



CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CVC – UNIVALLE 188 DE 2008

ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS Y ESCENARIOS DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y CRECIENTES TORRENCIALES DEL ÁREA URBANA Y DE EXPANSIÓN DE LOS MUNICIPIOS DE BUGA, RIOFRÍO, DAGUA, EL CAIRO Y LA UNIÓN

RESUMEN GENERAL

MUNICIPIO DE RIOFRÍO

Santiago de Cali, Septiembre de 2010

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| <i>PRESENTACIÓN</i> | 3 |
| <i>1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO</i> | 4 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 1.2. OBJETIVOS | 5 |
| <i>2. ORGANIZACIÓN Y GRUPOS DE TRABAJO</i> | 8 |
| <i>3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</i> | 10 |
| <i>4. ESTUDIOS REALIZADOS</i> | 12 |
| 4.1 HISTORICIDAD | 12 |
| 4.2. TOPOGRAFÍA | 13 |
| 4.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA | 15 |
| 4.4 GEOLOGÍA | 19 |
| 4.5 GEOFÍSICA | 20 |
| 4.6 HIDROLOGÍA | 23 |
| 4.7. HIDRÁULICA | 24 |
| 4.8. GEOTECNIA | 28 |
| <i>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i> | 55 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 55 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 58 |
| <i>AGRADECIMIENTOS</i> | 63 |

PRESENTACIÓN

Es de gran satisfacción para la Universidad del Valle, representada por el Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano, presentar este documento que resume de manera global el conjunto de actividades y resultados obtenidos en la realización de los estudios de consultoría del proyecto de “Zonificación de Amenazas y Escenarios de Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Crecientes Torrenciales del Área Urbana y de Expansión de los Municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión”, correspondiente al contrato interadministrativo CVC – UNIVALLE No.188 de 2008.

El estudio se constituye en un valioso e importante instrumento para el desarrollo de procesos orientados a la planeación del territorio y en lo concreto a los planes que deben seguir las municipalidades para la gestión del riesgo. En los diferentes estudios que lo componen se destacan aspectos históricos, topográficos, cartográficos, geológicos, geofísicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidrológicos, e hidráulicos, necesarios para determinar el diagnóstico del estado en que se encuentra el territorio y efectuar los análisis de amenazas, vulnerabilidad y posibles escenarios de afectación, cuyos resultados permiten establecer lineamientos preliminares para la elaboración de los Planes de Emergencias y Contingencias de los Municipios, y por supuesto actualizar los Planes de Ordenamiento Territorial, según lo ordenan las leyes colombianas.

Este proyecto fue ejecutado por el Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano de la Universidad del Valle con la gestión y financiación de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC y la Supervisión Técnica de la firma Hidro – Occidente.

El resumen que presentamos a continuación corresponde específicamente a las actividades y resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto en el Municipio de Riofrío.

1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

La falta o el inadecuado nivel de conocimiento de las amenazas y riesgos en los municipios del Valle del Cauca y por supuesto, la ausencia de soporte para proyectar su ordenamiento territorial, llevó a que la CVC incluyera en el Plan de Acción Trienal 2007-2009 un proyecto en este sentido, es decir la realización de la zonificación de amenazas y escenarios de riesgo direccionada hacia los centros o cabeceras municipales que es donde se focalizan las mayores vulnerabilidades y posibles situaciones de desastre o afectación.

De esta manera, se ha priorizado la acción de la CVC hacia las áreas urbanas de las cabeceras municipales, que estadísticamente han presentado mayor número de desastres, y sobre las cuales el estado del conocimiento es nulo o bastante deficiente.

Las cabeceras municipales de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión han sido incluidas en el presente proyecto, con el fin de que mancomunadamente con sus administraciones y tomadores de decisiones municipales, y bajo la ejecución del Observatorio Sismológico y Geofísico de la Universidad del Valle, entidad de carácter científico y con experiencia en este tipo de estudios, se obtengan las herramientas de juicio necesarias para la planificación del territorio.

Por tanto, el presente resumen incluye de manera global las diferentes actividades y resultados del proyecto correspondientes al periodo de ejecución de procesos en el Municipio de Riofrío.

1.2. OBJETIVOS

General

- Realizar estudio de zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión pertenecientes al Departamento del Valle del Cauca.

Específicos

- Recolectar y clasificar la información existente en cada municipio para la realización del estudio de zonificación de amenazas por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales.
- Realizar el levantamiento cartográfico detallado de cada municipio bajo estudio.
- Preparar la información cartográfica y geográfica de cada uno de los cinco municipios de estudio conforme las políticas y estándares que tiene establecida la CVC para garantizar que la información generada en el estudio pueda ser incorporada al SIG de la CVC.
- Realizar la evaluación y modelamiento de la susceptibilidad a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.
- Elaborar mapas de amenaza a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios señalados, considerando las lluvias y los sismos como factores detonantes.
- Realizar estudio de zonificación de escenarios de afectación o daño (riesgo) por movimientos en masa, inundación y crecientes torrenciales para las cabeceras municipales de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión.

- Determinar los modos y niveles de afectación y daño de los elementos expuestos en las zonas de amenaza alta y media de los municipios considerados.
- Formular de manera general algunos lineamientos y esquemas particulares para elaborar los planes de prevención y atención de desastres y de contingencia y emergencia para cada municipio a partir de los resultados de los estudios de amenaza y escenarios de afectación o daño.
- Socializar los resultados del estudio en cada municipio considerado
- Elaborar informes parciales y final del estudio.

1.3. IMPORTANCIA

Colombia por su relieve, topografía y características geográficas, geológicas, climáticas e hidrológicas, es un país expuesto a la ocurrencia e impacto de fenómenos naturales que actúan asociados con severos procesos de erosión causantes de movimientos en masa.

En la misma dinámica, el territorio nacional es afectado por agudos procesos invernales que asociados con diversos factores sociales y ambientales son la causa de inundaciones y avenidas torrenciales que dejan cada año cuantiosas pérdidas. Lo anterior, sumado a la compleja situación de vulnerabilidad en la que permanece gran parte de la población colombiana constituye verdaderos escenarios de afectación en grandes ciudades, ello es la razón fundamental para que en Colombia existan preocupantes escenarios de potenciales desastres, situación que en el pasado ha dejado rastros de caos y atraso en el desarrollo de las ciudades y los municipios afectados.

El presente estudio es de gran trascendencia para el futuro y la sostenibilidad de los municipios, porque, por una parte, proporciona la información y la visión actualizada del

estado en que se encuentran los cinco municipios y, por otra parte, implementa una serie de técnicas, modelos y metodologías de última generación en la recolección de información y en la sistematización de la misma, con las cuales se pudieron establecer con alto grado de aproximación las amenazas, la susceptibilidad, la vulnerabilidad y los posibles escenarios de riesgo en que se encuentra la población y las estructuras, ello constituye material suficiente y válido para que los municipios elaboren o actualicen los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), los Planes de Desarrollo Sectorial (PDS), los Planes de Gestión del Riesgo y los Planes de Emergencias y Contingencias (PLEC) como instrumentos de planificación esencial en el corto y mediano plazo para la toma de decisiones sobre el futuro económico y social de los municipios, el departamento y la nación.

La información que aporta cada uno de los diferentes estudios que integran este proyecto constituye fuente obligada y permanente de consulta por parte de las autoridades municipales, los organismos directamente comprometidos con la prevención y atención de desastres y la comunidad en general, ya que en ella podrán encontrar fuentes serias, actualizadas y detalladas que les ayudarán en la solución de temas cruciales como la gestión del riesgos, la participación pública, privada y comunitaria en el desarrollo de los planes de emergencias y contingencias y por supuesto, el fortalecimiento de las capacidades de la comunidad en general.

Finalmente, se puede decir con mucha responsabilidad y confianza que el estudio realizado por la Universidad del Valle, constituye un aporte muy significativo en cuanto a las metodologías planteadas y aplicadas para la determinación de amenazas, vulnerabilidad y afectación, ya que son el resultado de la labor investigativa y de consultoría realizada por un grupo muy calificado de expertos, que se constituye en una referencia típica de cómo proceder para enfrentar este tipo de problemáticas y que puede servir de guía para realizar estudios similares en otros municipios y regiones del país.

