¹ Trabajo de grado desarrollado en la modalidad de investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: John Jairo Cáceres Jiménez, Co-director: Vanessa Mercedes Quiroga Arciniegas.

ABSTRACT

TITLE: APLICACIÓN DE SIG PARA LA ZONIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 14 DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA³

AUTHORS: Luis Enrique Rodríguez Beltrán
Pedro Javier Rueda Posada⁴

KEY WORDS: Zoning of threats, phenomena of landslides, susceptibility to landslides, GIS geographic information, detonating event systems.

CONTENT:

This article presents a study of zoning of threats by landslides to a critical area of the city of Bucaramanga, the commune 14 (Morrórico), in order to compare the results with the study conducted by the Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CMDDB) in 2010 in the same area. The zoning of threats was carried out through the use of Geographic Information System (GIS), computational tool which has been of great importance in the management of risk in different countries of the world. This study considered especially the variation of a triggered event, precipitation, which due to the winter wave occurred 2010-2011 in Colombia, could have made changes at the level of sectoral threat by landslide in the area under study. The methodology applied in this research, was based on the Mora - Vahrson, methodology which specifically consisted in the assignment of weights to the parameters involved in landslides and qualitative maps combination. From this study, it was concluded that the winter wave 2010 - 2011 in the country produced significant changes in the level of threats slip-ups in several sectors of the area, so most of the sectors that were half threat, are now in high threat.

³ Final undergraduate Project developed in the research modality.

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: John Jairo Cáceres Jiménez, Co-director: Vanessa Mercedes Quiroga Arciniegas

INTRODUCCIÓN

La zonificación de amenazas por deslizamientos es un tema de gran importancia que se ha venido desarrollando con fuerza en los últimos años por varios países del mundo. Esto se hace con varios propósitos, ya sea para un estudio de impacto ambiental de trabajos de ingeniería o para concientizar o alertar a los tomadores de decisiones, entre otros.

La comuna 14, ubicada al nororiente de la ciudad de Bucaramanga, cuenta con una población aproximada de 21.894 habitantes (según DANE 2005) y se caracteriza por pertenecer al estrato socioeconómico 1 y 2. Está situada en una zona crítica debido a las constantes amenazas por deslizamientos afectan a las familias que allí radican, generando así pérdidas materiales, debilitamiento de la estructuras adyacentes y en los peores casos pérdidas de vidas humanas.

La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) realizó, en el año 2010, un estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en la comuna 14 y algunos sectores de las comunas 9, 10 y 11 del municipio de Bucaramanga, con el fin de elaborar diseños para la estabilización de varios sectores afectados por este fenómeno, debido a que las condiciones de estos terrenos estaban siendo alteradas por eventos externos como la precipitación, entre otros.

En Colombia, durante la ola invernal 2010-2011 manifestada con intensas lluvias en varias zonas del país, se produjo un incremento de precipitación que afectó con inundaciones, avalanchas y remociones en masa a la población en general, trayendo consigo consecuencias muy desfavorables, tanto socioeconómicas como ambientales. Este evento se consideró anormal, debido a que nunca antes se había presentado un hecho similar que sobrepasara los niveles de precipitación observados históricamente en el país.

En el informe titulado Valoración de daños y pérdidas, Ola invernal en Colombia 2010-2011⁵ menciona que “En general, los niveles respondieron bruscamente al alto aporte de precipitación durante noviembre y diciembre de 2010, y de febrero a abril de 2011, y estuvieron por encima de los máximos promedios históricos” de lo que se puede inferir que finalizando el año 2010 e iniciando el 2011 fue el lapso de tiempo con mayor precipitación en el país.

También se destaca que en gran parte del país los efectos inmediatos producidos por la ola invernal de 2010-2011, aparte de las inundaciones, fueron los deslizamientos y movimientos de masas que conllevaron a daños considerables en infraestructura. Además, en dicho informe se resalta que “El IDEAM comparó la persistencia de la amenaza por deslizamientos detonados por las lluvias en el periodo la Niña 2010 con uno neutro (2008), y concluye que fue muy significativo el aumento del área de amenaza por departamentos, según el cambio en la categoría de esta”. Para el caso de Santander la variación obtenida en zonas altas de amenazas por deslizamientos en ese lapso de tiempo fue de un 1,1 % lo que significa que el fenómeno de remoción en masa ha venido incrementado en el departamento.

Es por esta razón que el propósito de esta investigación fue establecer los niveles de amenaza sectorial por deslizamientos existentes en la comuna 14 (Morrórico) después de la ola invernal ocurrida en Diciembre de 2010, mediante la elaboración de un mapa de amenazas, comparando los resultados obtenidos con el mapa de amenazas realizado por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) en el año 2010 y evaluando los cambios obtenidos. Para ello se aplicó un método heurístico basado en la combinación cualitativa de mapas y el uso de los Sistemas de Información Geográfica SIG.

⁵ Valoración de daños y pérdidas, Ola invernal en Colombia 2010-2011. Comisión Económica para América Latina y el Caribe – Cepal, Banco Interamericano de Desarrollo – BID © 2012

A partir de este estudio, se concluye que las condiciones ambientales y en especial un evento detonante como la precipitación, influyen en la aceleración de los procesos de remoción en masa.

El artículo se divide en ocho secciones: En la siguiente sección se desarrollan los conceptos relacionados con la amenaza por deslizamiento y la construcción de mapas. Más adelante, la sección II describe la metodología utilizada para la zonificación de amenazas. En la sección III se enuncian las actividades de preparación para la elaboración de mapas preliminares. La sección IV trata la aplicación SIG en la elaboración de mapas de amenazas. Luego se muestran los resultados obtenidos en la sección V y en la sección VI se establece el análisis comparativo con el mapa realizado por la CDMB. En la sección VII se establecen las principales conclusiones de este trabajo de investigación. Finalmente, en la sección VIII, se muestran las recomendaciones para el presente trabajo.

1. CONCEPTOS PRINCIPALES

A continuación se definen los conceptos principales relacionados con el tema a desarrollar y la elaboración de mapas.

1.1. Amenaza.

Amenaza es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor en un área específica, dentro de un determinado periodo de tiempo (VARNES, 1984).

1.2. Amenaza por deslizamiento.

La amenaza por deslizamiento se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino en un área o lugar determinado, y en un tiempo dado, con una intensidad específica. Es el resultado del análisis de la susceptibilidad o inestabilidad del terreno y de un detonante, que es la lluvia para el evento la Niña.⁶

1.3. Deslizamiento.

En una zona, los deslizamientos ocurren debido a que las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas son modificadas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, y por otros factores como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad.

1.4. Mapa.

Un mapa es la imagen o representación bidimensional que muestra la ubicación, localización y características de los lugares. Es el medio más apropiado para la expresión del pensamiento geográfico (ubicación e identificación de fenómenos

⁶ Valoración de daños y pérdidas, *Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL, Banco Interamericano de Desarrollo – BID © 2012. Pág. 20.

naturales o sociales) y es un instrumento de síntesis y análisis del espacio representado.⁷

1.5. Sistema de Información Geográfica.

Un sistema de información geográfica (SIG), es un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapa) y atributos (descriptivos) de acuerdo con especificaciones y requerimientos concretos. Los SIG son sistemas diseñados para trabajar con datos, mapas e imágenes referenciados por coordenadas geográficas o imágenes de igual tamaño (filas y columnas) y la misma resolución espacial (píxeles).⁸

1.6. Susceptibilidad a los deslizamientos.

Predisposición del terreno a sufrir un deslizamiento en función de sus condiciones geológicas, topográficas y de humedad propia (Mora y Vahrson, 1994).

1.7. Periodo de retorno.

Es el tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos improbables y con posibles efectos catastróficos.

1.8. Zonificación.

La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas de acuerdo con el grado real o potencial de amenaza o de riesgo.⁹

⁷ Cartilla - Construcción de mapas de riesgo, criterios metodológicos. COMISIÓN EUROPEA/OXFAM/FUNDEPCO, 2008. Primera edición: Octubre de 2008. La Paz, Bolivia. Pág. 10.

⁸ Tomado del Boletín Geológico. INGEOMINAS. Volumen 34. pp. 1-40, 1994. Santafé de Bogotá – Colombia. ISSN – 0120 – 1425”

⁹ Tomado del libro de Jaime Suarez. Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Capítulo 13 Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. Pág. 528.”

2. METODOLOGÍA

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC), en colaboración con el Instituto Internacional de Ciencias de la Geo-información y Observación de la Tierra (ITC), desarrollaron un módulo de capacitación denominado “Aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos para el Análisis de Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo”.¹⁰

El módulo tiene como finalidad la integración del conocimiento existente sobre la ocurrencia de fenómenos naturales y el uso de técnicas de geo-información en la zonificación de amenazas asociadas a estos eventos y su transferencia a instituciones involucradas en la toma de decisiones en el ordenamiento y desarrollo territorial; así como de las regulaciones y legislaciones apropiadas, y ha sido de referencia para que diversas entidades, a nivel mundial, implementaran metodologías en la reducción de desastres.

En el marco teórico del módulo, se enuncia que la zonificación de amenaza por deslizamientos consiste en dos aspectos:

- ✓ La evaluación de la susceptibilidad del terreno a una falla por pendiente.
- ✓ La determinación de la probabilidad de que un evento “detonante” ocurra.

La susceptibilidad determina la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir con base en las condiciones locales del terreno. Por tanto indicará, qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de la zona objeto de estudio para que puedan ocurrir deslizamientos.

El mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad de un área indicando donde existe o no, condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos. Este mapa se

¹⁰ Disponible en <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/start.html>

obtiene de un análisis multivariable entre los factores del terreno que afectan la susceptibilidad a los deslizamientos y el mapa de inventario de deslizamientos.

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad se tienen en cuenta generalmente tres elementos:¹¹

- a) Relieve y mapa de pendientes.
- b) Características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del terreno.
- c) Inventario de deslizamientos ocurridos en el pasado.

2.1. Métodos para la zonificación de amenazas por deslizamientos.

Soeters y Van Westen (1996) hacen una compilación detallada de las metodologías que se han desarrollado para evaluar amenaza por movimientos en masa y las agrupa de la siguiente manera:¹²

- Inventario de deslizamientos.
- Evaluación heurística.
- Evaluación estadística.
- Evaluación determinística.

La zonificación de amenazas por deslizamientos que se realizó en este proyecto fue con base en el método heurístico.

2.2. Método Heurístico.

El enfoque heurístico, basado en el conocimiento de todas las causas y los factores que afectan la estabilidad de laderas en el área bajo investigación, es un método indirecto y principalmente cualitativo, que depende de qué tan bien y que

¹¹ Tomado del libro de Jaime Suarez. *Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Capítulo 13. Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. Pág. 535.*”

¹² Tomado de la zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. CDMB.

tan el investigador entiende los procesos geomorfológicos presentes en el terreno. Los factores de inestabilidad son clasificados y ponderados de acuerdo a su importancia en la generación de movimientos en masa (Nilsen & Brabb, 1977, Amadesi & Vianello, 1978; Hollingsworth & Kovacs, 1981; Neeley & Rice, 1990; Montgomery et al., 1991; Mejía – Navarro et al., 1994), todos citados por Guzzetti et al. (1999).¹³

Existen dos tipos de análisis heurísticos: el análisis geomorfológico y la combinación cualitativa de mapas.¹⁴

2.2.1. Análisis geomorfológico.

Es conocido también como el método de cartografía directa. En éste el grado de susceptibilidad del terreno es determinado por el geólogo directamente en el campo. El proceso se basa en su experiencia. Los criterios aplicados son, por lo tanto, difíciles de definir, ya que varían según el sitio estudiado.

2.2.2. Combinación cualitativa de mapas.

En este método se usa el criterio experto para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a una serie de mapas parámetro (mapas de condiciones del terreno que se consideran relacionadas, en diferente grado, con la ocurrencia de deslizamientos). Las condiciones del terreno se suman de acuerdo con estos pesos, lo que lleva a valores de susceptibilidad que pueden ser agrupados en categorías o clases. Este tipo de enfoque heurístico se basa en el conocimiento a priori de las causas de deslizamiento en el área investigada; de ahí que los factores de inestabilidad sean clasificados y sus pesos

¹³ Trabajo de grado: Evaluación de Amenaza por Deslizamiento con Base en Mapas de Geología y Geomorfología. Diego Castiblanco.

¹⁴ SEGURA, G., BADILLA, E. & OBANDO, L. 2011: Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba.- Rev. Geol. Amér. Central, 45. Pág.102.

asignados, de acuerdo a su importancia asumida o esperada en la generación de deslizamientos.

2.3. La Metodología Mora-Vahrson.

El método Mora-Vahrson es de tipo heurístico, específicamente una combinación cualitativa de mapas. Se basa en la interacción entre los factores relacionados con la susceptibilidad: Relieve, litología y humedad, y dos factores externos y dinámicos que actúan como factores de disparo, los cuales son: la sismicidad y las lluvias intensas. Estos factores se obtienen de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal.

Cada factor define un índice de influencia para determinado sitio y la combinación de cada uno de ellos, permite encontrar un grado de amenaza al deslizamiento. Esto se lleva a cabo con la siguiente ecuación:¹⁵

$$H_l = (S_r \times S_l \times S_h) + (T_s + T_p)$$

Dónde:

H_l → Índice de amenaza a deslizamiento

S_r → Índice de relieve relativo

S_l → susceptibilidad litológica

S_h → influencia de la humedad natural del suelo

T_s → influencia de la sismicidad

T_p → influencia de la intensidad de la precipitación

Para los resultados obtenidos a través de la combinación de todos los factores por medio de la ecuación anterior, no se puede establecer una escala única de valores, debido a que éstos dependen de las condiciones del área de estudio. La clasificación de amenaza obtenida es una representación cuantitativa de los

¹⁵ Ecuación tomada del libro de Jaime Suarez. *Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Capítulo 13 Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. Pág. 549.*

diferentes niveles de amenaza, que muestra solamente el rango de amenaza relativa en un sitio particular y no la amenaza absoluta.

2.4. Metodología Aplicada.

El método aplicado en la elaboración del mapa de amenazas por deslizamiento en el área objeto de estudio fue el heurístico con un tipo de análisis de combinación cualitativa de mapas. Se utilizó como referencia el modelo heurístico desarrollado por Mora y Vahrson en 1991, para plantear un método alternativo teniendo en cuenta la siguiente consideración planteada por los autores de este proyecto:

- Se realizó una modificación significativa a la ecuación general de método Mora-Vahrson agregando nuevos parámetros que se consideran de relevancia para el estudio de la amenaza.¹⁶

$$A_d = (P \times L \times H \times G \times C) + (T_p)$$

Dónde:

- A_d → amenaza al deslizamiento
 P → pendiente del terreno
 L → litología
 H → humedad natural del suelo
 G → geomorfología
 S → uso del suelo y cobertura vegetal
 T_p → intensidad de la precipitación

En la **Figura 1** se plantea el esquema general de la metodología utilizada para evaluar la amenaza al deslizamiento en la zona de estudio.

¹⁶ La ecuación modificada por los autores del presente proyecto incluye factores que son relevantes en el proceso de remoción en masa y excluye un factor detonante que debido al tipo de estudio no fue viable la obtención de los datos del mismo.

Figura 1. Esquema conceptual generalizado para la evaluación de amenazas por deslizamiento.



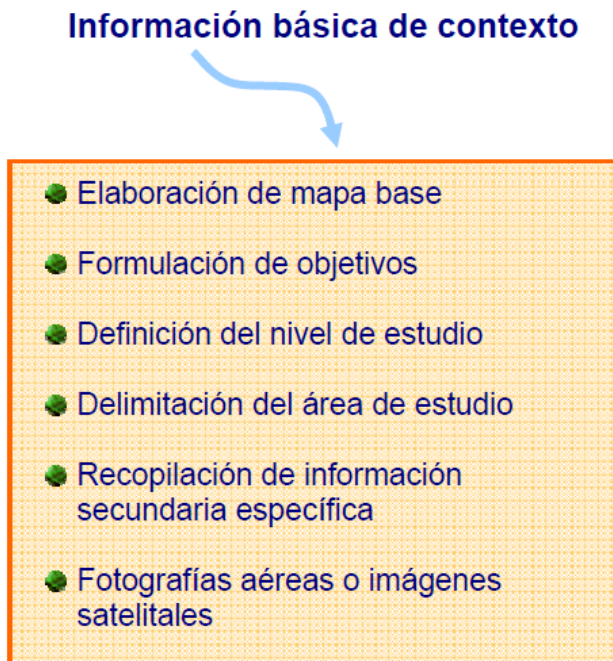
Fuente: Autores

3. ACTIVIDADES DE PREPARACION Y MAPAS PRELIMINARES

3.1. Actividades de Preparación.

Consistió principalmente en un conjunto de actividades que fueron de gran importancia en la elaboración de los mapas preliminares indispensables para desarrollo del proyecto (**Figura 2**). Estas actividades se realizaron con el fin de recopilar información básica del contexto, a partir de la cual da inicio el proceso para obtener como resultado el mapa de amenazas.

Figura 2. Actividades principales para la elaboración inicial de mapas.

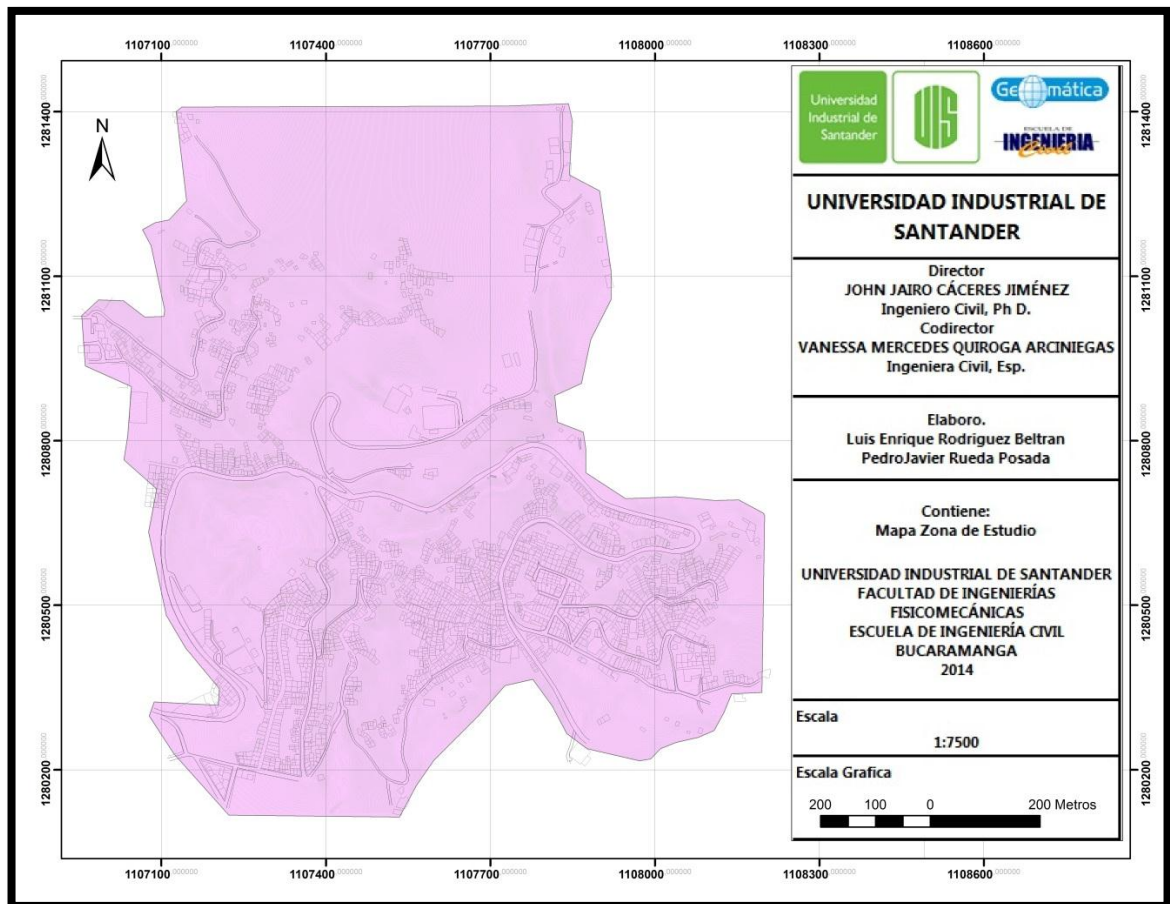


Fuente: (Cartilla - Construcción de mapas de riesgo, criterios metodológicos).

3.1.1. Elaboración de mapa base.

Para la elaboración de un mapa base se utiliza la información disponible y el conocimiento previo del contexto. En este caso, consistió principalmente en realizar un plano a escala 1:7500, en formato digital, a partir de los mapas existentes en la zona de estudio (**Figura 3**).

Figura 3. Mapa base de la zona de estudio.



3.1.2. Formulación del objetivo de estudio.

Realizar un estudio de zonificación de amenazas por deslizamientos en la comuna 14 de Bucaramanga con el fin de evaluar los cambios en el nivel de amenazas después de la ola invernal ocurrida en Diciembre de 2010.

3.1.3. Definición del nivel de estudio.

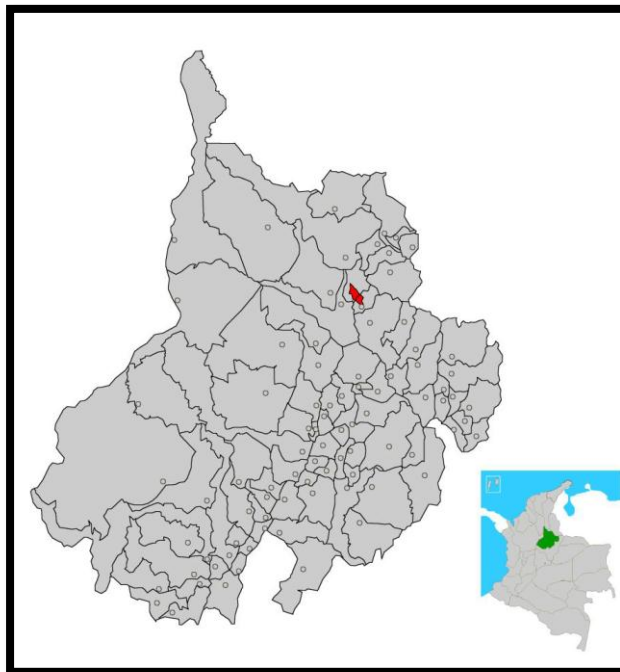
Se refiere a la determinación de la escala de trabajo, de acuerdo con el objetivo, el área de estudio y el tipo de información disponible y requerida.

Teniendo en cuenta lo anterior y basados en que la comuna 14 de Bucaramanga no presenta una gran extensión de área y el objetivo es de elaborar un mapa de amenazas, la escala trabajada fue de 1:7500.

3.1.4. Delimitación del área de estudio.

La comuna 14 (Morrórico) se localiza al nororiente de la ciudad de Bucaramanga (**Figura 4**). La conforman los siguientes barrios: Vegas de Morrórico, El Diviso, Morrórico, Albania, Miraflores, Buenos Aires, Limoncito, Los Sauces, Buenavista y Venado de Oro, comprendiendo un área total de 139 Hectáreas.

Figura 4. Localización geográfica de la comuna 14 de Bucaramanga.



Fuente: (Google.com - 2014)

3.1.5. Recopilación y estudio de información secundaria.

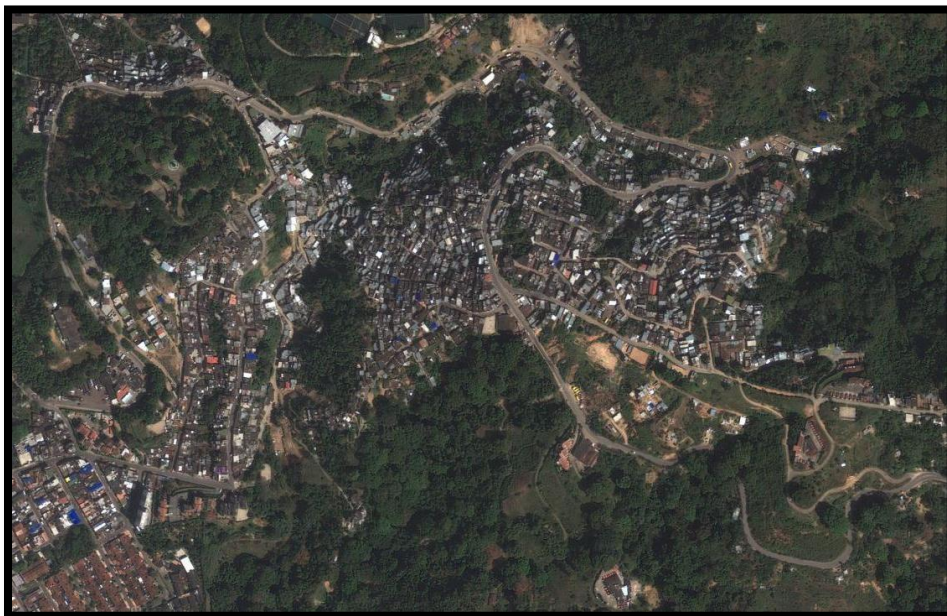
Es esta actividad se pretende recopilar la información relevante de acuerdo con los objetivos, el nivel y área de estudio. Es por eso que para la elaboración del mapa de amenaza se requirió, entre otros tipos de información:

- ✓ Geológica.
- ✓ Geomorfológica (formas del terreno).
- ✓ Uso de la tierra.
- ✓ Información climática (precipitación y humedad).

3.1.6. Selección de imágenes satelitales.

Se analizaron las imágenes satelitales en el área de estudio, las cuales fueron obtenidas por google earth, con el propósito de identificar elementos que no pueden ser observados en un mapa topográfico, como: cobertura vegetal, uso de suelo (**Figura 5**). Este proceso contribuyó para determinar la dinámica del área.

Figura 5. Imagen satelital analizada de la comuna 14 de Bucaramanga.



Fuente: (Google Maps - 2014)

3.2 Mapas Preliminares.

Teniendo en cuenta la metodología seleccionada, se procedió a la recopilación de la información existente de los parámetros (geológicos, geomorfológicos, cobertura y uso del suelo e hidrológicos) que permitieran evaluar la amenaza en la zona de estudio. Para ello se contó con información procedente de las siguientes entidades:

- Universidad Industrial de Santander, UIS.
- Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

En la **Tabla 1** se detalla el tipo de información requerida para la investigación y la fuente consultada para la obtención de la misma.

Tabla 1. Fuente consultada en la investigación.

Información	Fuente
<i>Topográfica</i>	<i>CDMB</i>
<i>Geológica</i>	<i>CDMB</i>
<i>Geomorfológica</i>	<i>CDMB</i>
<i>Vegetación y uso del suelo</i>	<i>UIS</i>
<i>Hidrológica</i>	<i>IDEAM</i>

A continuación se hace una descripción general de los mapas preliminares que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la propuesta metodológica.

3.2.1. Mapa de pendientes.

El mapa de pendientes fue producto de un levantamiento topográfico planimétrico y altimétrico a escala 1:1000, con curvas de nivel cada metro, ejecutado por la CDMB. Los levantamientos se realizaron con base en las coordenadas planas de

las placas GPS que ha materializado el IGAC en el Municipio para su posterior georeferenciación a la Red Geodésica Nacional. Además se levantaron poligonales detallando en cada una de ellas los linderos, los cambios de rumbo y paramentación en los casos que se presentaron, así como el detalle de los caños, ríos, acequias, lagunas: con secciones cada 10 metros, localizando el fondo del cauce, el nivel del agua, orilla del cauce, estructuras de entrega, entre otros. A partir de toda esta información se originó un Modelo de Elevación Digital (MDT) con base en el cual se realizó el cálculo de la pendiente.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en el estudio realizado por la CDMB, se procedió a elaborar un conjunto de curvas de nivel a partir de los datos de la cartera topográfica¹⁷ (ver **Anexo A**). Después se realizó una serie de polígonos en los cuales se pudieron identificar las pendientes para cada zona a una escala 1:7500 (ver **Anexo B**).

3.2.2. Mapa geológico.

Se utilizó el mapa geológico elaborado por la CDMB para la zona objeto de estudio a detalles de las unidades geológicas superficiales a escala 1:1000. Esto se obtuvo a partir del estudio en diferentes puntos de control en los cuales se levantaron secciones estratigráficas con el propósito de definir la litología¹⁸ (ver **Tabla 2**).

En general, la litología que aflora en estos sectores es caracterizada por unidades litoestratigráficas más antiguas, de origen metamórfico-ígneo, tipo neis, esquisto, migmatitas y pequeños intrusivos de granodiorita, haciendo parte del Neis de Bucaramanga de Edad Precámbrico. Otras unidades tales como rocas metamórficas compuestas por neis semipelítico, neis horbléndico, con contenidos

¹⁷ Levantamiento Topográfico Comuna 14 – Morrórico; Contratista: Ing. John Fernando Quintero Roa.

¹⁸ Fuente: Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. CDMB.

de anfibolita, de estructura masiva a bandeados con alto grado de meteorización, también hicieron parte de la descripción geológica del área.

Suprayaciendo las rocas anteriores se presentan depósitos detríticos de Edad Cuaternaria formados por bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas, mezclados en proporciones variables, provenientes en su mayor parte de la acción denudatoria sobre las rocas del Macizo de Santander.

Tabla 2. Unidades aflorantes en el sector comuna 14.

Tipo de Roca	Formación	Convención de acuerdo a Ingeominas 2010
Rocas Metamórficas	<i>Neis de Bucaramanga</i>	Ri4
	<i>Neis de Bucaramanga</i>	Rb1
Depósitos Sedimentarios aflorantes en el Sector Comuna 14	<i>BUCARAMANGA</i>	
	<i>Miembro Órganos</i>	Sft3
	<i>Miembro Finos</i>	Sfl1
	<i>Miembro Gravoso</i>	Sft2
	<i>Miembro Limos Rojos</i>	Sfl2
	<i>Depósitos Aluviales</i>	Sat1
	<i>Depósitos Coluviales</i>	Sco1 y Sco2
	<i>Suelo Residual Del Neis</i>	Srm1
<i>Suelo de Llenos Antrópicos</i>	Sla	

Finalmente, además de las anteriores unidades litológicas mencionadas, es posible encontrar suelos residuales del Neis de Bucaramanga como producto de la intensa meteorización y demás agentes externos que hacen parte para la formación de estos suelos, así como también depósitos aluviales, distribuidos de acuerdo a su posición en los valles de los principales ríos o quebradas, y depósitos coluviales locales de ladera, la mayoría de pequeña extensión, provenientes en gran parte de fenómenos de remoción en masa o por efectos de la gravedad los cuales se acumulan en las laderas o pie de éstas.

Tomando como referencia el mapa geológico elaborado por la CDMB, se produjo un mapa a escala 1:7500 (ver **Anexo C**) el cual se utilizó para el desarrollo de la metodología planteada.

3.2.3. Mapa de humedad relativa del suelo.

La humedad relativa del suelo se obtuvo con base en la información de la humedad disponible en los diferentes sondeos (ver **Anexo O**) en la zona de estudio, procedentes de la investigación geotécnica para los barrios que comprenden la comuna 14.

Se realizó una ubicación espacial de los sondeos y se le asignó un valor de humedad natural del suelo, de las muestras obtenidas del sitio de estudio. Luego se realizó una interpolación mediante la herramienta Kriging del programa, lo cual arroja un valor aproximado de la humedad del suelo y su distribución espacial.

El resultado obtenido fue un mapa a escala 1:7500 (ver **Anexo D**) de la zona de estudio.

3.2.4. Mapa geomorfológico.

Para realizar el mapa geomorfológico de la comuna 14, la CDMB elaboró un estudio detallado orientado a estudiar e identificar las geformas indicativas de procesos de inestabilidad, erosión o inundación, identificando los niveles de terrazas y su significado en términos de inundación, con el fin de determinar si han ocurrido grandes caudales o avalanchas en el pasado (ver **Anexo R**). El mapa se elaboró de acuerdo con los levantamientos topográficos de cada sector y los planos de pendiente, con el fin de identificar las laderas las cuales se relacionaron con la resistencia de los materiales existentes teniendo en cuenta las propiedades estratigráficas, geológicas, litológicas y estructurales previamente analizadas.

Con base en el mapa geomorfológico elaborado por la CDMB, se produjo un mapa a escala 1:7500 (ver **Anexo E**) el cual se utilizó para el desarrollo de la metodología planteada.

3.2.5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.

La cobertura y uso de suelo es unas de las variables más importantes para tener en cuenta dentro de la evaluación de la amenaza por deslizamientos, en especial en zonas urbanas en donde la acción antrópica realiza cambios significativos en las condiciones naturales del terreno y puede convertirse en un factor detonante de movimientos en masa. En el área de estudio, a la escala de trabajo, se identificaron 14 unidades de cobertura y uso del suelo, las cuales se pueden observar en el respectivo mapa (ver **Anexo F**) y se detalla su leyenda en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Leyenda del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.

NOMBRE	DEFINICIÓN
<i>Árboles</i>	Árboles aislados o formando pequeños grupos, con un tamaño similar a los que se pueden encontrar en bosque secundario, primario o en plantaciones de alturas superiores a 5 metros, se pueden encontrar tanto en área rural como urbana; además de especies maderables y de ornato, también se incluyeron en esta clase plantas de cítricos, cacao y otros árboles frutales como aguacate, guamos, guanábanos, entre otros, observados en varios sectores del área de estudio.
<i>Bosque secundario</i>	Bosque con alto nivel de intervención, ya sea por extracción de individuos de especies valiosas o por la tala completa del bosque para que luego rebrote naturalmente. Corresponde a una vegetación arbórea y arbustiva que ha perdido su estructura, o algunas especies vegetales originales apareciendo en su lugar sucesiones secundarias. En la zona de estudio se observó este tipo de unidad con presencia de bambú, al parecer resultado de introducción artificial de la especie, interrumpiendo la evolución natural del bosque. La mayor área se identificó en la escarpa occidental de Bucaramanga.
<i>Construcciones industriales</i>	Construcciones cuyo fin es la producción de bienes y servicios para el hombre en sectores como concentrados, metalmecánica, automotriz, entre otras.

<i>Construcciones urbanas</i>	Obras realizadas por el hombre para su servicio y beneficio, ubicadas dentro del perímetro urbano definido por cada municipio o distrito, dentro de estas se encuentran las clases: residencial, educativa, salud, deportiva, institucional, vial, de transporte, entre otras.
<i>Pasto y árboles</i>	Pastos naturales con el componente árboles.
<i>Pastos naturales</i>	Áreas de tierras dedicadas a praderas y prados permanentes o naturales. Unidad de cobertura vegetal que se caracteriza por presentar un estrato de malezas de hojas finas como las gramíneas mayormente predominantes. El uso predominante es de ganadería extensiva.
<i>Consociación pasto natural, suelo desnudo</i>	Terreno con un 70% o más de área ocupada por pasto natural, el resto lo cubre suelo desnudo.
<i>Rastrojos altos</i>	En la regeneración natural de los bosques que alguna vez existieron, las semillas latentes se activaron creando en el tiempo lo que se conoce como bosques sucesionales o rastrojos altos. La clase presenta coberturas de rastrojos de árboles heterogéneos aproximadamente hasta 10 metros de altura, en camino a formar un estado sucesional de bosque, los más evolucionados se observaron en la margen derecha aguas abajo del río Suratá (vereda San Ignacio, cercanía a la fábrica de cementos diamante, subiendo por el costado oriental de la central eléctrica Los Palos). y la escarpa Occidental.
<i>Consociación rastrojo alto, construcciones rurales</i>	Terreno con un 70% o más de área ocupada por rastrojo alto, el resto corresponde a construcciones rurales.
<i>Consociación rastrojo alto, plátano</i>	Suelos con rastrojos altos y algunas matas de plátano.
<i>Rastrojos bajos</i>	Cobertura donde aparecen especies herbáceas y arbustivas con alturas aproximadas entre 1 y 3 metros. No aparece el estrato arbóreo.
<i>Asociación rastro bajo, vegetación herbácea, suelo desnudo</i>	Zona con predominio de rastrojo bajo sobre vegetación herbácea y suelo desnudo.
<i>Cultivos y componente arbóreo</i>	Cultivo con presencia de árboles, sin un diseño agroforestal, sino el resultado de la intervención del hombre sobre diferentes estados de evolución de la vegetación.

<i>Suelo desnudo</i>	Áreas (sin cobertura vegetal) sobre las cuales han ocurrido fenómenos de erosión por causas naturales o antrópicas o que el hombre ha intervenido en forma de terraplenes, canteras, manejo de materiales para industria o construcciones o que otros elementos naturales (vientos, ríos) han moldeado como playas, desiertos, afloramientos rocosos.
----------------------	---

3.2.6. Mapa de precipitación.

Los factores detonantes son los procesos o fenómenos coyunturales que activan o aceleran el peligro considerado, como la precipitación. Este es un aspecto fundamental para determinar la amenaza, pues en una zona aparentemente estable, existen elementos que pueden cambiar las condiciones naturales en un momento determinado.