2. ORGANIZACIÓN Y GRUPOS DE TRABAJO

Durante el desarrollo del presente estudio se contó con la participación de un importante grupo de investigadores, expertos en las diferentes temáticas que integran el estudio, quienes aportaron su experiencia y dedicación en el desarrollo de las diferentes actividades, tal como aparece a continuación:

Participantes:

Asistente Administrativo: Karina Castillo
Auxiliar administrativo: Jeniffer Quiñonez

Entidad Gestora y Financiadora

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC

Directora: María Jazmín Osorio Sánchez

Director Técnico Ambiental: Julián Gerardo Benítez Sepúlveda

Supervisores de Interventoría:

- Harbey Millán
- Olga Patricia Villa

Entidad Ejecutora:

Universidad del Valle – Observatorio Sismológico y Geofísico

Rector: Iván Enrique Ramos Calderón

Director Observatorio: Elkin Salcedo Hurtado

Administración del proyecto

Director: Elkin Salcedo Hurtado

Coordinador Técnico: Jaime Rojas Muñoz

Grupos Temáticos

Sistemas de Información Geográficos:

- Edda Cifuentes
- Jiber Antonio Quintero Salazar
- Viviana Barrero Varela

Historicidad

- Luz Ángela Mazuera
- Nathaly de los Ángeles Mazo

Hidrología

- Henry Jiménez
- Fabián Barroso
- Juan Pablo Urrego
- Victoria Solarte
- Jhonny Humberto Garcés
- Tulio Enrique Bonilla
- Simón Andrés Giraldo

Geotecnia

- C. I. Ambiental Ltda.
- Jacobo Ojeda
- Jesús García

- Lorena Beltrán
- Natalia Peña Galvis

Geología y Geofísica

- Gabriel Paris
- Magnolia Aponte Reyes
- William Vargas
- Daniel Ramírez

Topografía y Cartografía

- Jhon Jairo Barona
- Héctor Fabio Fernández
- Jazmín Alicia Buitrago Peña

- José Julián Castrillon Villada
- José Ricardo Castro Borja
- Julián Andrés Escobar

Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación

- Olga Lucia Baquero
- Andrés Felipe Torres Cruz
- Jorge Andrés Vélez Correa
- Nathaly de los Ángeles Mazo
- Carolina Mosquera Antury

3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Riofrío se encuentra situado en la parte centro occidental del Departamento del Valle del Cauca a los 4° 09' 23" de latitud Norte y 76° 17' 26" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; limita por el Norte con el municipio de Trujillo, por el Oriente con el municipio de Tuluá, por el Sur con los municipios de Yotoco y Darién y por el Occidente con el Departamento del Choco. (Figura 1).

Su superficie es de 29,597 Hectáreas, de las cuales 25,031 son área de ladera que representan el 84% del total y 4,680 Hectáreas que están en la zona plana representando el 16 % de la superficie total. Posee variados pisos térmicos que van desde el clima cálido hasta el frío. Su diversidad de pisos térmicos va de la mano con la topografía y orografía; posee desde valles hasta montañas y cordilleras de alturas considerables.

La zona urbana y de expansión de la cabecera municipal cuenta con un área de 92,42 Hectáreas, conformada por los Barrios: Piedra Pintada, El Samán, El Lago, Belén Pinar del Río, El Centro, El Castillo, La Paz, Fundevir, Las Delicias, La Acequia, San Alfonso y El Naranjo. Su zona urbana tiene una extensión aproximada de 1 km en el sentido oriente-occidente, desde la Carrera 1 al este hasta la Carrera 16 al oeste, y de 800 m en sentido norte-sur, desde la Calle 1 a orillas del río Riofrío hasta la Calle 11 al norte. El parque principal, como referente, está enmarcado entre la Carrera 9 al este y la Carrera 10 al oeste, y entre la Calle 5 al sur y la Calle 6 al norte. La Carrera 10 se prolonga en dirección sur hasta cruzar el río Riofrío por el puente Alonso Aragón Quintero.

El área rural está conformada por cinco corregimientos. Ellos son: Fenicia con un área de 9.364 Hectáreas (32% del área total), Salónica con un área de 7.150 Hectáreas (24 % del área total), Portugal de Piedras con un área de 4.932 Hectáreas (17% del área total), La Zulia con un área de 1.927 Hectáreas (6% del área total) y a la Cabecera Municipal pertenecen 6.338 Hectáreas del área rural (21% del área total); para un total de 29.711 Hectáreas.

El sistema estructural en el área de estudio corresponde al sistema de fallas de dirección N a N20°E. Dicho sistema comprende la falla de Cali-Patía. Un segundo sistema notable en la región, corresponde a las fallas transversales que tienen una dirección que varía entre N40°-50°W, hacia la región de El Cairo, dichas fallas transversales tienen unos 60° a 70° de dirección al NW. Un rasgo estructural notable es la falla de Garrapatas, transversal al sistema NNE, situada al sur, cuyas fallas satélites se extienden hacia la región de El Cairo.

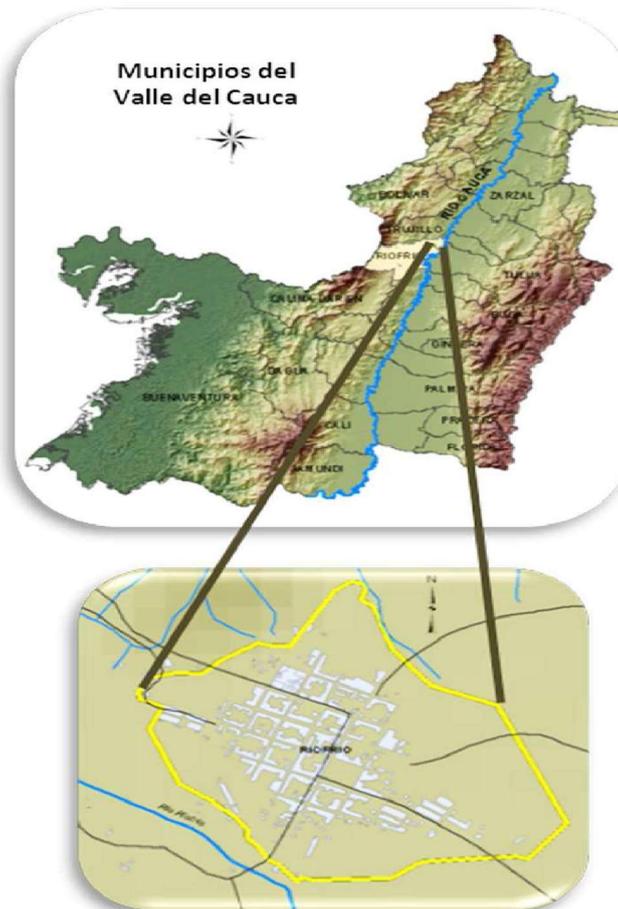


Figura 1 Localización Municipio de Riofrío.

4. ESTUDIOS REALIZADOS

4.1 HISTORICIDAD

Tuvo como objetivo recolectar y relacionar la historicidad de todo tipo de eventos naturales (especialmente movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) ocurridos en épocas pasadas en la cabecera municipal de Riofrío, tarea que se realizó mediante la consulta de diversas fuentes documentales para la recopilación de las noticias de cada uno de los eventos históricos. Entre los textos consultados se encuentran: el Sistema de Información Geográfica de la Unidad de Manejo de la Cuenca Riofrío – Piedras – Pescador, que realizó la CVC en convenio con la Universidad Nacional, sede Medellín en 1998; el EOT (Esquema de Ordenamiento Territorial) del municipio de Riofrío; una actualización del Plan de Ordenamiento y manejo de la cuenca Hidrográfica del Río Riofrío 2.007 – 2.016, realizado por la Fundación Río Riofrío en convenio con la CVC y la Unidad Central del Valle; el PLE (Plan Local de Emergencias), realizado por el CLOPAD con la asesoría de estudiantes de último semestre de Atención Pre-Hospitalaria de la Universidad del Valle en el año 2007; también se consultó un informe realizado en agosto del año 2007 por la firma de ingenieros consultores, Hidro-Occidente S.A., titulado: Estudio y diseño de obras de protección contra inundaciones causadas por desbordamiento del río Riofrío, en el barrio El Castillo de la ciudad de Riofrío. Por último, se hizo una revisión del Plan Departamental del Agua: Informe de Diagnóstico preliminar en abastecimiento de agua y saneamiento básico del Municipio de Riofrío, realizado en el año 2008.

Gracias a esta información fue posible establecer los principales eventos que se presentan en el casco urbano y sus repercusiones materiales en la población. Esta información institucional es complementada con noticias de los periódicos El País y El Tiempo, además de oficios e informes del CLOPAD y la CVC.

Los principales resultados del estudio son el catálogo de eventos históricos en el que aparecen los episodios de inundación que han afectado al municipio durante los últimos años y el mapa de historicidad de inundaciones y avenidas torrenciales.

4.2. TOPOGRAFÍA

Los puntos de control topográfico sirvieron de amarre a los levantamientos topobatimétricos de los cuerpos de agua a estudiar, a saber: Acequia La Liga, Quebrada La Barra, Río Cuancua y el Río Riofrío.

Se materializaron 8 puntos de control con precisión de 1 a 5 cm ajustados en red para controlar los estudios topo-batimétricos, la ubicación de estos puntos se definió principalmente con criterios topográficos para controlar las poligonales geoméricamente abiertas, cada tramo no mayor a 5 Km, con el fin de posibilitar su ajuste de errores tanto angulares como lineales.

En este municipio se materializaron tres placas para control de los estudios batimétricos y se fijaron cinco puntos materializados con tacos afianzados con mezcla. El procedimiento de construcción fue el de incrustación de placa de aluminio con vástago de acero, sobre concreto ya existente, buscando la estabilidad y perpetuidad de los puntos materializados.

Las placas utilizadas para la materialización y marcación consisten en una placa cilíndrica de aluminio, de calibre 75, marcada en forma radial con las siglas UNIVALLE OSSO-CVC, en la parte superior, debajo de la nomenclatura de la placa en forma recta y en la parte inferior por debajo del punto central, el año 2009. El punto central se marcó con un vástago de acero inoxidable en el centro, con perforación de aproximadamente 1mm de profundidad para el punto topográfico. Esta placa está incrustada en un anillo de PVC de 4 cm de altura que recibe en el interior la placa centrada entre los 4 cm de altura de la misma, con el fin de que el borde del anillo quede a ras con el suelo, mas no la placa que quedará incrustada por lo menos 1.5 cm por debajo, para dificultar su extracción.

El posicionamiento se desarrolló mediante procedimientos estáticos GPS diferencial, usando como principal punto de control el vértice MAGNA GPS D-V-18, que se consideró suficiente ante las longitudes de línea base tan cortas.

Levantamiento Topográfico

Los levantamientos topográficos complementarios que se realizaron en el municipio de Riofrío, correspondieron a la densificación de datos topográficos en zonas aledañas al río Riofrío, al río Cuancua y sobre las vías internas del casco urbano para mejorar la representación topográfica a través del modelo digital de elevación, insumo necesario para la modelación de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales.

Levantamiento de Secciones Transversales

Para los levantamientos de secciones batimétricas se construyeron poligonales con estación total a lo largo del cuerpo de agua, dejando puntos en cada abscisa marcada para construir la sección respectiva, siguiendo los criterios propuestos por el grupo de hidráulica, para localización y levantamiento de secciones. Estos puntos fueron nivelados a partir de procedimientos de nivelación geométrica.

Levantamientos Topográficos

Los levantamientos topográficos complementarios que se realizaron en el municipio de Riofrío, correspondieron a la densificación de datos topográficos en zonas aledañas al río Riofrío, al río Cuancua y sobre las vías internas del casco urbano para mejorar la representación topográfica a través del modelo digital de elevación, insumo necesario para la modelación de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales.

Puntos de Control Fotogramétrico

Los puntos de control fotogramétrico proporcionan una referencia de coordenadas del marco geográfico del área cubierta por las fotografías. La adecuada distribución de estos puntos sobre las fotografías permite que en el proceso de aerotriangulación establezcan relaciones fuertes en una red consistente de triángulos, arrojando como resultado modelos fotogramétricos correctamente ajustados y por ende la información que se extraiga de estos conserva alta precisión y mínima distorsión en toda el área útil de las fotografías.

En el municipio de Riofrío se seleccionaron 12 puntos de control que dan cobertura a la totalidad de la zona útil de restitución. Estos puntos se identificaron en el terreno y se

posicionaron por periodos acordes con la precisión del trabajo que oscilan entre 1 y 3 horas de observación (Figura 2).



Figura 2. Fotomosaico con la ubicación de los puntos de fotocontrol para el municipio de Riofrío.

4.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA

La información cartográfica recopilada y disponible en formato digital es la correspondiente al Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio y la suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. Esta

información contribuyó a la creación del mapa cartográfico base usado por los diferentes grupos temáticos del proyecto para el levantamiento de su información.

Los productos cartográficos desarrollados obedecen a las políticas y estándares establecidos tanto a nivel nacional por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, como por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.

La cartografía generada durante el tiempo de ejecución del estudio corresponde al uso del suelo urbano y cobertura de la zona de estudio, historicidad, procesos morfodinámicos, geológico, unidades superficiales, isoyetas mensuales multianuales, puntos de infiltración, muestreos geotécnicos, líneas geofísicas, levantamientos topográficos, modelo digital de elevación y límites de manzanas, esta se constituye en la principal fuente de resultados en los diferentes estudios realizados en el proyecto. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los mapas y procesos correspondientes al trabajo de SIG y cartografía.

Mapa Básico

El mapa básico de la zona urbana y de expansión del municipio de Riofrío se presenta en escala de impresión 1:2500, y se realizó a partir de la información cartográfica a escala 1:2000, producto de restitución fotogramétrica de las fotografías aéreas disponibles y más recientes adquiridas en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:10740 correspondientes a las 236, 237 y 238 de la línea de vuelo C-2732 F-1 del año 2004, escaneadas a una resolución de 15 micrones. La restitución se realizó en modo 3D utilizando herramientas CAD y software de fotogrametría, los archivos de salida son Archivos DGN y/o DXF.

Mapa Geológico Integrado

El mapa geológico incluye las unidades geológicas y estructurales identificadas por el grupo de geología, la representación geométrica de ésta temática se realizó a partir de la digitalización de la cartografía realizada por el grupo, producto del trabajo de campo y fotointerpretación de fotografías aéreas disponibles de los años 1998, 2007 y 2004 y el

modelo digital de elevación de 30 metros de resolución, este mapa es realizado en el sistema de referencia Magna sobre la base cartográfica a escala 1:2000 e impreso a escala 1:4000.

Mapa de Unidades Superficiales

Con base en el mapa geológico se definieron las unidades geológicas superficiales dentro de las cuales se identifican suelo residual, suelos aluviales recientes y suelos antrópicos. Este mapa es realizado en el sistema de referencia Magna sobre la base cartográfica a escala 1:2000 e impreso a escala 1:4000.

Mapa Geomorfológico y Morfodinámico

Partiendo de la compilación realizada por el grupo de geología de la información de interés, este grupo realizó la fotointerpretación de los procesos morfodinámicos y su verificación con trabajo de campo realizando la cartografía de ésta temática, integrando estos procesos a las unidades geomorfológicas identificadas.

Este mapa es realizado en el sistema de referencia Magna sobre la base cartográfica a escala 1:2000 e impreso a escala 1:2500.

Mapa de Cobertura y Uso de Suelo Urbano

Este mapa es el producto del trabajo de campo del grupo de Hidrología, el cual tomó como base el mapa de uso de suelo urbano del EOT, actualizando los usos dentro del perímetro urbano y de la zona de expansión sobre cartografía base a escala 1:10000.