En este proceso, es necesario determinar las áreas con mayor precipitación, utilizando para este caso, el periodo lluvioso en años normales así como la precipitación máxima en 24 horas ocurrida durante Ola invernal 2010-2011 (ver **Anexo G**)

3.2.6.1. Información Recopilada.

Se realizó una selección de las estaciones hidroclimatológicas cercanas a la zona de estudio (**Tabla 4**), para su respectivo análisis hidrológico y se recopiló información disponible en el IDEAM y la CDMB, generando la respectiva base de datos de los registros pluviométricos recopilados. En esta tabla se identifican dichas estaciones por el nombre, tipo (SP: Sinóptica Principal, CO: Climatológica Ordinaria, PM: Pluviométrica, PG: Pluviográfica), entidad a cargo, municipio, coordenadas de localización, elevación sobre el nivel del mar y fecha de instalación.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas utilizadas.

NOMBRE	TIPO	ENTIDAD A CARGO	MUNICIPIO	COORDENADAS		ELEVACION	FECHA DE INSTALACION
				LAT	LON		
LLANO GRANDE	CO	IDEAM	GIRON	703	7311	777	JUL - 71
LA GRANJA	PG	IDEAM	PIEDRECUESTA	700	7305	1000	JUL - 70
CLUB CAMPESTRE	PG	CDMB	FLORIDABLANCA	703	7302	940	OCT - 82
EL RASGÓN	PG	CDMB	PIEDRECUESTA	701	7301	1950	AGO - 85

Estación Llano Grande 2319511		
Año	Mes	Intensidad
1981	Octubre	55.6
1982	Julio	57.0
1987	Marzo	92.4
1992	Noviembre	85.3
1995	Julio	68.8
1998	Enero	100.6
1998	Marzo	86.0
1998	Octubre	84.7
2000	Mayo	84.0
2002	Marzo	71.2
2002	Mayo	61.0
2003	Marzo	95.3
2003	Octubre	73.4
2004	Febrero	100.0
2005	Febrero	182.0
2006	Julio	98.5
2007	Junio	101.3
2008	Mayo	114.6
2009	Octubre	84.3
2010	Noviembre	193.5
2011	Enero	202.4

Estación La Granja 2319070		
Año	Mes	Intensidad
1975	Diciembre	103,5
1976	Agosto	96,2
1979	Noviembre	80,5
1980	Mayo	100,1
1986	Marzo	80,5
1986	Abril	113
1990	Noviembre	103
1991	Enero	111,2
1992	Noviembre	91,9
1996	Marzo	82,7
1997	Marzo	94,7
1998	Enero	133,5
2001	Octubre	90,6
2003	Abril	93,3
2004	Junio	103
2005	Febrero	93,3
2007	Agosto	94,6
2008	Marzo	120,8
2009	Enero	134,2
2010	Diciembre	210,1
2011	Febrero	198,5

Tabla 4. Estaciones meteorológicas utilizadas (continuación).

Estación Club Campestre 2319079		
<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Intensidad</i>
1983	Mayo	57.5
1985	Septiembre	41.9
1987	Febrero	76.0
1988	Abril	57.0
1989	Diciembre	67.0
1990	Julio	55.7
1991	Noviembre	70.0
1992	Agosto	57.5
1993	Mayo	57.5
1994	Febrero	40.0
1995	Marzo	83.0
1996	Marzo	43.0
1998	Abril	77.0
2000	Mayo	89.5
2003	Noviembre	69.0
2003	Noviembre	58.0
2004	Febrero	130.0
2005	Marzo	105.0
2008	Noviembre	98.5
2010	Octubre	193.4
2011	Febrero	250.5

Estación El Rasgón 2319739		
<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Intensidad</i>
1990	Octubre	24.8
1991	Octubre	30.4
1992	Agosto	26.4
1993	Mayo	34.6
1994	Enero	33.2
1995	Mayo	39.6
1998	Mayo	79.1
1999	Marzo	87.0
2000	Julio	34.9
2001	Septiembre	42.8
2002	Octubre	48.8
2003	Febrero	40.4
2004	Enero	48.7
2005	Febrero	125.3
2006	Enero	197.0
2007	Julio	100.0
2008	Septiembre	98.5
2009	Mayo	83.6
2010	Marzo	206.0
2010	Diciembre	223.6
2011	Enero	256.4

4. APLICACIÓN DE SIG EN LA ELABORACION DE MAPAS DE AMENAZA

El Sistema de Información Geográfica utilizado para la integración y el análisis de datos fue el programa ILWIS (Integrated Land and Water Information System) Academic, versión 3.1 para Windows, desarrollado por el ITC, Holanda.

El SIG es utilizado como una herramienta rápida de dibujo y cuantificación pero no se usa para el análisis de parámetros. Para esto, se procedió a la asignación de valores de peso (1 hasta 5) a cada una de las unidades contenidas en los diferentes mapas temáticos utilizados, transformando mediante un proceso de reclasificación los mapas de clases en mapas de valores. Posteriormente estos mapas fueron integrados mediante un proceso de adición dando como resultado final el mapa de amenazas a deslizamientos clasificado en 3 categorías: Baja, Media y Alta.

En cuanto a los valores de pesos asignados a los mapas, los valores más altos corresponden a la mayor influencia que puedan ejercer en el aceleramiento de los mecanismos de disparo del deslizamiento.

En resumen, el procedimiento general utilizado en el SIG para la obtención del mapa de amenazas fue el siguiente:

- 1) Clasificación de cada mapa de parámetros de acuerdo con las clases relevantes.
- 2) Asignación de valores de peso a cada parámetro.
- 3) Asignación de pesos a cada mapa de parámetros.
- 4) Combinación de todos los mapas de pesos mediante un proceso de adición para generar el mapa de amenazas a deslizamientos.

4.1. Evaluación de Parámetros.

Los parámetros tenidos en cuenta para esta investigación se dividen en dos grupos como se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Grupos de parámetros para la evaluación de amenazas.

GRUPO 1			
PARÁMETRO	NOMBRE	DEFINICIÓN	TOPOLOGÍA
Susceptibilidad	PEND, LITO, HUM, VEG, GEO.	Parámetros obtenidos de las condiciones naturales del terreno.	Raster
GRUPO 2			
PARÁMETRO	NOMBRE	DEFINICIÓN	TOPOLOGÍA
Detonante	LLUV.	Precipitación máxima horaria anual para un cierto periodo de recurrencia.	Raster

La evaluación de los parámetros que se tuvieron en cuenta en esta metodología, se logró mediante la asignación de pesos relativos, de acuerdo con su grado de influencia a la amenaza al deslizamiento.

A continuación se describe la evaluación de cada uno de los parámetros involucrados en el análisis de acuerdo a la metodología aplicada en este proyecto.

4.1.1. Parámetro pendiente (P).

En general este parámetro hace una valoración de las condiciones topográficas del terreno, por medio de la creación de un mapa de pendientes de área de estudio, con valores en grados o en porcentaje, de acuerdo con la metodología

Mora-Vahrson (1992). Cabe recordar que el mapa de pendientes se obtuvo de un estudio planimétrico y altimétrico, a partir de curvas de nivel cada metro a escala 1:1000.

La clasificación de pendiente utilizada para evaluar este parámetro, fue la establecida por el doctor Jaime Suarez en la que se hace una descripción de las condiciones esperadas del terreno y se asigna un valor de peso relativo de acuerdo a la característica del mismo. En la **Tabla 6**, se presenta las clases de pendientes asumidas para evaluar este parámetro, las cuales pueden coincidir con los sectores críticos donde los procesos de deslizamientos son dominantes.

Tabla 6. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro pendiente (P).

Clasificación	Pendiente (ángulo de inclinación)	Valor del parámetro P
Muy baja	0 a 5% (0 a 8.5 grados)	1
Baja	15 a 30% (8.5 a 16.7 grados)	2
Mediana	30 a 50% (16.7 a 26.6 grados)	3
Alta	50 a 100% (26.6 a 45 grados)	4
Muy Alta	Más del 100% (más a 45 grados)	5

4.1.2. Parámetro litológico (L).

Los tipos de suelos y rocas son de gran importancia en el comportamiento dinámico de las laderas. Factores como la composición mineralógica, grado de meteorización, capacidad de retención de humedad y la variación de los niveles freáticos, entre otros, influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas. La evaluación de este parámetro se realizó teniendo en cuenta la **Tabla 7**.

Tabla 7. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro litológico (L).

Unidad Litológica	Valor del parámetro L
Rb1	0
Ri4	2
Sal	4
Sat1	1
Sco1	5
Sco2	4
Sft2	5
Sfl2	3
Srm1	1

4.1.3. Parámetro de humedad relativa del suelo (H).

En la metodología Mora & Vahrson se plantea la injerencia de la humedad del suelo en la existencia de los fenómenos de remoción en masa teniendo en cuenta los valores de humedad obtenidos por un grupo de sondeos realizados por la CDMB (Ver **Anexo P**).

Con este grupo de datos obtenidos por los sondeos geotécnicos, se realizó una interpolación espacial, para obtener un valor aproximado de la humedad en diferentes zonas, esto se logró con la interpolación IDW del programa ILWIS.

Tabla 8. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro de humedad relativa del suelo (H).

Clasificación	Tipo de Suelo	Valor del parámetro H
>42,39	Inundable	1
<35,42	Pantanosos	0.8
<28,44%	Muy Húmedo	0.6
<21,47	Húmedo	0.3
<14,5	Seco	0.1

4.1.4. Parámetro geomorfológico (G).

El objetivo de valorar este parámetro es identificar las geoformas que son el resultado de la acción de fuerzas internas y externas, las cuales ejercen su influencia sobre la corteza terrestre.

Las fuerzas internas están representadas por la estructura geológica, en la que entran en juego la litología y la tectónica, en tanto que las fuerzas externas están representadas básicamente por el clima. La variable complementaria la constituye el tiempo.

Con base en este esquema general, los relieves o formas del terreno muestran tendencias, unos hacia las influencias estructurales, otros hacia las fuerzas externas donde el clima ha dejado su sello, dándose lugar al concepto de los llamados conjuntos morfoclimáticos.

Tabla 9. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro geomorfológico (G).

Unidad Geomorfológica	Valor del parámetro G
A1	2
A1-1	2
A12	2
A12-1	3
A13	2
A9	2
D10	5
D10-1	3
D10-2	3
D10-3	5
D10-4	4
D10-5	5
D10-6	5
D10-7	5
D10-8	3
D14	4
D14-1	4
D17	4
D23	6

4.1.5. Parámetro de cobertura vegetal y uso del suelo (S).

El objetivo principal de valorar este parámetro es definir el grado de influencia de las áreas efecto antrópico o que son cubiertas por vegetación. Para la valoración de este parámetro se tuvo en cuenta los pesos presentados en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro uso del suelo.

Uso de Suelo	Valor del parámetro G
Árboles	0.9
Bosque secundario	1
Construcciones industriales	3
Construcciones urbanas	3
Pasto y árboles	0.8
Pastos naturales	1
Consociación pasto natural, suelo desnudo	1.4
Rastrojos altos	0.8
Consociación rastrojo alto, construcciones rurales	0.8
Consociación rastrojo alto, plátano	1.2
Rastrojos bajos	1.5
Asociación rastro bajo, vegetación herbácea, suelo desnudo	1.5
Cultivos y componente arbóreo	2
Suelo desnudo	3

4.1.6. Parámetro de precipitación (Tp).

Se realizó el cálculo de las precipitaciones para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años para las estaciones de Llano Grande Y La Granja, Rasgón y Campestre, las cuales presentan los mayores índices de precipitación en 24 horas para las condiciones de valle y piedemonte, respectivamente, en que se halla dividida topográficamente la zona de estudio.

Para determinar el valor del factor Tp se tiene en cuenta la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años .Como se tiene información

de 39 años se hace necesario estimar el valor de precipitación máxima en 100 años para 24 horas, por tal razón se utiliza un grupo de distribuciones de probabilidad (ver **Anexo Q**).

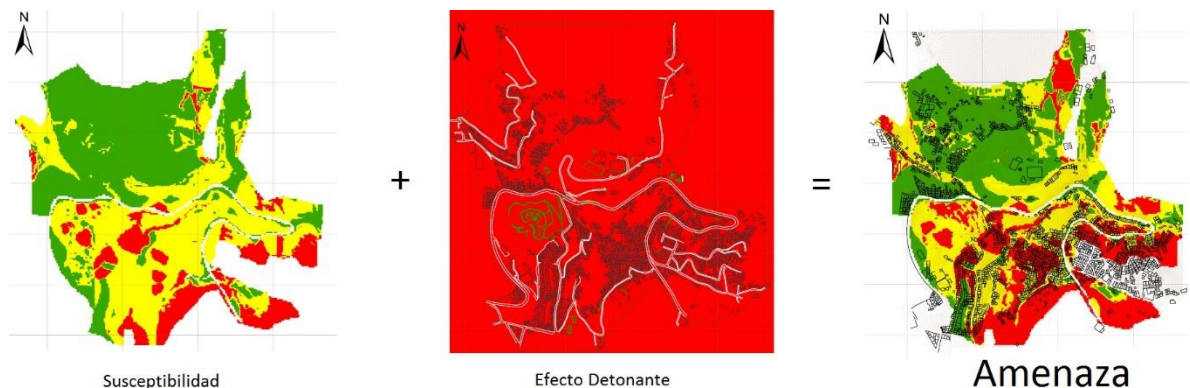
Tabla 11. Clasificación utilizada para evaluar el parámetro de precipitación (T_p).

Rango	Clasificación	Parámetro T_p
<50	Baja	0.8
<100	Moderada	2
<150	Alta	3
>170	Muy Alta	4

4.2. Evaluación de la Amenaza.

La elaboración de este mapa obedece al producto matricial del mapa de los factores intrínsecos con el de disparo, utilizando la herramienta “raster calculator”. En la siguiente ilustración se visualiza los mapas que intervienen en la obtención del mapa de amenaza para el área urbana del municipio.

Figura 6. Esquema de operación de los factores extrínsecos de la comuna 14 del municipio de Bucaramanga.



Fuente: Autores

Tabla 12. Clasificación utilizada para evaluar la amenaza.

Clasificación	Parámetro
Alta	> 45
Media	25<Ad<45
Baja	<25

5. RESULTADOS OBTENIDOS

- De acuerdo a la clasificación de pendientes del área de estudio (**Tabla 6**), se puede inferir que en la zona predomina pendientes extremadamente altas (51.35% del área), en segundo lugar se encuentran las pendientes de moderadas (27.90% del área) y por último las pendientes bajas representan un (20.77% del área). En la **Tabla 13** se aprecia el porcentaje de área cubierta por cada rango de pendiente.

Tabla 13. Porcentaje de área por rango de pendiente.

Pendiente	% de área
0-3%	2.28
3%-7%	6.85
7%-12%	11.64
12%-25	15.73
25%-50%	12.17
50%-57%	31.55
57%-75%	13.66
75%-100%	5.11
>100%	1.03

- Con base en la clasificación de pendientes y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo H**) se observa el mapa con la valoración del parámetro P.
- En la zona de estudio se pudo establecer el porcentaje de área cubierta por cada unidad litológica (**Tabla 14**), predominando la unidad Ri4 (Neis de Bucaramanga – Rocas intermedias).
- Cada unidad geológica se clasificó teniendo en cuenta las consideraciones establecidas y posteriormente se le asigno su valoración de acuerdo con el

parámetro litológico (L) obteniendo como resultado el mapa contenido en el **Anexo I**.

Tabla 14. Porcentaje de área por unidad litológica.

Unidad Litológica	% Área
Rb1	9.358
Ri4	71.179
Sal	1.225
Sat1	1.927
Sco1	4.351
Sco2	0.108
Sft2	3.114
Sfl2	3.261
Srm1	5.464

- Con base en la clasificación de Humedad relativa y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo J**) se observa el mapa con la valoración del parámetro H.
- Con base en la clasificación de Geomorfología y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo K**) se observa el mapa con la valoración del parámetro G.
- El porcentaje de área según la clasificación del uso del suelo para la zona se pudo definir en la **Tabla 15**, la cual indica que las construcciones urbanas son las que dominan gran parte del suelo estudiado.
- Con base en la clasificación de Geomorfología y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo L**) se observa el mapa con la valoración del parámetro G.

Tabla 15. Porcentaje de área por uso de suelo.

Uso de Suelo	% Área
Árboles	2.038
Bosque secundario	3.092
Construcciones industriales	1.324
Construcciones urbanas	26.250
Pasto y árboles	12.354
Pastos naturales	1.295
Consociación pasto natural, suelo desnudo	2.608
Rastrojos altos	3.204
Consociación rastrojo alto, construcciones rurales	43.863
Consociación rastrojo alto, plátano	0.715
Rastrojos bajos	0.911
Asociación rastro bajo, vegetación herbácea, suelo desnudo	1.226
Cultivos y componente arbóreo	0.357
Suelo desnudo	0.763

- Con base en la clasificación de Efecto detonante y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo M**) se observa el mapa con la valoración del parámetro Tp.
- Con base en la clasificación de cobertura vegetal y uso del suelo y el peso asignado a cada clase, en el (ver **Anexo L**) se observa el mapa con la valoración del parámetro S.
- El resultado de la aplicación de la metodología se aprecia en el mapa del **Anexo N**, este mapa muestra las zonas más propensas al deslizamiento y con base en estas, se pudo identificar los diferentes niveles de amenazas para el área de estudio (**Tabla 16**).

Tabla 16. Niveles de amenaza en la comuna 14 (2013).

Nivel de Amenaza	% de Área
Baja	10.32
Media	21.94
Alta	67.74

Es importante mencionar que la amenaza obtenida, es una amenaza relativa debida que para obtener una amenaza real absoluta se deben realizar estudios geotécnicos actualizados, que aporten información sobre la resistencia del suelo, a efectos de remoción en masa.

Por otra parte se puede evidenciar en la Tabla 18 que la amenaza en la zona de estudio aumento, por los efectos de la saturación excesiva del suelo, y por un factor de susceptibilidad que a la hora de evaluar, es el que tiene mayor peso en la asignación de amenaza sectorial.

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS CON MAPA CDMB

En el estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en la Comuna 14 y algunos sectores de las Comunas 9, 10 y 11 del municipio de Bucaramanga realizado por la CDMB en el año 2010, con un área correspondiente a 136 hectáreas, una población de 19.764 personas y 4480 unidades residenciales, se obtuvo como resultado el mapa de amenazas por fenómenos de remoción en masa a escala 1:1000 (ver **Anexo O**).