Para la definición de cobertura de suelo de las zonas adyacentes a la zona urbana y de expansión, se realizó una identificación previa sobre la ortofoto, digitalizando los polígonos correspondientes a diferentes coberturas, las cuales fueron corroboradas y actualizadas en campo por el grupo de hidrología, con lo cual se creó esta capa de información y se integró a la de uso de suelo urbano. Este mapa es realizado en el sistema de referencia MAGNA sobre la base cartográfica a escala 1:2000, y está impreso a escala 1:2500.

Mapa de Isoyetas Mensuales Multianuales y Mapa de Precipitaciones Máximas con periodos de 24, 48 y 72 horas

Para la generación de esta temática, el grupo de Hidrología recopiló la información necesaria de las estaciones, las cuales se encontraban en coordenadas geográficas, y fue necesario hacer la conversión a coordenadas planas, tomando como Dátum de coordenadas geográficas el de Bogotá y origen de proyección el Oeste.

Con la información compilada, el grupo de hidrología generó las isoyetas mensuales, anual e isolíneas con valores de precipitación máxima de periodos de 24, 48 y 72 horas cada uno con tasas de retorno de 10, 30 y 100 años en el sistema de referencia con dátum Bogotá, por tanto se procedió a realizar la conversión a coordenadas geográficas y la transformación a dátum Magna para la conversión a coordenadas planas Gauss Kruger con origen de proyección oeste. Esta información fue generada como geometría de tipo línea y fue necesario generar entidades con geometría de tipo polígono para representar regiones con promedio de precipitación entre isolíneas.

Las isolíneas de precipitación máxima cubren parte de los municipios de Yotoco, Buga, San Pedro, Tuluá, Riofrío, Andalucía, Trujillo y Bugalagrande, de la cual se extrajeron las isolíneas correspondientes al área de estudio del municipio de Riofrío. Los mapas de isoyetas mensuales y anual se realizaron sobre la base cartográfica de la CVC a escala 1:25000 a nivel de la cuenca de Riofrío, previamente migrada al dátum Magna, e impresos a escala 1:175000. Los mapas de precipitaciones máximas de 24, 48 y 72 horas se presentan con las tasas de retorno de 10, 30 y 100 años en tamaño 42x50 cm a escala 1:12500, en el sistema de referencia Magna.

Mapa de Eventos Históricos

Este mapa contiene los sitios identificados por el grupo de historicidad, donde se tiene registro de ocurrencia de algún evento de inundación. Este mapa se realizó sobre la base cartográfica a escala 1:2000 e impreso a escala 1:16000 en tamaño carta.

Ortofotomapa

En el procesamiento de las fotografías aéreas adquiridas en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se realizó el proceso de ortocorrección para eliminar los errores propios de la geometría de las imágenes, generando una ortofotografía en la cual se integró la información generada correspondiente a vías, red hídrica, manzanas y toponimia conformando de esta manera el ortofotomapa.

Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación (MDE) es producto de la integración de las curvas de nivel generadas en el proceso de restitución fotogramétrica, los levantamientos topográficos realizados en el Municipio y las curvas de nivel de las planchas 1:10000 de CVC, con resolución de 5 metros; éste MDE es utilizado como insumo para el grupo de geotecnia e hidráulica para los respectivos análisis en la determinación de la amenaza por fenómenos de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.

Localización General de Secciones Transversales

La localización de las secciones transversales levantadas en los cuerpos de agua estudiados, se presenta como sigue: Mapa de Localización de secciones transversales del río Riofrío, localización de secciones transversales del río Cuancua, Acequia La Liga y Quebrada La Barra.

4.4 GEOLOGÍA

El objetivo del trabajo geológico desarrollado fue cartografiar a escala 1:7.500 las unidades litoestratigráficas, estructuras geológicas, suelos, formaciones superficiales y rasgos morfodinámicos de la zona, con énfasis en los movimientos de remoción en masa que afectan y han afectado el municipio y las zonas afectadas por inundación a causa del desbordamiento del río Riofrío.

Metodológicamente, se desarrollaron actividades relacionadas con la consulta y evaluación de información geológica existente, tanto en informes como en mapas realizados por diferentes entidades: INGEOMINAS, CVC, POT, empresas particulares y centros académicos, compilación y resumen de la información más relevante. Interpretación de las fotografías aéreas Nos. FAL 407 – F33 – 425, 426 a escala 1:32.000; FAL 461 – F35 – 025, 026 a escala 1:26.300 e IGAC 2732 del IGAC.

Mediante el trabajo de campo se verificó la información geológica existente en los documentos consultados y la fotointerpretación preliminar realizada, con el fin de llevar a cabo la cartografía relacionada con la Geología, Formaciones Superficiales y Rasgos Morfodinámicos. Los datos de campo se compilaron en mapas a escala 1:7.500.

Mediante líneas de refracción sísmica, se investigaron las laderas con sitios especiales de estabilidades críticas o con acumulación de movimientos en masa antiguos, tal como se describen en el capítulo relacionado con la Geofísica.

4.5 GEOFÍSICA

Se realizó una exploración con métodos indirectos sobre el terreno (ensayos de refracción sísmica), con el objeto de determinar la continuidad litoestratigráfica del sector, los principales objetivos fueron: Explorar el subsuelo para definir los diferentes horizontes de velocidad de los materiales existentes en el sector, determinar los espesores de dichos horizontes. Con los valores de velocidad, definir la consistencia de dichos materiales, establecer los sectores donde se realizara la (Geotecnia) exploración directa del subsuelo y definir la profundidad de perforación para la toma de muestras a ser analizadas en laboratorio. Los resultados obtenidos permiten establecer los horizontes de velocidad y las características específicas de los suelos entre otros aspectos.

Interpretación geofísica

Se ejecuto mediante la interpretación de cada una de las dromocrónicas de los ensayos de refracción sísmica afinada en un programa de computación, se realizaron 8 líneas de refracción sísmica distribuidas en la ladera contigua al plan de vivienda FUNDEVIR, que es el sector donde se están presentando inestabilidad de la ladera, en este resumen presentamos las tres primeras líneas (L1, L2, y L3). Las demás pueden ser estudiadas en el informe correspondiente.

Para la interpretación de los sismogramas se utilizó el programa SEISVIEW, la profundidad de exploración alcanza los 15.00 metros.

Línea sísmica L1

Se corrió cerca a la quebrada La Barra, en dirección NW-SE y una longitud de 38 metros, para una profundidad de exploración cercana a los 15.00 metros. La interpretación de la dromocrónica permite plantear la siguiente solución.

| Profundidad (m.) | Velocidad (m/s) | Correlación Litológica |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 0.00 – 1.00 | 290 | Suelo residual. |
| > 1.00 | 645 | Roca meteorizada. |

En el resultado de la prueba se establecieron dos horizontes de velocidad; el primero alcanza una profundidad de 1.00 metro y velocidad de 290 metros/segundo, correlacionable con suelos residuales de consistencia blanda. El segundo horizonte corresponde a la roca meteorizada perteneciente al Complejo Ultramáfico de Bolívar, presenta velocidades de 645 metros/segundo.

Línea Sísmica L-2

Se corrió paralela a la línea de refracción sísmica L-1, cerca al plan de vivienda FUNDEVIR, en dirección NW-SE y longitud de 38 metros. La interpretación de la dromocrónica permite plantear la siguiente solución.

| Profundidad (m.) | Velocidad (m/s) | Correlación Litológica |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 0.00 – 1.00 | 206 | Suelo residual |
| > 1.00 | 608 | Roca meteorizada |

El Resultado de esta prueba define dos horizontes de velocidad; el primer horizonte alcanza una profundidad de 1.00 metro y velocidad de 206 metros/segundo, correlacionable con suelo residual de consistencia blanda. El segundo horizonte corresponde a la roca meteorizada perteneciente al Complejo Ultramáfico de Bolívar, con velocidad del orden de 608 metros/segundo.