En dicho estudio, se pudo definir tres niveles de amenazas cuyo porcentaje se describe a continuación (**Tabla 17**).

Tabla 17. Niveles de amenaza en la comuna 14 (2010).

Nivel de Amenaza	% de Área
Baja	13.90
Media	30.70
Alta	55.40

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con el desarrollo de la metodología aplicada en este trabajo (**Tabla 16**) y los obtenidos en el año 2010 por la CBMB (**Tabla 17**), se pudo establecer una variación del nivel de amenaza en la zona estudiada (**Tabla 18**).

Tabla 18. Variación de amenazas en la comuna 14 entre los años 2010-2013.

Nivel de Amenaza	% de Área		% de Variación
	Año 2010	Año 2013	
Baja	13.90	10.32	3.58
Media	30.70	21.94	8.76
Alta	55.40	67.74	12.34

7. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones deducidas del trabajo de investigación realizado.

- El mapa de amenaza elaborado sobre el área objeto de estudio, muestra que en un (67.74%) de su extensión presenta una alta amenaza a los deslizamientos, un (21.94%) presenta un grado de amenaza media a los deslizamientos y por ultimo un (10.32%) del área presenta un de amenaza baja a los deslizamientos.
- De los resultados obtenidos con el desarrollo de la metodología aplicada y los obtenidos por la CDMB (año 2010), se puede inferir que hubo un incremento de un 3.58% del área clasificada con amenaza alta, un aumento del 8.76% del área clasificada con amenaza media y un 12.34% de incremento del área clasificada con amenaza baja. Esto indica que la ola invernal producida en el año 2010 cambió significativamente los niveles de amenaza de la zona estudiada.
- Para la metodología realizada, el parámetro de disparo por sismo no se tomó en cuenta en la zonificación de amenazas en el área de estudio debido a que no se pudo tener acceso a la información de los sistemas de monitoreo que se han aplicado en la ciudad de Bucaramanga. De este modo se deja abierta ésta línea de trabajo para que continúen con el proceso investigativo.
- La información existente del área objeto de estudio y la recolectada al inicio de la investigación permitió elaborar una base de datos con los factores internos que inciden en un estudio de amenaza tales como la geología, geomorfología, la topografía del terreno, la humedad del suelo y otros externos como la precipitación en la zona.

- Realizar estudios sobre amenazas por deslizamientos, en los que se necesitan gran cantidad de información geográfica del área a estudiar, es una labor rigurosa. En este caso se ha contado con información geográfica elaborada por la CDMB e información suministradas por parte de otras fuentes para el desarrollo de la investigación.
- El uso del Software ILWIS como herramienta computacional para el procesamiento de datos fue muy ventajoso debido a la gran variedad de tipos de análisis que tiene para cualquier tipo de amenaza, pero al mismo tiempo fue un poco complicado utilizarlo en comparación a otros programas.
- El resultado de esta investigación puede ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones en lo que respecta a la planificación urbana, otorgamiento de permisos para la construcción de obras de infraestructura y en la regulación de uso del terreno.
- En general, la metodología Mora-Vahrson modificada muestra ser una metodología sencilla pero aceptablemente precisa para ser utilizada en la zonificación de amenazas por deslizamientos y sus resultados son aplicables al ordenamiento territorial, pero no sustituyen los estudios de estabilidad de laderas.
- Para el análisis de la amenaza por fenómenos de remoción masa se dispone actualmente de un elevado número de métodos y su utilidad depende de la escala del mapa proyectado. Para este caso particular se generó un producto a escala 1:7500 a través del método heurístico, realizando operaciones de álgebra de mapas para la superposición final.
- Finalmente cabe indicar que la amplia difusión actual de los SIG ha mejorado muy profundamente las técnicas de análisis y las capacidades de los mapas, de manera que ahora como nunca hay todo un abanico de opciones contrastadas disponibles. Al mismo tiempo los SIG también han permitido una

progresiva sofisticación de los métodos y, en cierto modo, los cada vez más complejos requerimientos del tratamiento de los datos en el SIG y el software complementario, podrían postergar prioridades básicas de la investigación, como son los conocimientos básicos de geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología, mecánica de suelos y mecánica de rocas, para afrontar correctamente la investigación de las zonas inestables y trasladar al computador datos rigurosos y fiables. Todo ello en un campo de investigación que requiere grandes dosis de experiencia práctica acumulada, para minimizar las posibles causas de error en las cartografías resultantes.

8. RECOMENDACIONES

- Aunque el software ILWIS fue usado para el procesamiento de datos y para la generación del mapa de amenaza por deslizamiento, la metodología planteada puede desarrollarse con otra herramienta tipo SIG y su uso es recomendable dada la versatilidad para generar los resultados de manera más rápida y precisa.
- Se recomienda continuar con el proceso investigativo empleando el parámetro de disparo por sismo permitiendo de esta manera refinar los resultados obtenidos y determinar su grado de incidencia en la zonificación de amenazas por deslizamiento en el área de estudio.
- No es conveniente hacer aplicación de la metodología Mora-Vahrson a gran escala, debido a la dificultad de conseguir información litológica y de altitudes con más detalle.
- Se recomienda realizar una evaluación de la metodología utilizada basada principalmente en establecer el grado de coincidencia ente las áreas que actualmente presentan deslizamientos, mediante un reconocimiento en campo, y las áreas para cada clase de amenaza, obtenidas en la metodología aplicada, con lo que se puede estimar el grado de confiabilidad de la zonificación obtenida, además de detectar zonas donde la zonificación no coincide con la realidad observada.
- Se recomienda el uso de la información generada como producto de este trabajo, considerando los sectores de mayor amenaza al deslizamiento presentados en el mapa, por parte de entes gubernamentales y no gubernamentales relacionados con la planificación del desarrollo urbano, infraestructura y ejecución de actividades orientadas a la reducción de riesgos y el consiguiente mejoramiento de la calidad de vida de la población.

- Se recomienda completar este estudio en un futuro con un mayor volumen de datos provenientes de un trabajo de campo exhaustivo y con la implementación de otras técnicas de información geográfica que serían de gran utilidad para poder ser más precisos en la zonificación de la amenaza por deslizamientos.
- Finalmente se recomienda continuar desarrollando investigaciones relacionadas con la aplicación de las tecnologías de la información geográfica en el estudio de las amenazas naturales, con el propósito de generar cartografía actualizada y detallada, útil en la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento de los recursos y la ordenación del territorio.

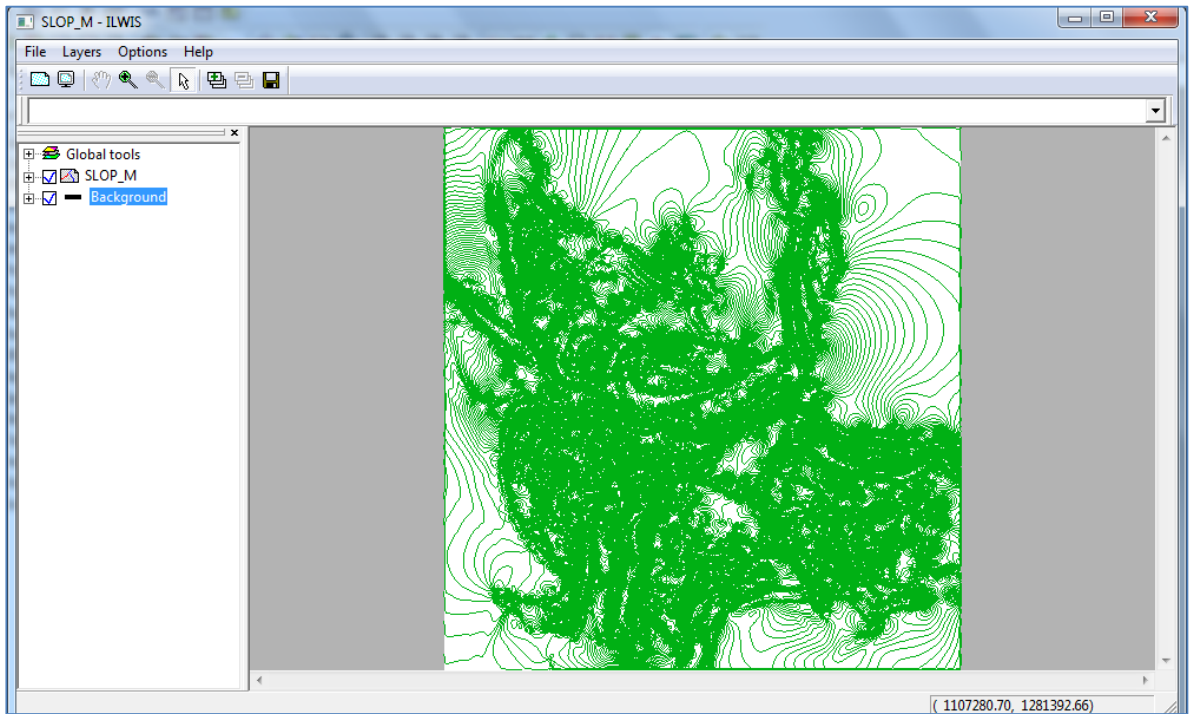
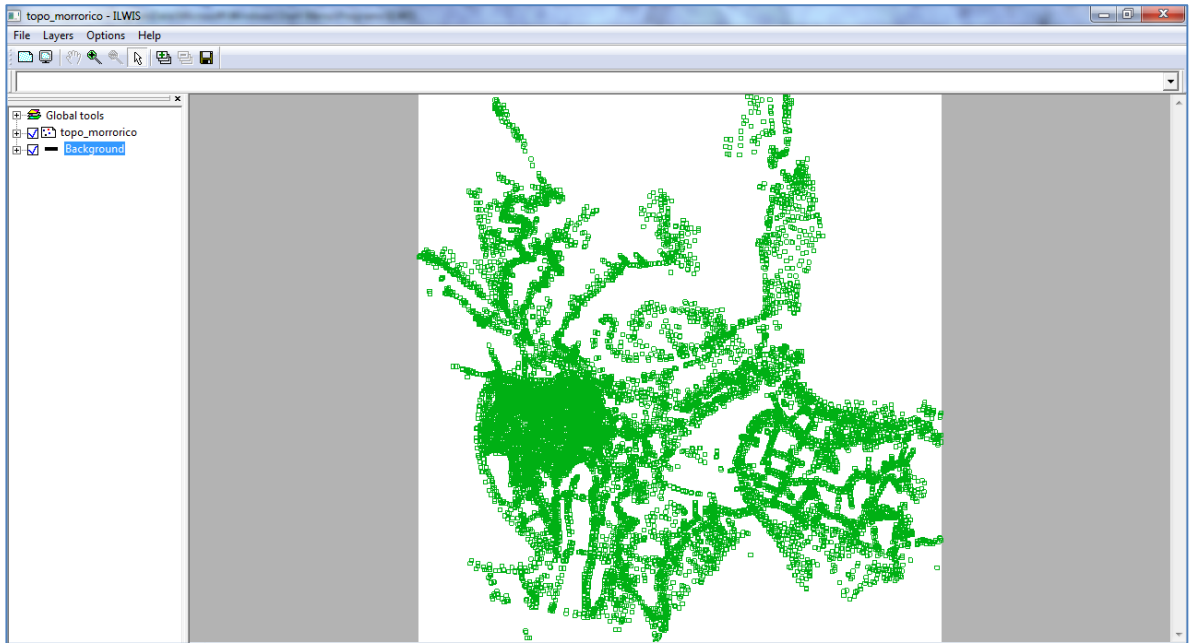
BIBLIOGRAFÍA

- BARRANTES, G., BARRANTES, O. & NUÑEZ, O., 2011: Efectividad de la metodología Mora Vahrson Modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 47: 141-162.
- Boletín N° 29 Serie C – INGEMMET. Dirección de Geología Ambiental. CAPÍTULO X VULNERABILIDAD Y ÁREAS CRÍTICAS. BILBERTO ZAVALA CARRIÓN & LIONEL FÍDEL SMOLL.
- Boletín Geológico. INGEOMINAS. Volumen 34. pp. 1-40, 1994. Santafé de Bogotá – Colombia. ISSN – 0120 – 1425.
- Construcción de mapas de riesgo, criterios metodológicos. COMISIÓN EUROPEA/OXFAM/FUNDEPCO, 2008. Primera edición: Octubre de 2008. La Paz, Bolivia. Pág. 10.
- Desarrollo de una metodología para la identificación de amenazas y riesgos a deslizamientos en la cuenca del río San Juan, República Dominicana, UNESCO, ITC, Universidad de Utrecht, Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres (CEPRENAC), Secretaria de estado de medio ambiente y recursos naturales dirección de información ambiental y de recursos naturales (República Dominicana). 2000.
- Estudio Detallado de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en la Comuna 14 y algunos sectores de las Comunas 9, 10 y 11 del Municipio de Bucaramanga. CDMB.
- FIDEL, L.; ZAVALA, B.; NUÑEZ, S.; VALENZUELA, G. 2006, Estudio de Riesgos Geológicos del Perú. Franja 4. INGEMMET, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, N° 29, 386p., 19 mapas escala 1:900,000.

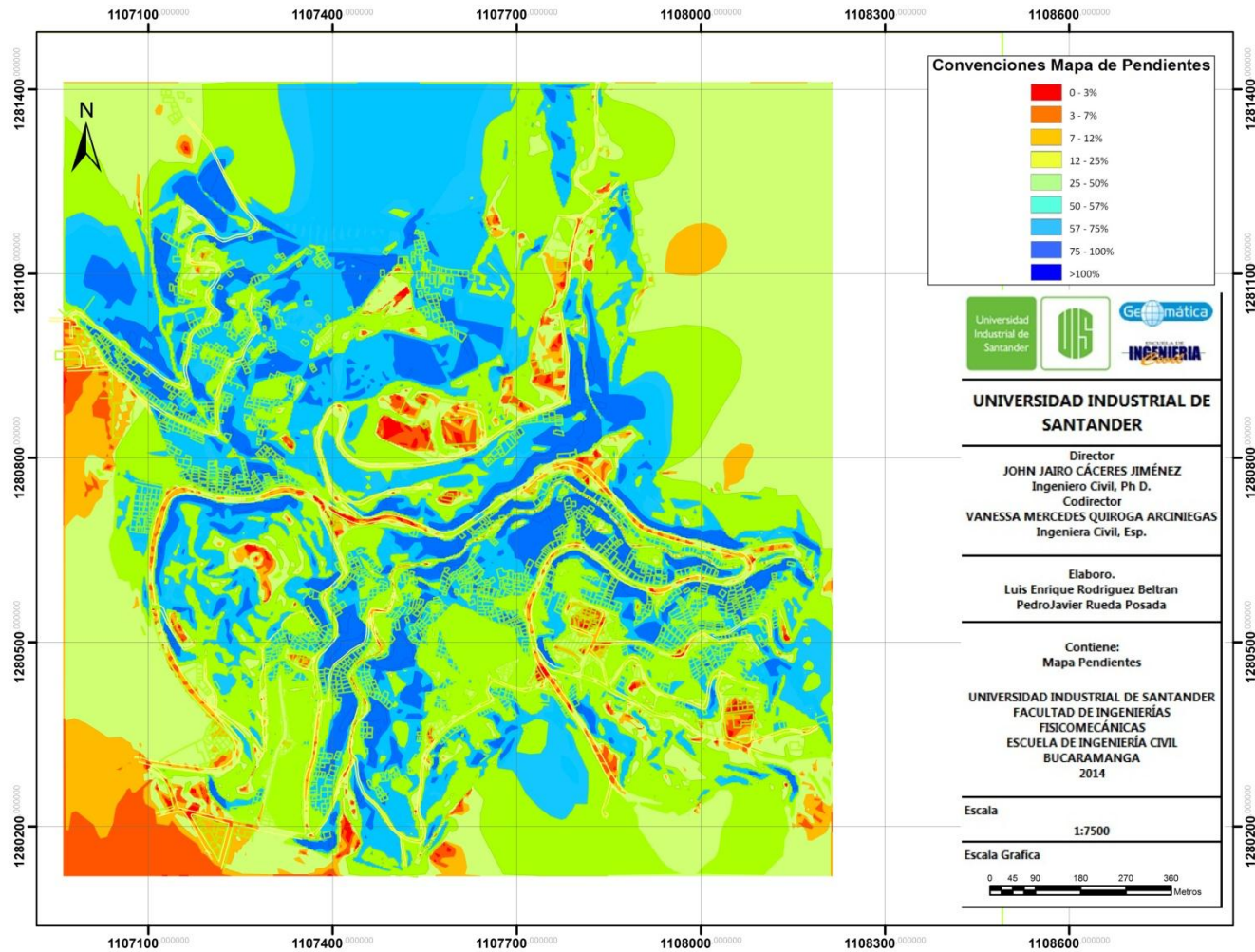
- Investigación topográfica y geológica para la zonificación de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa en los barrios que comprenden la comuna 14, los barrios Antonia santos, san Pedro, san Martín y quebrada la iglesia de la comuna 9, el sector el cristal parte baja de la comuna 10 y barrio porvenir de la comuna 11 del municipio de Bucaramanga – convenio 6676-08.
- MORA, R., 2004: Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del Cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. Proyecto FUNDEVI 0960.
- MORA, R., Vahrson, W. & Mora, S., 1992: Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC).
- SALAZAR, L., 2007: Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico – ILWIS -, utilizando el método Mora & Vahrson, 1991. Universidad de Costa Rica.
- SEGURA, G., BADILLA, E. & OBANDO, L., 2011: Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba.- Rev. Geol. Amér. Central, 45: 101-121.
- SUAREZ, J. Deslizamiento Análisis Geotécnico. Capítulo 13. Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo.
- <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/start.html>
- Valoración de daños y pérdidas, Ola invernal en Colombia 2010-2011. Comisión Económica para América Latina y el Caribe – Cepal, Banco Interamericano de Desarrollo – BID © 2012”
- Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.

ANEXOS

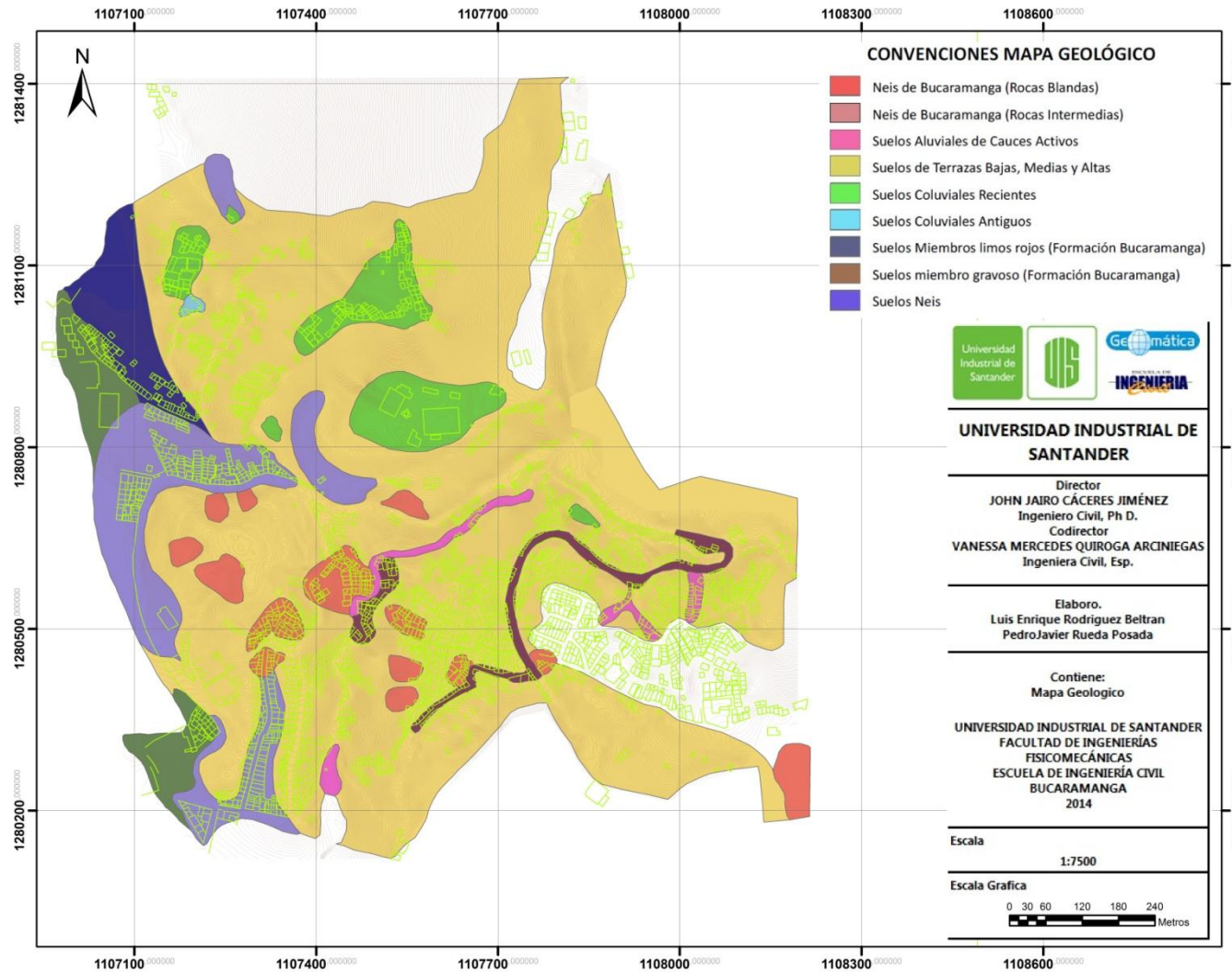
Anexo A. Cartera Topográfica.



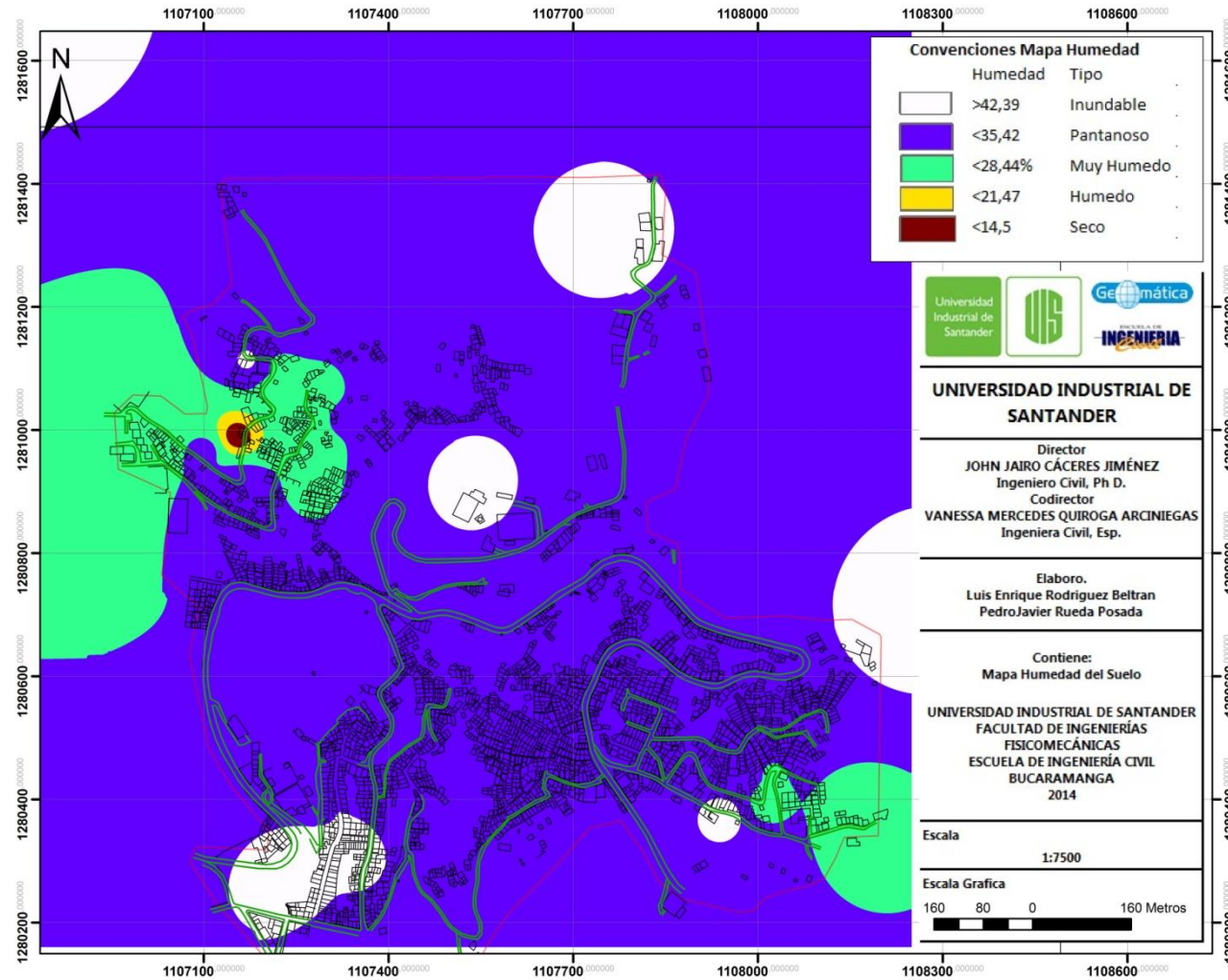
Anexo B. Mapa de Pendientes.



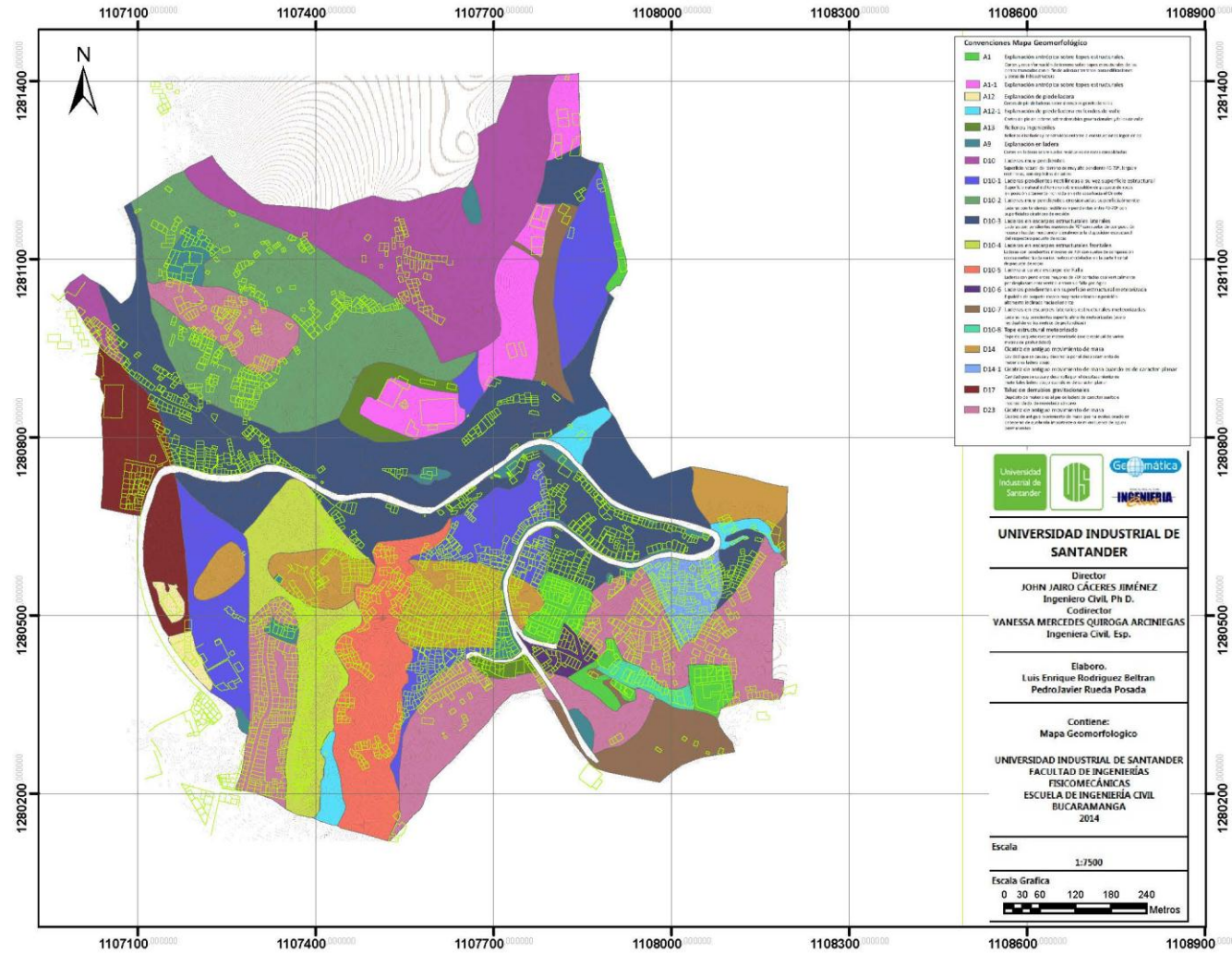
Anexo C. Mapa Geológico.



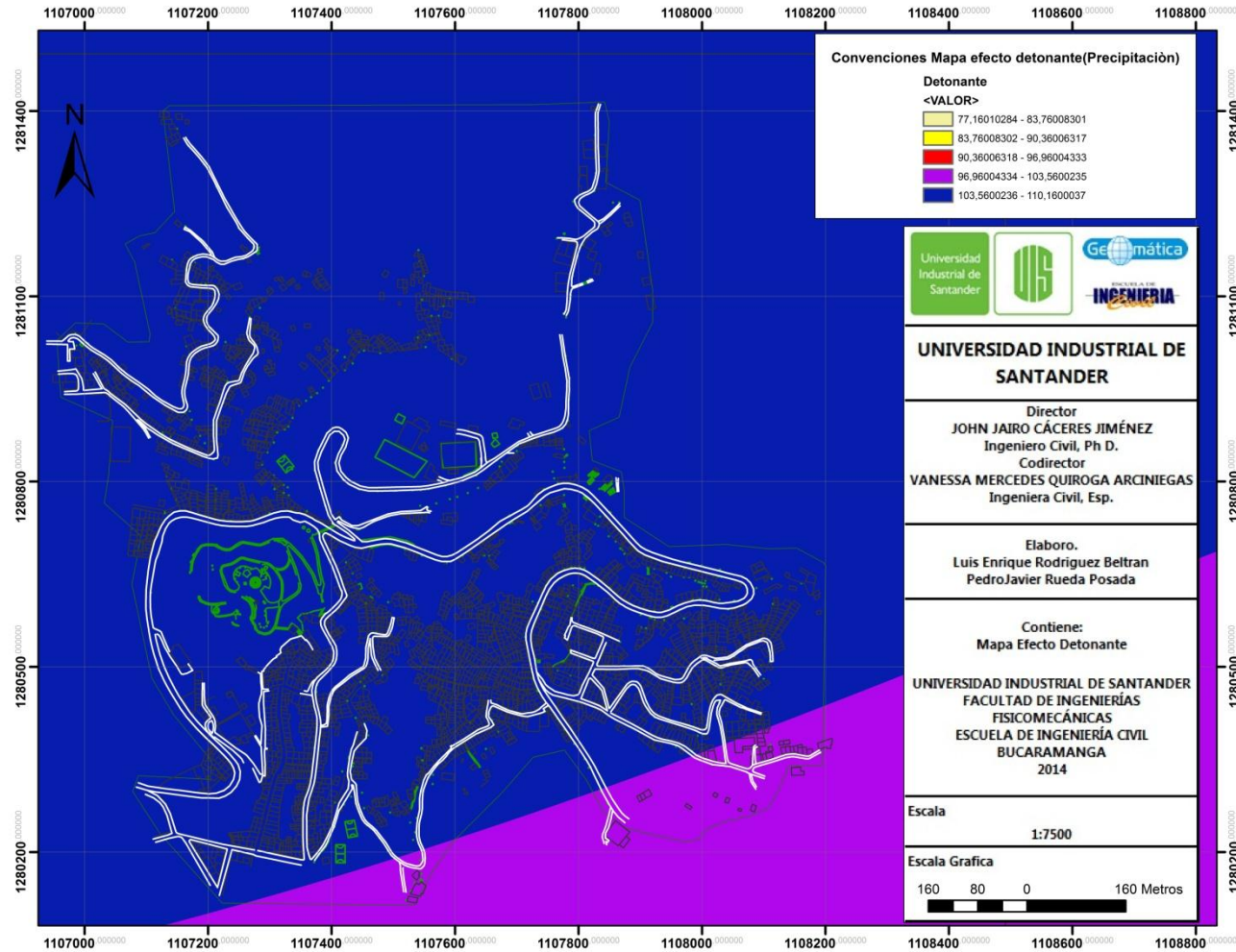
Anexo D. Mapa de Humedad Relativa del Suelo.



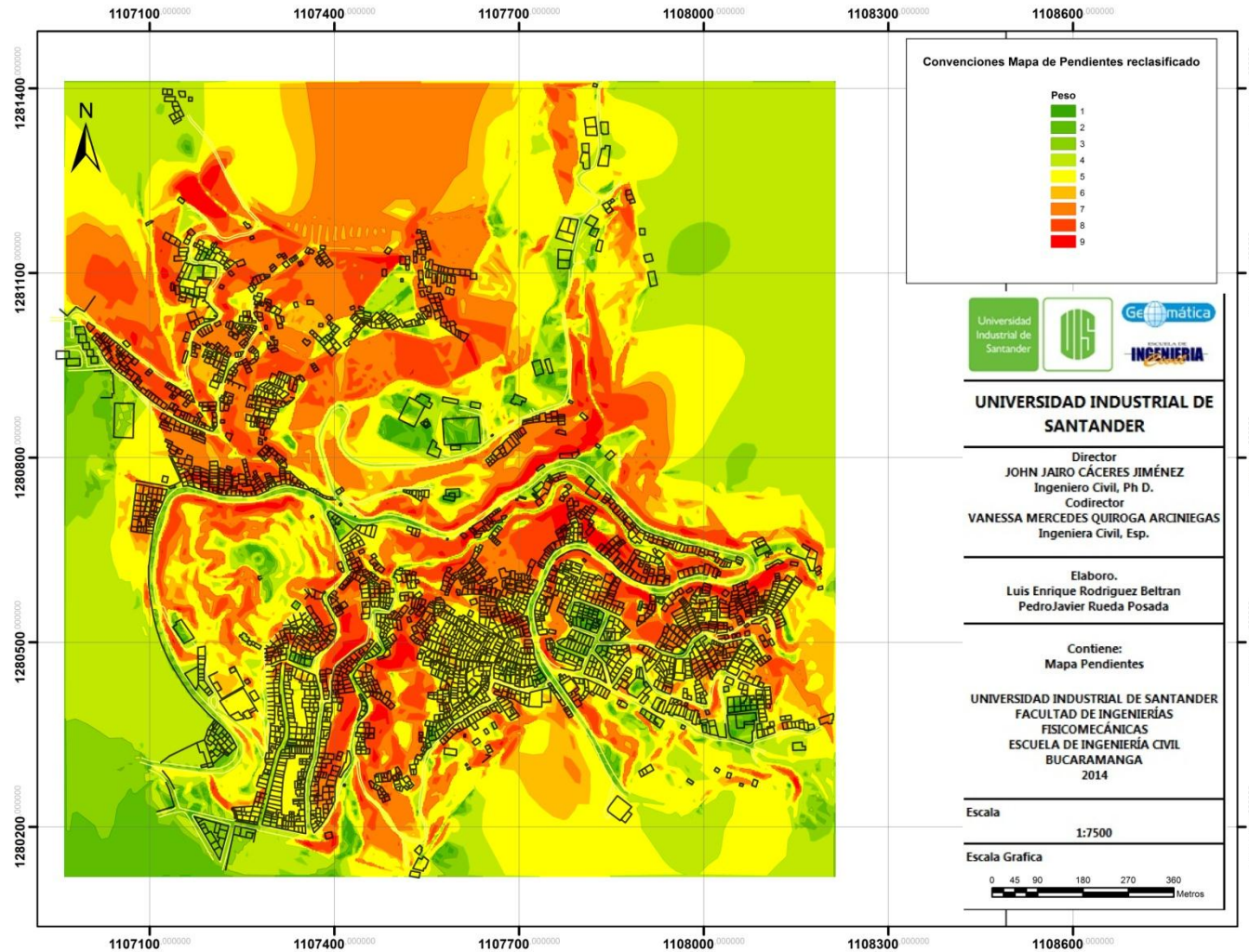
Anexo E. Mapa Geomorfológico.