Línea Sísmica L-3

Se corrió al norte del plan de vivienda FUNDEVIR, en dirección NW-SE y una longitud de 38 metros. La interpretación de la dromocrónica permite plantear la siguiente solución.

| Profundidad (m.) | Velocidad (m/s) | Correlación Litológica |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 0.00 – 1.30 | 206 | Suelo residual. |
| > 1.30 | 593 | Roca meteorizada. |

El resultado de esta prueba define dos horizontes de velocidad; el primero hasta una profundidad de 1.30 metros y velocidad del orden de 206 metros/segundo, correlacionable con el suelo residual. El segundo horizonte presenta velocidades de 593 metros/segundo, correlacionable con la roca meteorizada perteneciente al Complejo Ultramáfico de Bolívar

La refracción sísmica nos define tres horizontes de velocidad a saber:

PRIMER HORIZONTE, corresponde a suelos residuales de consistencia blanda, que alcanzan profundidades entre 1.00 a 1.60 metros con velocidades promedio de 680 a 980 pies/segundo.

SEGUNDO HORIZONTE, alcanza profundidades entre 5.50 a 8.50 metros y velocidades del orden de 429 a 468 metros/segundo, correlacionable con flujos de lodo provenientes desde las partes altas, los cuales se han depositado a media ladera.

TERCER HORIZONTE, corresponde a la roca meteorizada y a las rocas fracturadas pertenecientes al Complejo Ultramáfico de Bolívar con velocidades promedio de 560-786 y 1166-1429 metros/segundo respectivamente.

4.6 HIDROLOGÍA

El municipio de Riofrío se ve principalmente afectado por la Sub-cuencas Riofrío, Cuancua y la Acequia La Liga; las cuales fueron principal objeto de análisis. La subcuenca Riofrío nace en el sitio denominado Mirador, desemboca en la margen izquierda del río Cauca en la abscisa K 291 + 847 aguas abajo de Salvajina y tiene una longitud aproximada de 40 Km; posee una extensión de 385.28 Km² y un perímetro de 143,12km. El área de la cuenca hidrográfica presenta alturas extremas que varían desde los 920 hasta los 3550 m.s.n.m. en la divisoria de aguas. Los principales tributarios del Riofrío son los ríos Lindo, Blanco, Cuancua, Tesorito, Volcanes, Cáceres; a su vez, el afluente más importante del río Cáceres es el río Culebras que pasa por la población de Trujillo.

El objetivo del estudio de hidrología fue analizar el uso del suelo, el movimiento del agua en el suelo y la hidrología de la región, mediante pruebas de infiltración y el estudio de perfiles de suelo, para lo cual se realizó la recopilación de la información existente de la zona de estudio y de estaciones cercanas al Municipio a cargo de instituciones como la CVC, CENICANÑA, CENICAFÉ e IDEAM, además se realizaron salidas de campo.

Como resultado de las actividades anteriores se presenta, el análisis temporal y espacial de la precipitación y se determinaron las precipitaciones máximas, el régimen de humedad y generaron algunos mapas con las isoyetas mensuales multianuales para el municipio.

En el estudio se determinaron los mapas de inundaciones y avenidas torrenciales originadas por las crecientes de los ríos Riofrío, Cuancua y la acequia La Liga para periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, en los cuales se indican las profundidades de agua en las zonas afectadas. Posteriormente se generó la cartografía de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Riofrío.

4.7. HIDRÁULICA

La caracterización hidráulica y sedimentológica de los cauces que se estudiaron en el municipio de Riofrío es el primer paso para dar inicio a la etapa de modelación matemática, ya que el software de modelación hidráulica necesita como insumo para su operación la topografía, la batimetría y los caudales de entrada a la zona de estudio y los valores de rugosidad del cauce y planicies de inundación.

Con la información recopilada en CVC de informes técnicos y las investigaciones de campo realizadas en desarrollo del presente estudio, se logró reunir y calcular información valiosa en cuanto a las características del río Riofrío, como pendiente del cauce, geometría del canal, características sedimentológicas, rugosidad, caudales y niveles.

Con base en esta información, las observaciones directas en campo y la revisión bibliográfica acerca de las expresiones matemáticas que relacionan parámetros como caudal, profundidad, características sedimentológicas y pendiente para ríos de montaña se ha estimado la rugosidad del río Riofrío, cauce principal del municipio.

Información Disponible

Se realizaron visitas a la CVC, principalmente a la Subdirección de Recursos Hídricos y a la Biblioteca, para recopilar información relacionada con los eventos históricos de inundaciones y avalanchas presentadas en el municipio de Riofrío. Se revisaron los diferentes informes y documentos que contienen dicha información, en los cuales se

describe el comportamiento del río ante estos fenómenos, los niveles de agua alcanzados, los caudales registrados y las afectaciones al municipio. En estos documentos se encontró la siguiente información:

Antes del año 1957, al desbordarse el río Riofrío, el nivel de agua alcanzaba los patios de las casas, cuyas fachadas dan al costado suroccidental de la Calle 5.

Temiendo que se presentase una creciente de mayor magnitud, se realizó la construcción de un muro de concreto, cuyo extremo suroccidental se apoya en el estribo izquierdo del puente Alfonso Bonilla Aragón y se extiende en línea recta, en longitud aproximada de 500 m en dirección sureste – noreste, hasta la Carrera 14 en cercanías a la Calle 5. Después de construido el muro, fue levantado el barrio El Castillo sobre relleno de tierra con frente al citado muro. Este muro nunca ha sido rebasado por el río Riofrío; sin embargo, el 26 de abril de 2006 se presentó una creciente en la que se temió el desbordamiento y posterior inundación de la parte baja de la ciudad, la cual por fortuna no ocurrió. No obstante, durante el evento hubo afloramiento de aguas del lado seco del muro, lo que alertaba sobre un posible colapso con una creciente similar.

En mayo de 1971 se presentaron inundaciones en el municipio ocasionadas por aguas que corrían a través de los potreros de la hacienda La Liga, ubicada entre el lindero occidental del municipio y el río Cuancua y entre el pie de monte de la loma y el río Riofrío.

De manera similar, el 4 de Junio de 2007, en horas de la tarde y debido a fuertes lluvias, las aguas precipitadas sobre las lomas del noreste corrieron torrencialmente hacia el municipio ocasionando inundaciones hasta de 40 cm en las que se vieron afectados los barrios Fundevir y Las Delicias (al pie de la lomas), Belén, San Jorge y La Paz (en la ciudad antigua).

El río Riofrío entre los años 2006 y 2007 presentó crecientes torrenciales con desbordamiento y afectación marginal, en las que se vieron afectados el barrio La Villa y la

entrega del río Lindo al río Riofrío en el corregimiento de Salónica, y en ocasiones el caudal de excesos llegó a transitar sobre el tablero del puente que es la única vía de acceso al corregimiento y las veredas ubicadas en la parte alta del municipio de Riofrío. En esta misma época, también se vieron afectadas estructuras y viviendas de los barrios El Lago y El Castillo, en el municipio de Riofrío, posiblemente debido a que el municipio se encuentra localizado en la llanura de inundación del río y falta la construcción de obras de protección a erosión marginal y control de desbordamiento.

Adicionalmente, la zona baja del río Riofrío recibe todos los canales de drenaje de la parte alta de la cuenca, lo que ocasiona que durante temporadas invernales los caudales de creciente del río Riofrío en esta parte del municipio son la suma de todos los caudales tributarios incrementados por la precipitación presentada en toda la cuenca. De esta forma se afecta de manera directa la población asentada en el casco urbano del municipio de Riofrío y en consecuencia, se han presentado pérdidas económicas y se ha puesto en riesgo la vida de los habitantes de los barrios El Lago y El Castillo.

Las inundaciones y avenidas torrenciales presentadas en los meses de abril y mayo de 2006, donde se vieron seriamente afectados los barrios El Lago y El Castillo, sirvieron de base para formular el proyecto de emergencia invernal y obtener recursos para realizar el diseño de las obras necesarias con el fin de atender la problemática presentada en los diferentes municipios del Valle del Cauca.

Cauces a modelar y monitorear en el estudio

Entre la información que se logró recopilar, se encuentran los siguientes datos importantes suministrados por el personal de la CVC y de Planeación Municipal, y que sirvió para la identificación de los cauces y corrientes de agua monitoreados durante el estudio.

El principal cauce que atraviesa el municipio de Riofrío es el río Riofrío, el cual presenta problemas de desbordamiento en toda su longitud (especialmente sobre la margen izquierda), afectando los barrios aledaños como El Lago y El Castillo.