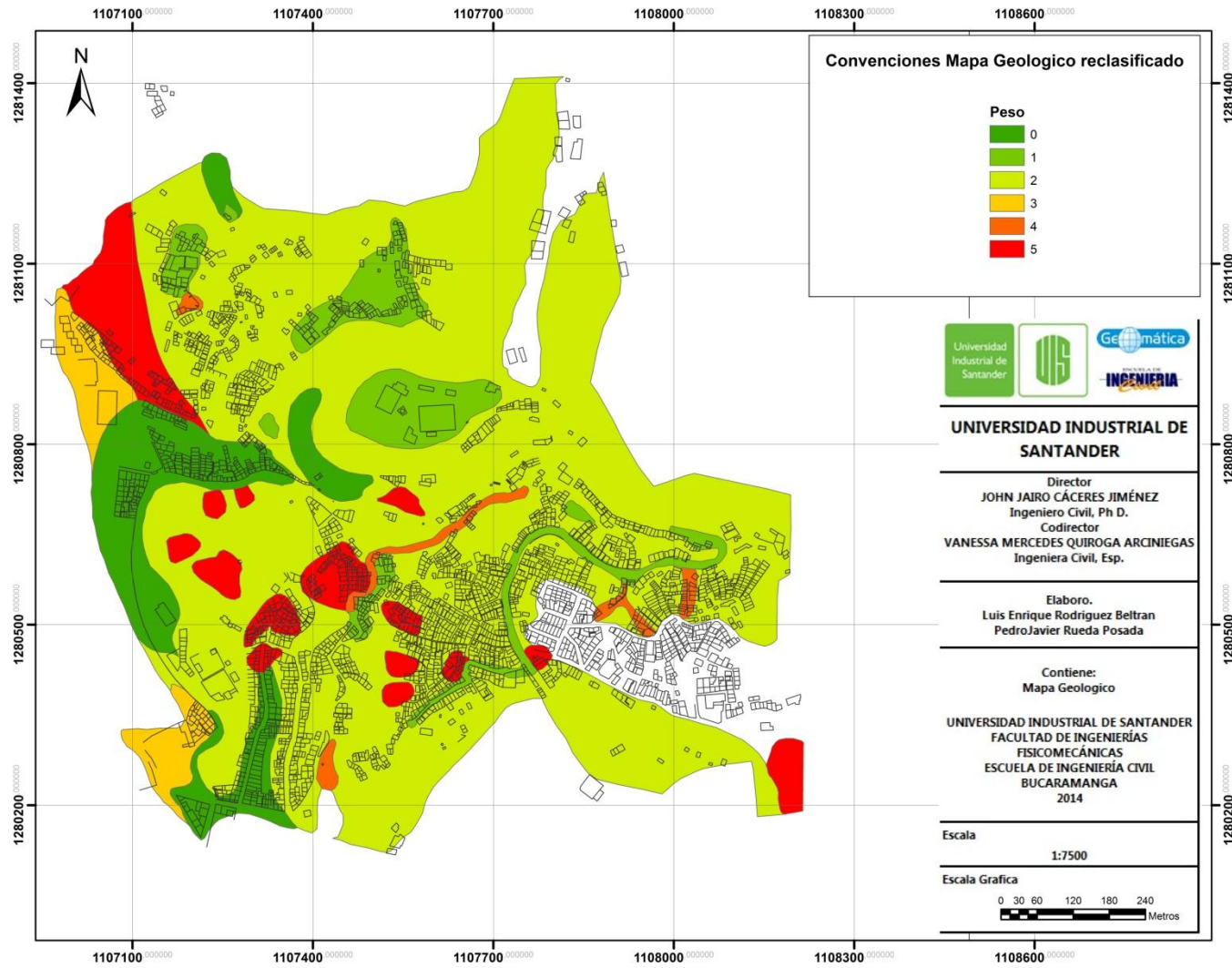
Anexo G. Mapa de Precipitación.



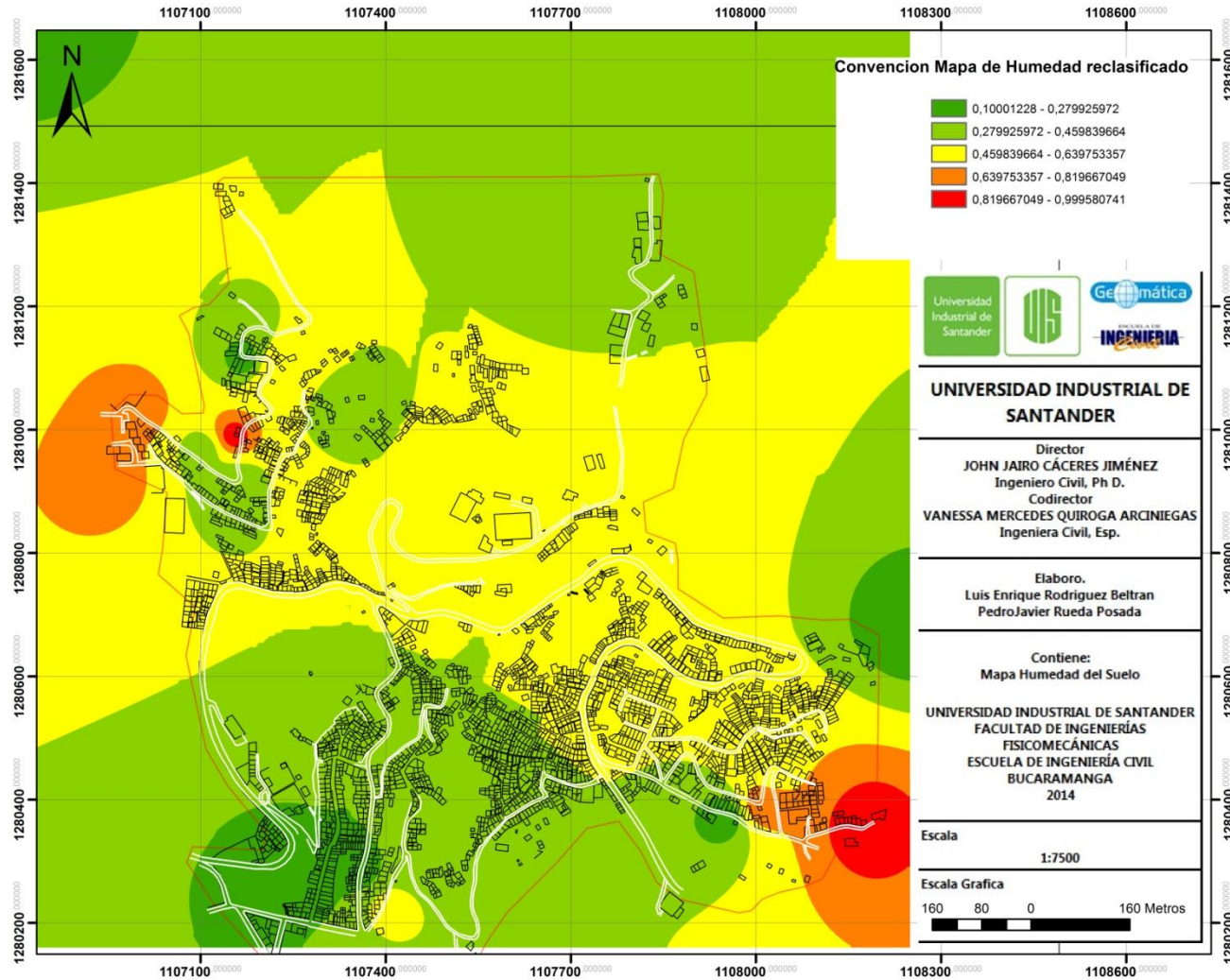
Anexo H. Mapa con Valoración del Parámetro Pendiente.



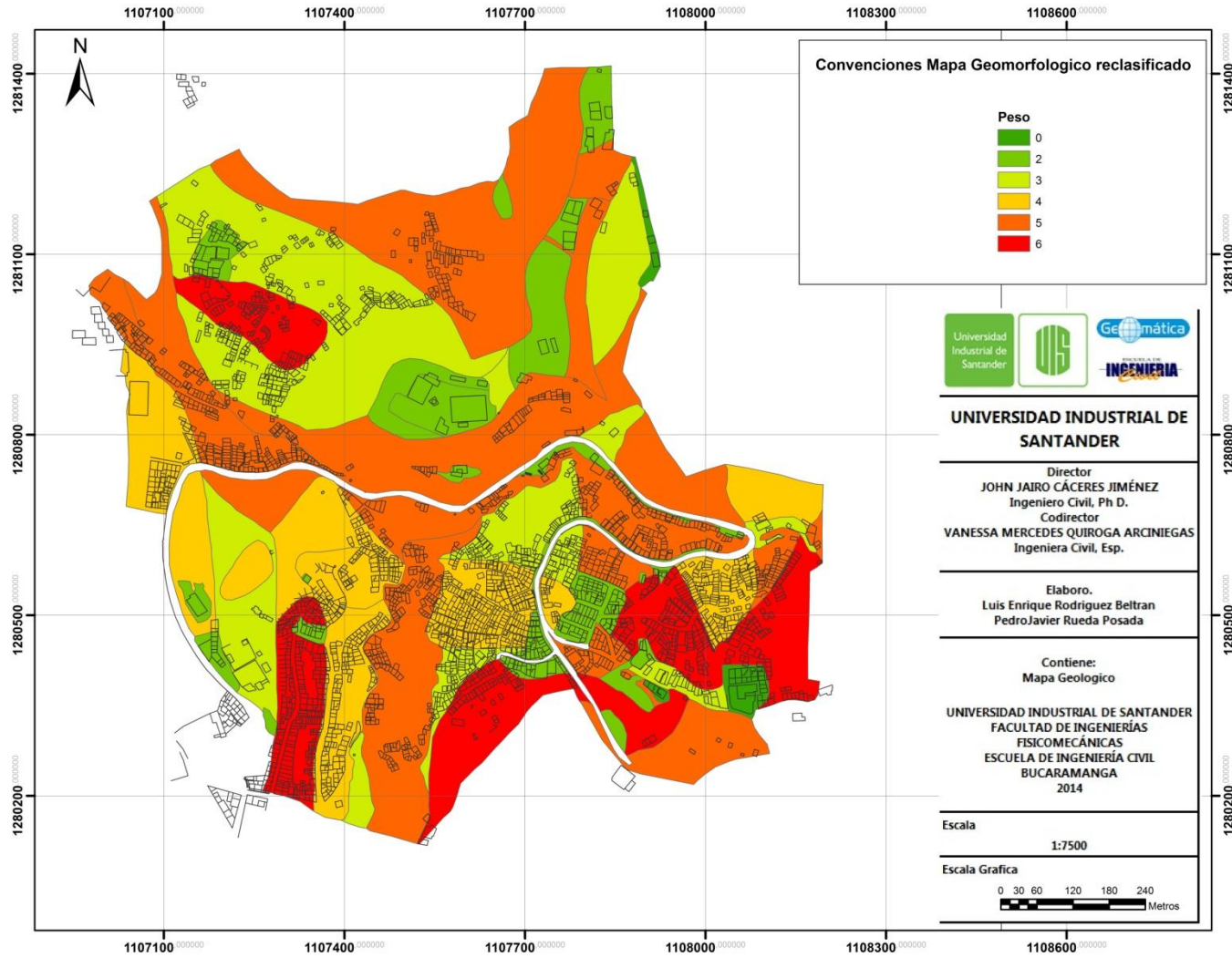
Anexo I. Mapa con Valoración del Parámetro Litológico.



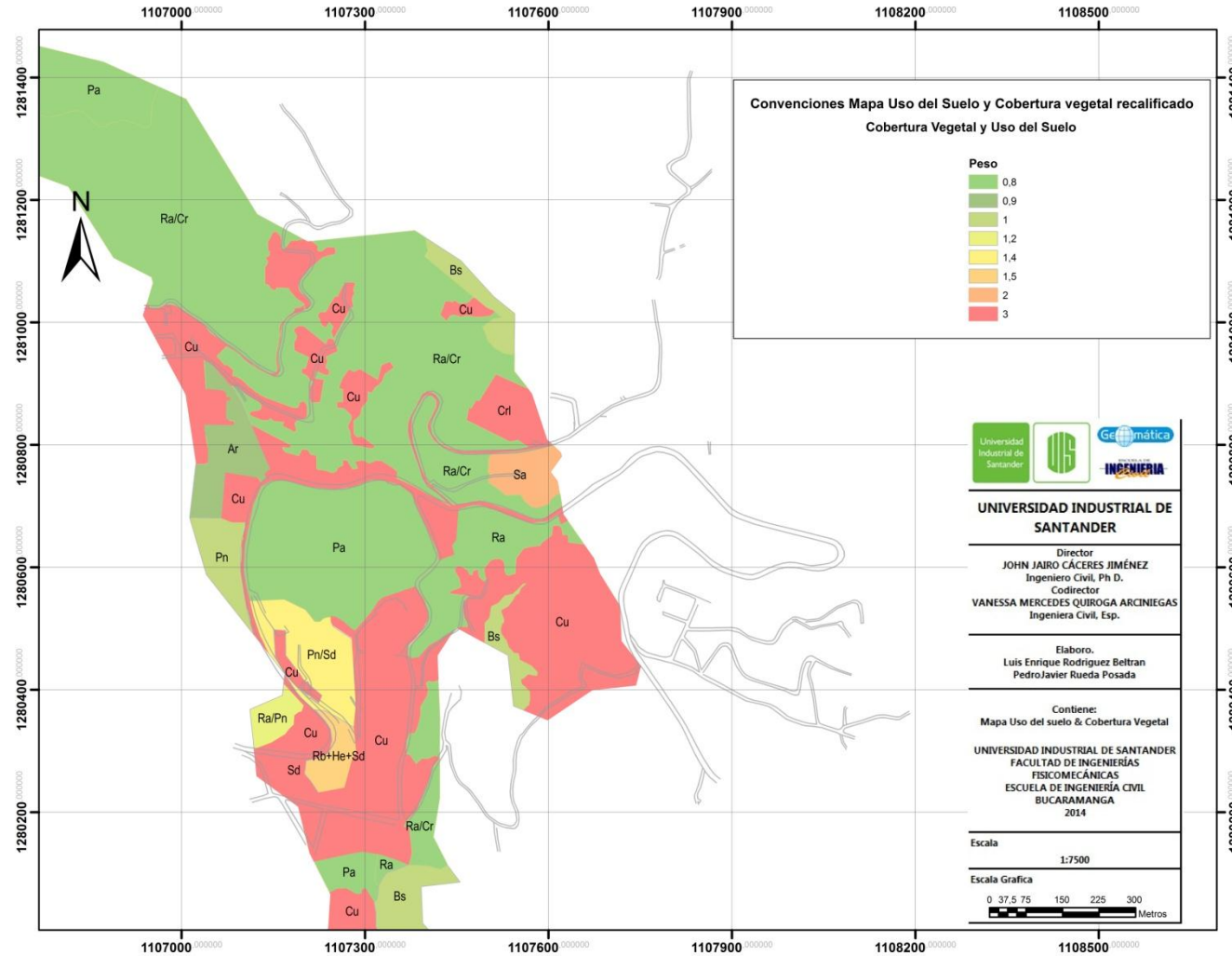
Anexo J. Mapa con Valoración del Parámetro Humedad Relativa.



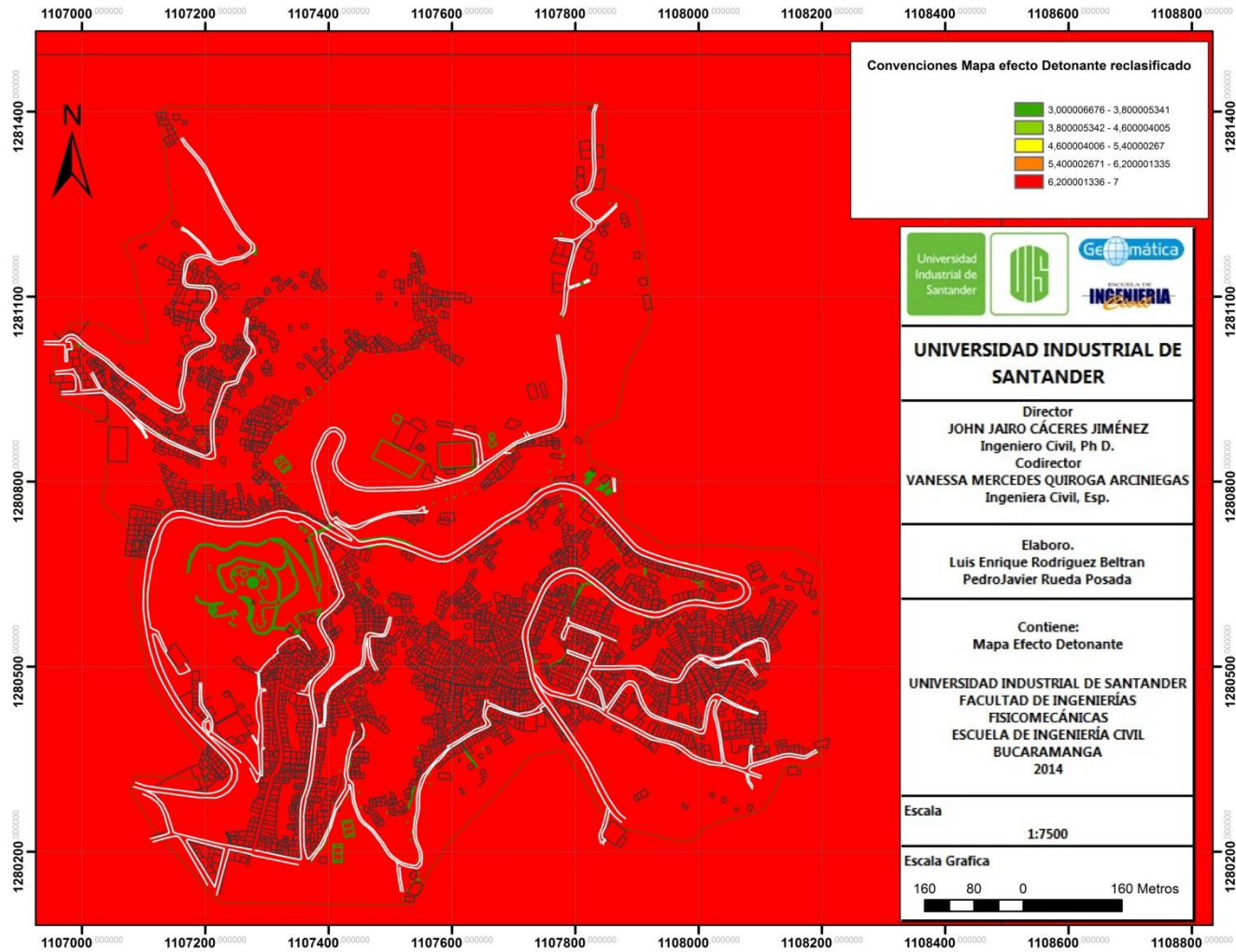
Anexo K. Mapa con Valoración del Parámetro Geomorfológico.



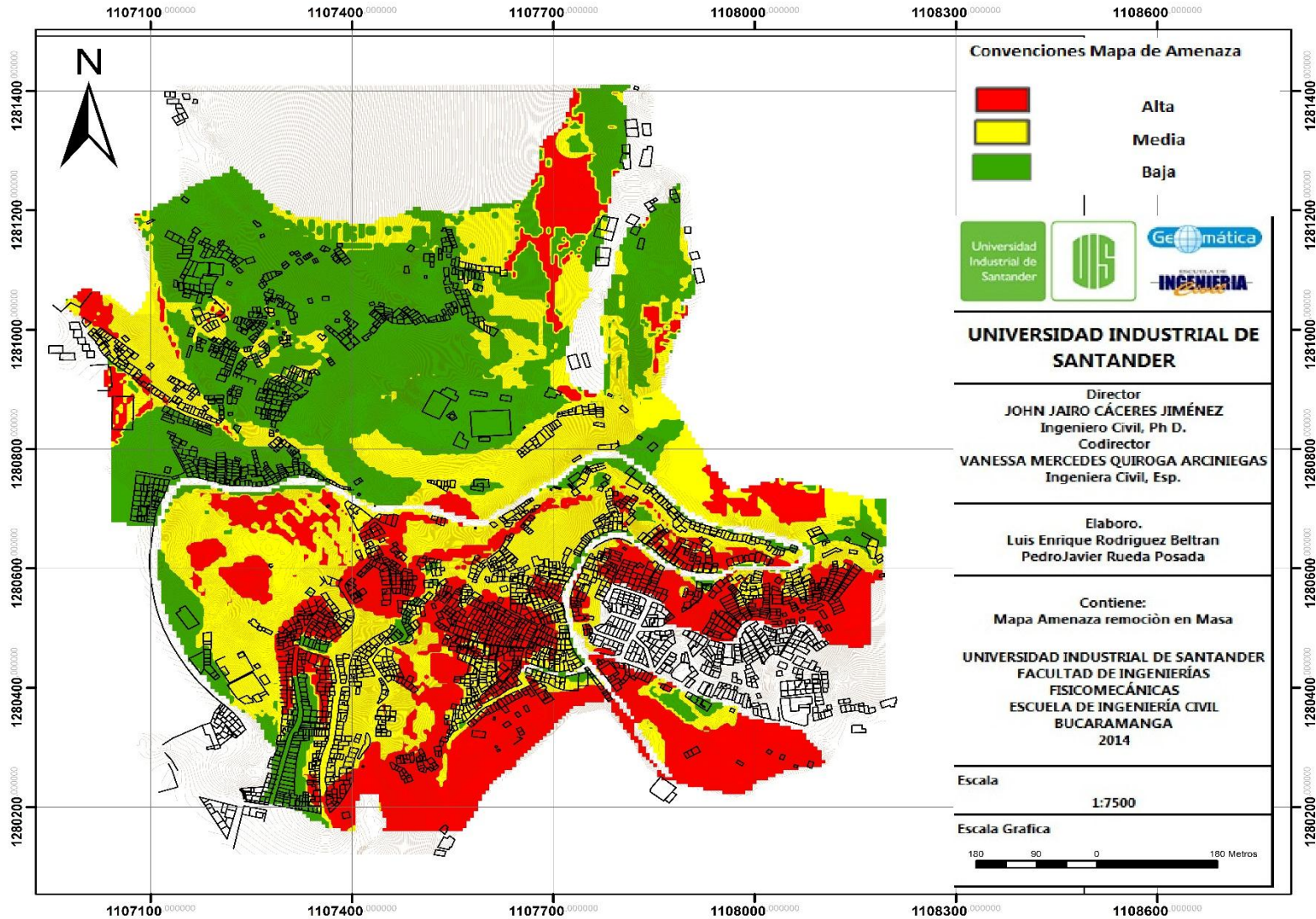
Anexo L. Mapa con Valoración del Parámetro Cobertura Vegetal y Uso del Suelo.



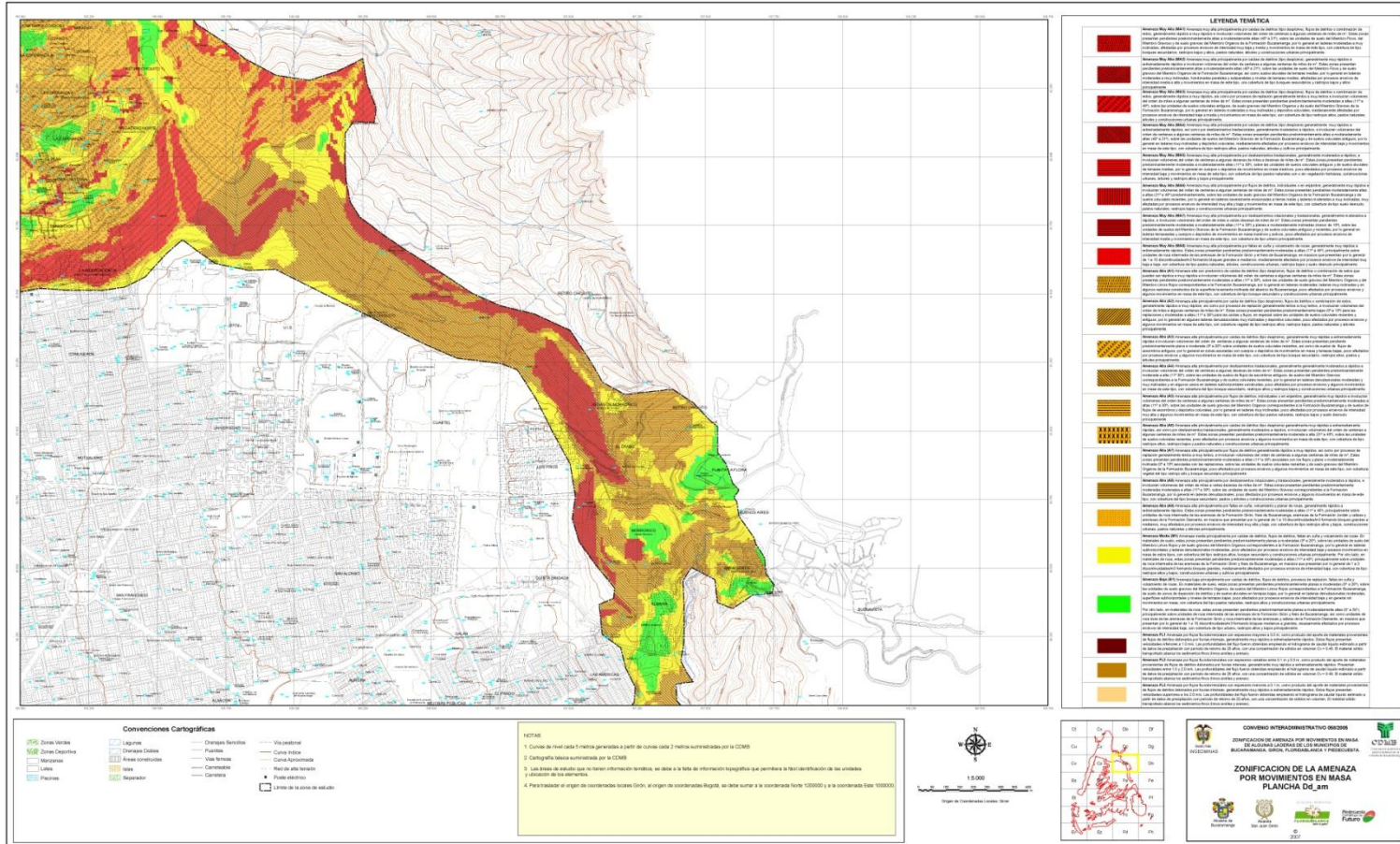
Anexo M. Mapa con Valoración del Parámetro Precipitación.



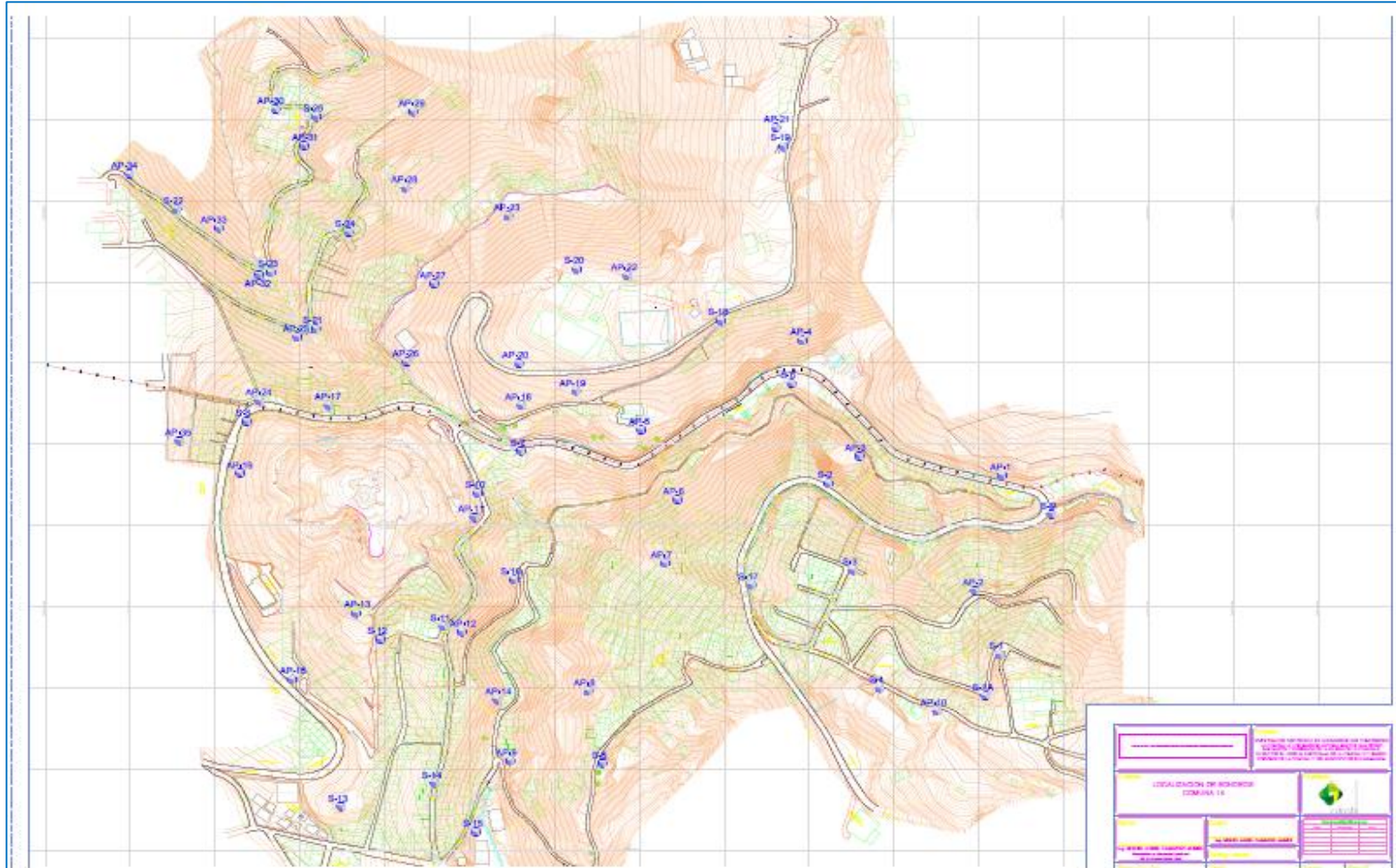
Anexo N. Mapa de Amenazas Obtenido a Partir de la Metodología Aplicada.



Anexo O. Mapa de Amenazas Obtenido por la CDMB.



Anexo P. Mapa de ubicación de los Sondeos Geotécnicos.



Anexo Q. Tratamiento Probabilístico de la Información.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo de una forma que es parcialmente predecible, o determinística, y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se llama estocástico.

Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso, y estos centran su atención en las observaciones mismas, en lugar de los procesos físicos que la producen.

La probabilidad de un evento es la posibilidad de que este ocurra cuando se hace una observación de la variable aleatoria.

Para que el análisis probabilístico produzca resultados útiles debe comenzar con una serie de datos significativos, adecuados y precisos. Cuando se dice que los datos son significativos esto implica que deben estar relacionados estrechamente con el problema.

La serie de datos debe ser adecuada. Esto se refiere principalmente a la longitud del registro, pero incluye también el problema muy frecuente de escasez de datos apropiados. El registro observado es simplemente una muestra de la población de eventos que han ocurrido y puede esperarse que ocurran de nuevo. Si la muestra es muy pequeña las probabilidades obtenidas no resultan muy confiables.

Debido a que la longitud de los registros es normalmente corta no es posible determinar la distribución de frecuencias más apropiada para ser usada al analizar probabilidades asociadas con crecientes. No obstante varios autores han sugerido varias distribuciones, esgrimiendo como prueba a su favor la habilidad de estas distribuciones para ajustarse a los datos de uno o varios ríos. A pesar que se han dedicado grandes esfuerzos para definir la mejor distribución, varios ensayos sugieren que no existe una distribución claramente superior. Intuitivamente no

existe razón alguna para que una distribución única sirva para todos los ríos, La distribución Log Pearson tipo III, ha sido recomendada para las agencias federales de los Estados Unidos. La primera distribución asintótica de los valores extremos, comúnmente llamada la Distribución de Gumbel, también tiene aceptación.

Resultados de Distribuciones de Probabilidad.

Precipitaciones máximas en 24 horas

En primera instancia se analizaron los valores de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones seleccionadas de Llano Grande, La Granja, Club Campestre y El Rasgón.

Para ello se aplicaron las seis funciones de distribución de probabilidad mencionadas a cada una de ellas para luego seleccionar la que más se ajustara a los datos. Los resultados de la aplicación de las seis funciones de distribución mencionadas se presentan en el Tratamiento probabilístico de la información hidrológica.

Una selección apresurada de cualquiera de las funciones podría traducirse en una estructura sobrediseñada y costosa o subdiseñada y peligrosa por eso la selección debe realizarse cuidadosamente. A continuación se describen algunos métodos para hacerlo.

1. Método del error cuadrático mínimo. Consiste en calcular para cada función de distribución el error cuadrático y escoger la que tenga un menor valor.
2. Pruebas de bondad del ajuste. Las más conocidas son la de χ^2 y la de Kolmogorov-Smirnov. Se debe tener precaución al utilizar estas pruebas pues sus resultados dependen mucho de la selección de los intervalos y del tamaño de la muestra, incluso pueden resultar contradictorios para una misma muestra.
3. Análisis gráfico. Consiste en inspeccionar una gráfica donde se haya dibujado cada una de las diferentes funciones junto con los puntos medidos, la función de

distribución seleccionada será la que se ajuste visualmente mejor a los datos medidos.

Aplicación de los métodos de prueba de bondad y análisis gráfico arrojaron resultados semejantes en las estaciones de La Granja, Club Campestre y Rasgón, presentando diferencias para la Estación Llano Grande. Se optó entonces por adoptar como válido el método gráfico.

En la aplicación del análisis gráfico para la selección de las distribuciones que mejor se ajustaran para cada estación para la selección de la precipitación máxima en 24 horas, los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la **Tabla 19**.

Tabla 19. *Funciones de distribución seleccionadas para cada estación para el cálculo de la precipitación máxima en 24 horas.*

ESTACIÓN	DISTRIBUCIÓN SELECCIONADA
Llano Grande	Pearson III
La Granja	Log Normal
Club Campestre	Log Pearson III
El Rasgón	Pearson III

En la **Tabla 20**. Se muestran los valores máximos de precipitación en 24 horas para los diferentes periodos de retorno para cada estación.

Precipitaciones para diferentes duraciones de lluvia.

Siguiendo el mismo procedimiento aplicado a las precipitaciones máximas en 24 horas, se seleccionaron las funciones de distribución que mejor se aplicaran a los datos de los aguaceros que se tenía registrados para cada estación. En la **Tabla 21** se muestran las funciones de distribución seleccionadas para cada estación.

Tabla 20 Precipitación máxima en 24 H en cada estación para distintos periodo de retorno.

Tr (años)	PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 H (mm)			
	LLANO GRANDE	LA GRANJA	CLUB CAMPESTRE	EL RASGÓN
500	239.47	165.55	161.69	141.44
100	182.01	143.82	129.29	115.98
50	158.19	134.15	116.61	104.71
25	134.95	124.17	104.53	93.15
10	105.21	110.16	89.23	77.16
5	83.51	98.45	77.82	64.14
3	68.00	88.65	69.16	53.60
2	56.04	79.43	61.73	44.13

Tabla 21 Funciones de distribución seleccionadas para cada estación para el cálculo de la precipitación para diferentes duraciones de lluvia.

ESTACIÓN	DISTRIBUCIÓN SELECCIONADA
Llano Grande	Pearson III
La Granja	Log Pearson III
Club Campestre	Gumbel
El Rasgón	Log Pearson III

Con base en la función de distribución seleccionada para cada estación, se hallaron las ecuaciones de las líneas de tendencia que más se ajustaran a los datos las cuales se muestran en las tablas 22 a 29.