Otro río de vital importancia para la cabecera municipal del municipio de Riofrío es el río Cuancua, que desemboca en el río Riofrío, y que abastece de agua al casco urbano. Se han registrado desbordamientos en la parte alta de este río, en el Balneario Cuancua, donde se derrumbó un puente. Al parecer, este río también afecta la zona urbana, especialmente los barrios El Lago y El Castillo.

También existen en el municipio varias acequias que son utilizadas para riego. Sin embargo, la acequia La Liga o El Retiro es una de las corrientes más críticas ya que cuando se desborda ocasiona grandes daños en la zona urbana, sobre todo en la zona norte, afectando los barrios El Belén, San Jorge, Las Delicias y Ciudadela Portales de Riofrío Etapa I, entre otros. La acequia La Liga toma sus aguas del río Cuancua, algunos metros aguas arriba de la confluencia de éste con el río Riofrío, pasando por la zona norte y occidental del municipio. Aunque esta acequia es utilizada para riego, se ha convertido en un canal colector de las aguas de escorrentía que vienen de la zona montañosa, y al excederse su capacidad, se desborda.

Los caudales correspondientes a las crecientes analizadas se calcularon a través de la modelación hidrológica a partir del análisis de los registros de las precipitaciones en las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del río Riofrío, considerando lluvias críticas de 18 horas de duración. Para la generación de los mapas de inundaciones y avenidas torrenciales se construyó e implementó un modelo matemático bidimensional (FLO-2D) mediante el cual se simulaban diferentes crecientes correspondientes a periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

Entre los principales resultados obtenidos durante los estudios y actividades ejecutados por el grupo de hidráulica se destacan la caracterización sedimentológica e hidráulica, determinación de caudales, análisis de rugosidad y metodología para la determinación de amenazas por inundación y crecientes torrenciales.

4.8. GEOTECNIA

Exploración del subsuelo

Con el propósito de identificar y caracterizar tanto espacialmente como en profundidad las propiedades geomecánicas del material aflorante y obtener los perfiles estratigráficos y la profundidad del material inestable, se realizó el plan de exploración del subsuelo correspondiente a diez apiques a una profundidad máxima de 2.0 metros. Adicional a lo anterior, como apoyo al Grupo de Hidráulica del presente estudio se realizaron muestreos en diferentes puntos sobre el lecho del río Riofrío con el fin de definir la distribución de los diferentes tamaños de las partículas del suelo; la ubicación de éstos estuvo ligada a los requerimientos del grupo de estudio.

Con el fin de caracterizar geomecánicamente la zona de estudio, la exploración se realizó por sectores que abarcan la totalidad de la misma, teniendo como base el mapa de unidades geológicas superficiales realizado durante el presente estudio. Los apiques realizados se localizaron de tal forma que los resultados fueran representativos del comportamiento del subsuelo.

Los diferentes materiales encontrados tanto en los apiques como en las perforaciones serán sometidos a un riguroso plan de ensayos de laboratorio, con el fin de caracterizar las propiedades geomecánicas de los materiales aflorantes en la zona de estudio.

Ensayos de Laboratorio

Con el fin de caracterizar las propiedades índices y geomecánicas del material aflorante en la zona de estudio, se realizaron ensayos de clasificación y resistencia sobre las muestras recuperadas durante la fase exploratoria.

5. AMENAZAS POR REMOCIÓN EN MASA

El análisis de este evento no fue incluido por la CVC dentro de los compromisos contractuales del proyecto. Sin embargo, la Universidad del Valle encontró evidencias de la posibilidad de ocurrencia de este fenómeno en algunas áreas del municipio de Riofrío, por esta razón realizó el estudio completo y detallado, lo cual es un aporte adicional y un valor agregado para la zonificación de las amenazas del municipio.

Con el propósito de caracterizar las propiedades índices y geomecánicas del material aflorante en la zona de estudio, se realizaron ensayos de clasificación y resistencia sobre las muestras recuperadas durante la fase de exploración.

Evaluación de Susceptibilidad por Movimientos en Masa

Para evaluar la susceptibilidad del terreno, en el desarrollo de este proyecto se utilizó el método estadístico bivariado, incluido en los métodos cuantitativos de evaluación de susceptibilidad. El procesamiento de la información base y los resultados fueron integrados por medio de herramientas SIG, usando el formato *raster* que implica la división de la zona en unidades de tamaño regular, normalmente cuadradas, donde en cada celda se asigna un valor para un factor determinado.

Método Bivariado

El análisis estadístico bivariado se basa en el modelo de pesos de las variables y aplica la teoría de probabilidad Bayesiana, de modo que se puede evaluar la importancia de cada factor que influye en los movimientos independientemente. Para aplicar el método, es necesario conocer datos históricos de movimientos en masa, dado que se asume que los movimientos futuros ocurrirán bajo factores o condiciones similares a la de los movimientos pasados; también se asume que los factores que causan los movimientos permanecen casi constantes en el tiempo.

Definición de Variables

En la investigación de la influencia de los parámetros físicos en los movimientos en masa, se analiza la correlación entre los movimientos y las variables que los representan. En este estudio las variables utilizadas son: pendiente, curvatura, orientación de la ladera, uso del suelo y geología.

Dentro de este grupo de variables, las correspondientes con características geométricas del relieve, son derivadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables temáticas como uso del suelo, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otras componentes del proyecto.

Zonificación de la Susceptibilidad

Como se explicó anteriormente, la evaluación de la susceptibilidad se realizó por medio del análisis bivariado, lo que implica, tomar cada una de las variables categorizadas y cruzarlas con la variable movimiento, para obtener un resultado intermedio del análisis de pesos Wf de cada variable. Una vez obtenidos todos los factores Wf , se suman las variables para obtener el índice LSI según la siguiente expresión:

$$LSI = WfPendiente + WfCurvatura + WfOrientación + WfUsos + WfAcuena$$

La clasificación de los Índices en categorías de susceptibilidad, se basó en el método de *Divisiones Naturales* del programa SIG ArcGIS, el cuál identifica saltos o puntos de quiebre en secuencias de valores similares y maximiza las diferencias entre clases. El método induce cierta homogeneidad en las categorías. Una vez calculados los pesos para cada una de las variables, se realiza la suma algebraica de las mismas para obtener el mapa Índice de Susceptibilidad, de donde se desprenden las siguientes características:

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD ALTA:** Zonas con condiciones altamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad asociados principalmente con las características litológicas del material aflorante en la zona, fuertes pendientes que caracterizan la zona norte del municipio.

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes topográficas bajas a muy bajas. Se encuentran ubicada hacia las zonas de piedemonte, correspondiendo básicamente a la transición entre la zona montañosa y la zona plana.

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Estas zonas son susceptibles a procesos de inundación y avalanchas torrenciales y los resultados de estos fenómenos se presentan en el capítulo de hidráulica.

Evaluación de la Amenaza

La zonificación de amenazas de un territorio es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo técnico para el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación, infraestructura, conservación entre otros. Además permite restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que se eviten futuros riesgos.

Para la evaluación de la amenaza se tuvo en cuenta el mapa de susceptibilidad previamente obtenido, a dicho mapa se le incorporan los agentes externos sismo y lluvia, para de esta manera obtener el respectivo mapa de amenaza. Dentro de este mapa se tienen en cuenta aspectos tales como: inclinación del terreno, parámetros de resistencia, pruebas de infiltración y sismicidad de la zona.

Modelo Geológico – Geotécnico

El modelo geológico-geotécnico se define como aquel que involucra aspectos geológicos y geotécnicos, que permite un adecuado modelamiento numérico de la zona que se pretende estudiar. Las anteriores variables son necesarias para la obtención de perfiles geotécnicos

que fueron utilizados en los análisis de equilibrio límite. En este orden de ideas se definieron once perfiles geotécnicos, los cuales se basaron en los registros de perforaciones realizados en la zona de estudio.

Zonificación de Amenazas por Escenarios

Para el análisis determinístico en función del factor de seguridad, se considerarán diferentes escenarios de acuerdo con la profundidad del nivel freático y la aceleración del terreno.

Teniendo presente el efecto adverso de los agentes detonantes lluvia y sismo, se generaron tres escenarios, en los que se tiene en cuenta de manera independiente el efecto del agua, el sismo y finalmente el efecto combinado de los anteriores agentes externos (**Tabla 1**).

Tabla 1. Escenario de amenaza.

| ESCENARIO | CONDICION | SISMO | Aa |
|------------------|-----------------------|--------------|-----------|
| 1 | Parcialmente saturado | Sin sismo | |
| 2 | Seca | Con sismo | 0.20 |
| 3 | Parcialmente saturado | Con sismo | 0.20 |

Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo

Esta condición se puede presentar durante lluvias fuertes y prolongadas, que ocasionen un rápido ascenso del nivel freático, así como la saturación del terreno. Teniendo en cuenta que el municipio cuenta con una buena cobertura del suelo, para esta condición la amenaza es casi en su totalidad baja con una pequeña zona hacia la parte alta del alto de la virgen en amenaza media.

Esta condición implica la generación de un sismo en verano, en la que el régimen de lluvias es mínimo, y el nivel freático se encuentra abatido. Las zonas afectadas se encuentran fuera del perímetro urbano y de la zona de expansión, lo cual no pone en riesgo al municipio por fenómenos de remoción en masa, sin embargo es importante destacar que se pueden presentar movimientos en masa hacia la parte norte sobre la carretera que de Riofrío conduce a Trujillo.

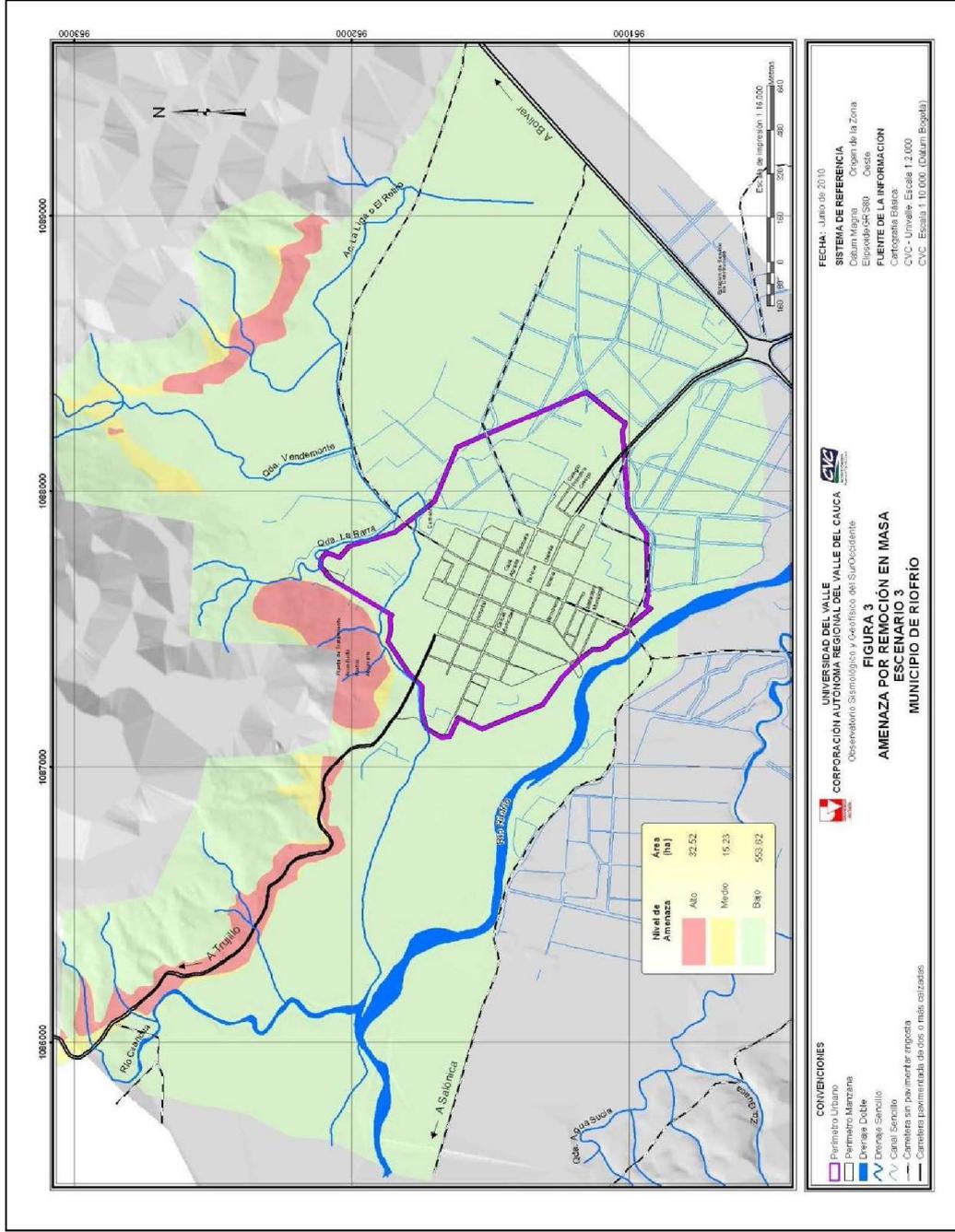
Corresponde a la condición más crítica. Este escenario es el que se asume que se presente un sismo durante un periodo de lluvias fuertes y prolongadas. Al igual que para el escenario 2, las áreas afectadas, corresponden a la zona alta al norte del municipio y los porcentajes de amenaza son muy similares.

Teniendo en cuenta los resultados de los anteriores escenarios se definieron tres niveles de amenaza: baja, media y alta.

AMENAZA BAJA: Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por fenómenos de remoción en masa ante agentes externos. En el municipio de Riofrío corresponde a la gran parte del área de estudio, ubicada en la zona plana y en donde en la actualidad existen diferentes cultivos y asentamientos. Cubre en su totalidad el casco urbano y la zona de expansión.

AMENAZA MEDIA: Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y buena cobertura vegetal, ubicadas en las zonas próximas a sectores de amenaza alta por remoción en masa.

AMENAZA ALTA: Corresponden a sectores de pendientes medias a fuertes, estas zonas se caracterizan por la falla del talud, por efecto de algunos de los agentes externos previamente descritos o por la combinación de ellos. Se presenta en la zona montañosa del municipio, alejado del casco urbano y la zona de expansión. Se recomienda restringir el uso del suelo en estos sectores. De igual manera prohibir el sobrepastoreo generado por la ganadería intensiva. Con el fin de evitar que hacia el futuro el municipio se vea afectado por eventuales problemas de inestabilidad, se recomienda adoptar dentro del POT, estas áreas como zonas de protección.



6. AMENAZAS POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Las inundaciones y las avenidas torrenciales son dos de los fenómenos naturales que mayores estragos y daños causan a nivel mundial. Si se tiene en cuenta la distribución geográfica de las distintas amenazas naturales, las inundaciones y las avenidas torrenciales son, sin duda, los más generalizados, pues afectan a todos los países del mundo.

En Colombia, las inundaciones originadas por los desbordamientos de los ríos son altamente frecuentes a lo largo y ancho del territorio nacional. Casi todas las regiones del país son vulnerables a las inundaciones, que pueden presentarse en los ríos principales, y también a veces la población resulta afectada por el desborde de quebradas y ríos pequeños.

Las avenidas torrenciales o flujos de lodos son fenómenos que ocurren en los ríos o quebradas por efecto inicial de un deslizamiento. Se caracterizan generalmente por ser homogéneos o monofásicos. Es un movimiento en masa que se puede originar por diferentes causas (sismos, lluvias, erupción volcánica, deslizamientos, etc.) y que se desplaza ladera abajo por efecto de las fuerzas gravitacionales.

Las comunidades asentadas en zonas aledañas a las regiones montañosas pueden estar en riesgo a causa de las avenidas torrenciales, pues éstas son muchas veces responsables de pérdidas de vidas y daños a la infraestructura. Caracterizadas por una alta velocidad del flujo y grandes fuerzas de impacto, las avenidas torrenciales tienen un potencial erosivo y destructor mucho mayor que el de las inundaciones. En combinación con la poca predictibilidad temporal, las avenidas torrenciales representan una amenaza para asentamientos humanos, zonas agrícolas y ganaderas y vías, entre otros tipos de infraestructura localizados sobre el abanico aluvial, es decir, en la parte plana donde todos los escombros y materiales transportados son depositados.