Tabla 22 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 20 minutos para la estación de Llano Grande

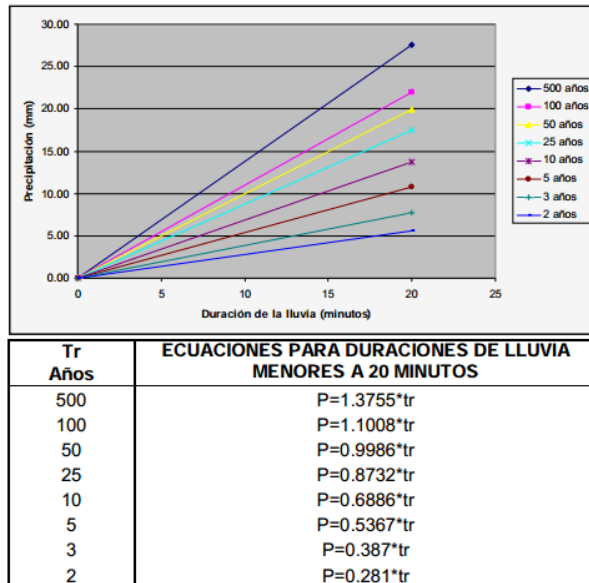


Tabla 23 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 20 y 200 minutos para la estación de Llano Grande

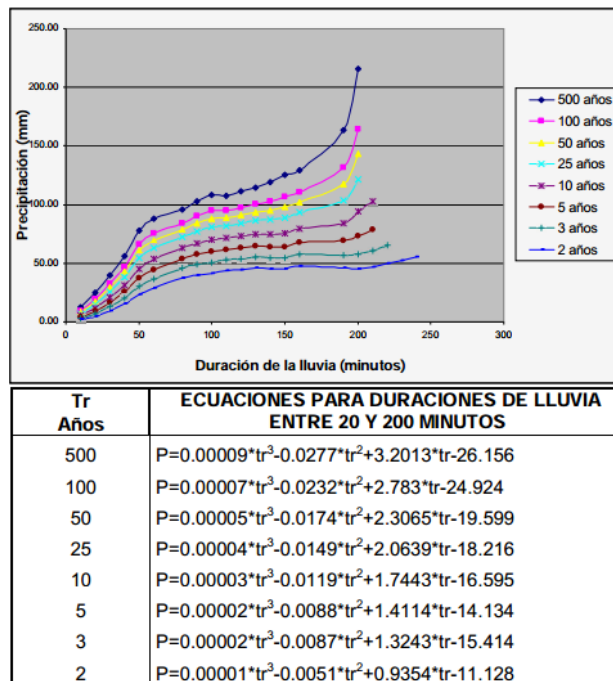


Tabla 24 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 10 minutos para la estación de La Granja

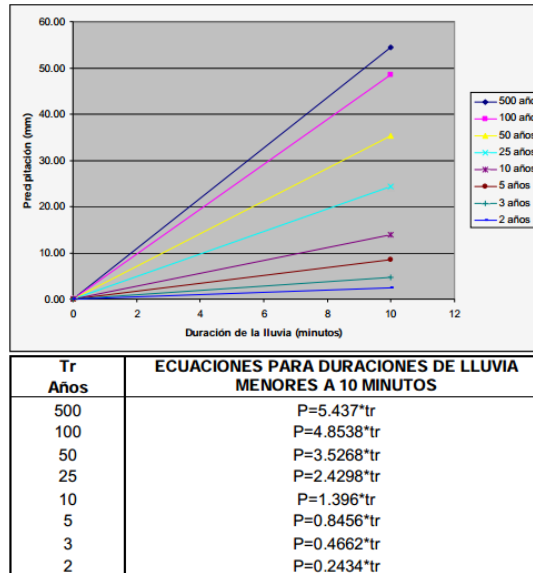


Tabla 25 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 10 y 120 minutos para la estación de La Granja

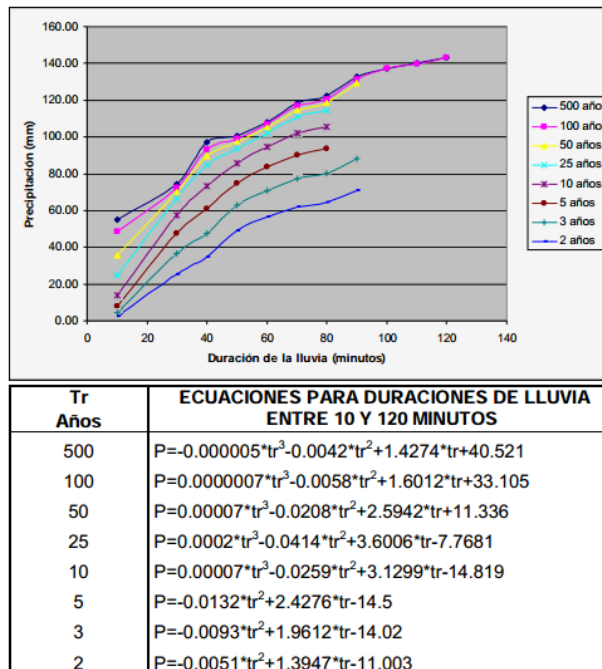


Tabla 26 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 30 minutos para la estación de Club Campestre

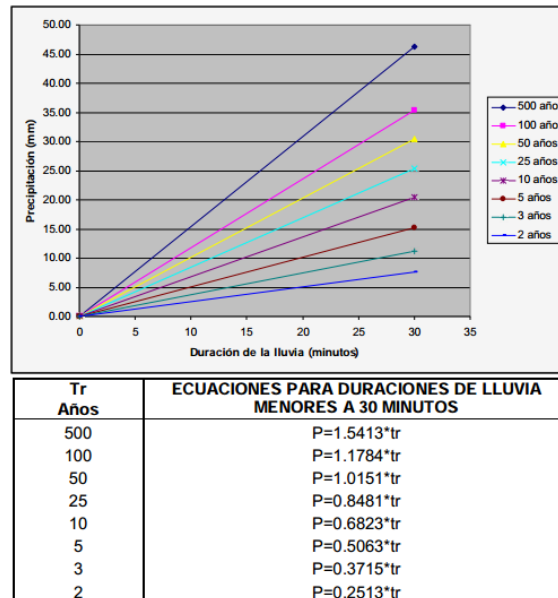


Tabla 27 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 30 y 240 minutos para la estación de Club Campestre

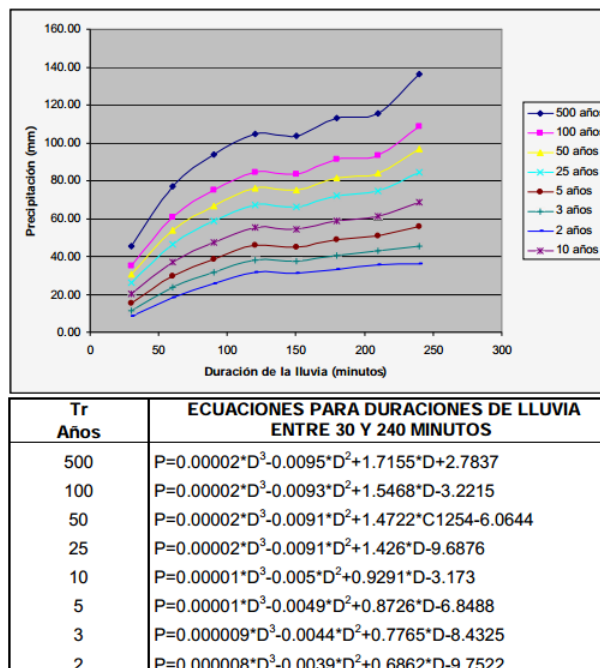


Tabla 28 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia menores a 10 minutos para la estación de El Rasgón

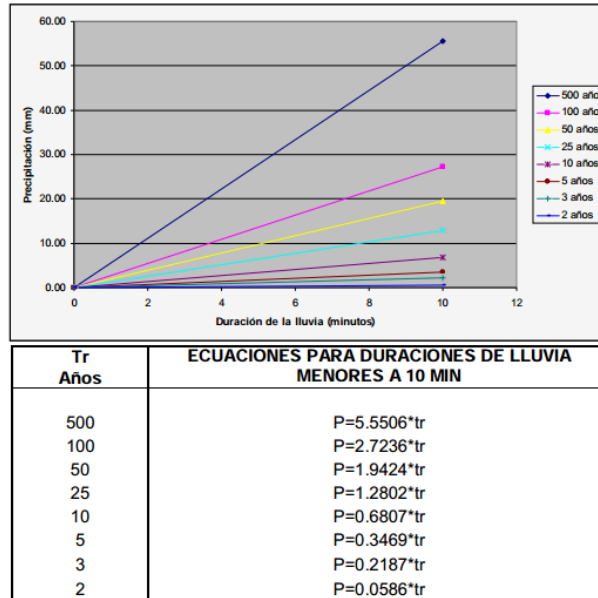
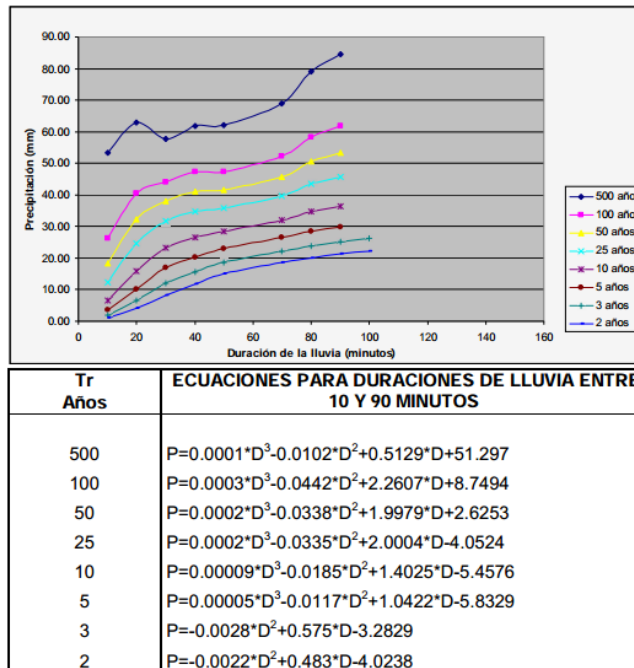


Tabla 29 Ecuaciones para el cálculo de la precipitación para duraciones de lluvia entre 10 y 90 minutos para la estación de El Rasgón



Anexo R. Estudio Geomorfológico.

Ocupación del territorio.

La Comuna 14 comprende sectores urbanizados en condiciones de ladera y sectores de características rurales. Como asentamientos urbanos se identifican los siguientes:

- En el costado norte del Cerro de Morrórico y costado idem de la vía a Pamplona se tienen los Barrios Los Sauces y El Diviso, este último limitado por los terrenos de la planta La Flora (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga); un poco más al norte el Barrio El Pedregal.
- Hacia el costado norte de la citada planta, el Sector de La Malaña y Barrio Morrórico.
- Al oriente del Cerro de Morrórico, en las laderas ubicadas entre la vía a Pamplona y la Quebrada La Flora, el Barrio Miraflores; por encima de éste, dominando la citada vía, el Barrio Buenos Aires. Siguiendo hacia el oriente por la misma loma, se encuentra el Barrio Buenavista.

Regionalización geomorfológica.

Las formas del terreno son el resultado de la acción de fuerzas internas y externas, las cuales ejercen su influencia sobre la corteza terrestre. Las fuerzas internas están representadas por la estructura geológica, en la que entran en juego la litología y la tectónica, en tanto que las fuerzas externas están representadas básicamente por el clima. La variable complementaria la constituye el tiempo.

Con base en este esquema general, los relieves o formas del terreno muestran tendencias, unos hacia las influencias estructurales, otros hacia las fuerzas externas donde el clima ha dejado su sello, dándose lugar al concepto de los llamados conjuntos morfoclimáticos. En el caso particular de los terrenos de esta

parte del territorio santandereano, el emplazamiento de las diferentes formaciones geológicas y los desplazamientos tectónicos que han afrontado han determinado la forma y posición de las diferentes estructuras (geoformas mayores) reservándole al clima los retoques de detalle; a mayor influencia del clima menor expresión del fondo estructural de las formas superficiales del terreno.

En torno al Área Metropolitana de Bucaramanga, de occidente a oriente se pueden identificar varios contextos morfoclimáticos, siendo a grandes rasgos la llamada plataforma de Lebrija, especie de altiplano localizado entre los 900 a 1.300 m.s.n.m, delimitado al oriente por las altas y abruptas laderas que caen hacia el río de Oro. A continuación y al oriente de la anterior, la Meseta de Bucaramanga con sus escarpas a altitudes que oscilan entre los 700 a 1.000 m.s.n.m, seguida más al oriente de laderas de alta montaña pertenecientes al llamado Macizo de Santander, cuerpo de características montañosas que se eleva entre otros hasta los Páramo de Berlín y Santurbán, existiendo al pie de del mismo y cabeceras de la meseta un angosto cinturón de cerros bajos entre los 1.000 y 1.100 m.s.n.m.

Dentro de la regionalización geomorfológica anterior, nos situaremos en los terrenos del pie occidental del Macizo de Santander y un sector de la franja de los cerros orientales de Bucaramanga.

Leyenda de los Mapas Geomorfológicos.

La leyenda utilizada para los mapas geomorfológicos de la presente investigación - Barrios que comprenden la Comuna 14, los Barrios Antonia Santos, San Pedro, San Martín y Quebrada La Iglesia de la Comuna 9, el sector El Cristal parte baja de la Comuna 10 y Barrio Porvenir de la Comuna 11 del Municipio de Bucaramanga, sigue la estructura del mapa geomorfológico del Ingeominas en cuanto al empleo de número de identificación, nombre de la geoforma, seguida de un texto explicativo, conforme a la tabla que aparece en las diferentes planchas publicadas.

En primer lugar se intentó hacer un empalme de la cartografía existente con la producida para el presente estudio, es decir retomar la leyenda geomorfológica de los mapas de Ingeominas y extenderla hacia los nuevos sectores cartografiados geomorfológicamente. Este objetivo no se logró, por diferencias conceptuales de fondo; en el mapa de Ingeominas priman los aspectos topográficos mientras que en el caso de la cartografía elaborada en el presente trabajo está orientada hacia las formas del terreno y al comportamiento esperado de los suelos frente a los diferentes procesos geodinámicos que los afectan, por lo tanto se tuvieron que introducir cambios tanto en el nombre de la geoforma, como en el texto explicativo que le sigue.

Respecto a los símbolos que las identifican en el mapa, se procedió a retomar las que aparecen en el plano de Ingeominas y efectivamente se utilizaron varias de ellas con los cambios ya mencionados. Se considera que la leyenda de Ingeominas está estructurada y puede ser objeto de mejoramientos conceptuales y aplica a toda el área metropolitana y es posible que la CDMB la requiera mantener unificada y por tales circunstancias prefiera que se continuase con la misma; sin embargo de ser así, la leyenda de los mapas del presente estudio, contemplaría muy pocos ítems (según la denominación de Ingeominas), se ordenaría siguiendo la estructura de tal leyenda, pero surge el problema de que solo se tienen pocas geoformas por cada agrupación de las mismas, como se ve a continuación, en la que se precisa la leyenda de los mapas en el mismo orden en que aparecen en los mapas definitivos.

Como resultado de la investigación geomorfológica y de acuerdo a lo expuesto anteriormente se procedió a dar un aporte en cuanto a las clasificaciones de Ingeominas, para esto se procedió a generar subcategorías de las variantes de las geoformas principales, de acuerdo con las denominaciones de Ingeominas, lo cual conduce a la posibilidad de abrir columna al respecto en la Leyenda del Mapa.

A continuación se presente la explicación de las subcategorías generadas para la investigación.

- D17. TALUD DE DERRUBIOS GRAVITACIONALES. Depósito de materiales de carácter suelto e in consolidado al pie de ladera, de modelado cóncavo.
- A12. EXPLANACIONES AL PIE DE LADERA. Cortes en pié de laderas sobre derrubios gravitacionales.
- A12-1 EXPLANACIONES EN FONDOS DE VALLE. Cortes en fondos de valle con presencia de derrubios fluviales o fluvio torrenciales.
- A9. EXPLANACIONES EN LADERA EN LADERA DE SUELOS DE ROCA CONSOLIDADA. Cortes en laderas sobre suelos residuales formados a partir de rocas consolidadas con el fin de adecuar terrenos para la construcción de edificaciones y obras de infraestructura.
- D14. CICATRIZ DE ANTIGUO MOVIMIENTO DE MASA. Concavidad que se causa y desarrolla por el desplazamiento de materiales hacia debajo de la ladera respectiva.
- D14 – 1. CICATRIZ DE ANTIGUO MOVIMIENTO DE MASA DE CARÁCTER PLANAR. Amplia y extensa concavidad que se causa y desarrolla por el desplazamiento de materiales hacia abajo de la ladera respectiva.
- Aclaración. Es un movimiento de masa amplia y superficial a diferencia de la anterior que es menos extensa y más profunda.
- D23. CICATRIZ DE ANTIGUO MOVIMIENTO DE MASA TRANSFORMADO EN MICROCUENCA. Grande y extensa concavidad que se causa y desarrolla por el desplazamiento de materiales hacia debajo de la ladera respectiva al punto de haberse formado una microcuenca.
- A1-1. EXPLANACION ANTROPICA EN TOPE ESTRUCTURAL. Cortes en tope estructural de cerro truncado con el fin de adecuar terrenos para la construcción de edificaciones y obras de infraestructura.

- A13. RELLENOS INGENIERILES. Rellenos diseñados y construidos en torno a construcciones ingenieriles. Aplica a los existentes en torno a los tanques de almacenamiento de aguas de la planta la Flora.
- D10. LADERAS MUY PENDIENTES. Superficie natural del terreno de muy alta pendiente (40 a 70 grados), larga y rectilínea, con derrubios superficiales.
- D10-1. LADERAS PENDIENTES RECTILINES A SU VEZ SUPERFICIE ESTRUCTURAL. Superficie natural del terreno sobre espaldón de paquete estructural en posición altamente inclinada, en este caso hacia el oriente.
- D10-2. LADERAS MUYPENDIENTES EROSIONADAS SUPERFICIALMENTE. Laderas a tendencia rectilínea con pendientes de 40 a 70 grados con superficiales cicatrices de erosión.
- D10-3. LADERAS EN ESCARPES ESTRUCTURALES LATERALES. Laderas con pendientes mayores de 70 grados de composición rocosa, mostrando lateralmente la disposición estructural del respectivo paquete de rocas.
- D10-4. LADERAS EN ESCARPE ESTRUCTURALES FRONTALES. Laderas con pendientes mayores de 70 grados con suelos de composición rocosa, meteorizadas varios metros de profundidad, modeladas en la parte frontal de paquete estructural.
- D10-5. LADERA A SU VEZ ESCARPE DE FALLA. Laderas con pendientes mayores de 70 grados cortadas casi verticalmente, por desplazamiento en torno a falla geológica.
- D10-6. LADERAS PENDIENTES EN SUPERFICIE ESTRUCTURAL METEORIZADA. Espaldón rocoso muy meteorizado en posición altamente inclinada hacia el oriente.
- D10-7. LADERAS EN ESCARPES LATERALES ESTRUCTURALES METEORIZADOS. Laderas muy pendientes superficialmente meteorizadas (suelos residuales de varios metros de profundidad).
- D10-8. TOPE ESTRUCTURAL METEORIZADO. Tope de paquete rocoso meteorizado (suelo residual de varios metros de profundidad).