Por ello es importante que las áreas amenazadas por estos fenómenos sean identificadas con el fin de estimar la vulnerabilidad de los elementos expuestos y determinar los escenarios de riesgo. Éstos permitirán plantear y analizar diferentes alternativas con el propósito de

prevenir, mitigar o controlar la amenaza por este tipo de fenómenos y definir posteriormente el uso adecuado de dichas áreas. En muchos casos, esto puede verse reflejado tanto en proyectos de reubicación como modificaciones de los planes de ordenamiento territorial en cuanto a las futuras áreas de expansión de los municipios. Para cumplir con esta tarea se debe desarrollar una metodología para delimitar las zonas vulnerables a este tipo de amenazas.

El municipio de Riofrío ha tenido problemas por inundaciones y avenidas torrenciales, debido al desbordamiento de los ríos Riofrío y Cuancua y de algunas quebradas y acequias durante periodos de invierno intenso. En el presente estudio se determinó el nivel de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales en el perímetro urbano del municipio de Riofrío en el departamento del Valle del Cauca, mediante el modelo matemático bidimensional FLO-2D. Para ello se aplicó una metodología para la determinación de los mapas de amenaza, de acuerdo con los niveles de amenaza definidos.

Cauces en la Zona de Estudio

La información recopilada y consultada permitió identificar los diferentes cauces que transitan por el casco urbano del municipio de Riofrío. Entre las corrientes que históricamente han generado problemas por inundaciones y avenidas torrenciales se destacan los ríos Riofrío y Cuancua y la acequia La Liga. Los ríos Cuancua y Riofrío son cauces de montaña, los cuales presentan diferencias importantes con respecto a los ríos aluviales o de llanura debido a las distintas condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, hidráulicas, sedimentológicas y geomorfológicas. Los ríos de montaña se caracterizan por la alta pendiente de su cauce, sedimentos de mayor tamaño (gravas, guijarros, cantos y bolos) que causan una mayor resistencia al flujo, flujos altamente turbulentos con velocidades relativamente altas y profundidades pequeñas; además, presentan una morfología variable espacialmente y reducida temporalmente excepto cuando son intervenidos (extracción intensiva de materiales del lecho, por ejemplo) y al producirse eventos extremos.

Caracterización Hidrológica

Para efectuar la modelación de los diferentes eventos catastróficos de inundaciones y avenidas torrenciales en el municipio de Riofrío fue necesario determinar las condiciones hidrológicas en las fronteras establecidas en el modelo matemático. En las fronteras superiores de los tramos a modelar de los ríos Riofrío y Cuancua se estimaron, mediante modelación matemática (modelo hidrológico HEC-HMS), los caudales para los diferentes periodos de retorno definidos en la metodología para la determinación de la amenaza para los dos fenómenos (10, 30 y 100 años). En la acequia La Liga se adoptó un caudal máximo de $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

También se determinó la información de la pluviosidad (intensidad y duración) en la zona de estudio para ser incluida en la simulación del fenómeno de inundaciones para los diferentes periodos de retorno especificados.

Caracterización Sedimentológica

Con el fin de caracterizar los materiales del lecho de los ríos Riofrío y Cuancua, principalmente en cuanto a la distribución de tamaños, se llevó a cabo un programa de mediciones de campo. Se tomaron muestras de materiales finos y gruesos, las cuales fueron procesadas y analizadas posteriormente en laboratorio y oficina. La información obtenida de las curvas granulométricas de los materiales del lecho permite estimar las rugosidades de los cauces, factor determinante durante el proceso de calibración del modelo matemático de los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales. La caracterización de los sedimentos finos de los lechos de los cauces permite determinar las propiedades reológicas del material que puede ser arrastrado por los cauces en una avenida torrencial.

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Pendiente promedio del río Riofrío

La pendiente media del río Riofrío es de 0.56% según el método de elevaciones extremas y 0.47% de acuerdo con el método de Taylor-Schwarz.

Según Jarrett (1990) los ríos que presentan una pendiente mayor del 0.2% en la mayoría de su trazado se clasifican como ríos de montaña. Para el caso del río Riofrío la pendiente media promedio es aproximadamente 0.52%, por lo que el río se clasifica como río de montaña.

Rugosidad del lecho

Estimar la resistencia al flujo es fundamental para analizar el comportamiento hidráulico de los ríos de montaña. La rugosidad del lecho representa la resistencia al flujo ejercida por las partículas que conforman el lecho y las bancas del canal y por las formas de fondo y demás irregularidades que actúan como obstáculos al flujo de agua.

Para estimar la rugosidad del lecho de los cauces del municipio de Riofrío en la zona de estudio, se aplicó la ecuación de Charlton (1978) en las secciones transversales en las cuales se realizó el análisis fotográfico superficial por malla para los niveles de banca llena en los ríos Riofrío y Cuancua. La rugosidad de Manning promedio, n , estimada para ambos cauces es de $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$.

En la acequia La Liga se asumió un valor constante de rugosidad de $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ ya que este cauce se encuentra canalizado en su recorrido por la zona de estudio del municipio de Riofrío.

Rugosidad de las llanuras

En la planicie de inundación de un río la presencia de vegetación y diferentes tipos de elementos y obstáculos (piedras, cercos, casas, infraestructura) producen resistencia al flujo cuando éste se desborda. La rugosidad estimada debe ser representativa de la vegetación y los diferentes elementos existentes en las llanuras de inundación ya que este factor es muy importante para obtener resultados confiables en la modelación matemática.

Para determinar los valores de la rugosidad de Manning en las planicies de inundación de la zona de estudio del municipio de Riofrío fue necesario aplicar algunos conceptos de

esfuerzos cortantes en las llanuras ejercidos por los obstáculos presentes (pastos, árboles, cañaduzales, guaduas y rastrojo).

Metodología

La metodología propuesta en el presente estudio para la determinación de los niveles de amenaza por los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías revisadas y en la experiencia del grupo de investigación HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberales, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados). También se consideraron los planes y esquemas de ordenamiento territorial y los planes de prevención y de atención de desastres, emergencias y contingencias de las inundaciones y avenidas torrenciales.

Los niveles de amenaza que se recomienda utilizar son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia del evento y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada mediante los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se presenta en las Tablas 2 y 3, para los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales, respectivamente.

Tabla 2. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación

| Magnitud de la avenida torrencial | NIVEL DE LA AMENAZA | | |
|--|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Frecuencia de la inundación | | |
| | Alta $Tr \leq 10$ | Media $10 < Tr \leq 30$ | Baja $30 < Tr \leq 100$ |
| Alta $H \geq 0.9 \text{ m}$ ó $V \geq 0.8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alto | Alto | Alto |
| Media $0.45 \text{ m} \leq H < 0.9 \text{ m}$ ó $0.5 \text{ m/s} \leq V < 0.8 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alto | Medio | Medio |
| Baja $0.05 \text{ m} < H < 0.45 \text{ m}$ y $V < 0.5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$ | Medio | Bajo | Bajo |

Tabla 3. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de avenidas torrenciales

| Magnitud de la avenida torrencial | NIVEL DE LA AMENAZA | | |
|---|--|----------------------------|----------------------------|
| | Frecuencia de la avenida torrencial | | |
| | Alta $Tr \leq 10$ | Media $10 < Tr \leq 30$ | Baja $30 < Tr \leq 100$ |
| Alta $H \geq 0.5 \text{ m}$ ó $V \geq 0.5 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alto | Alto | Alto |
| Media $0.25 \text{ m} \leq H < 0.5 \text{ m}$ ó $0.25 \text{ m/s} \leq V < 0.5 \text{ m/s}$ ó $0.1 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alto | Medio | Medio |
| Baja $0.05 \text{ m} < H < 0.25 \text{ m}$ y $V < 0.25 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ | Medio | Bajo | Bajo |

Modelación Matemática

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien, 1988) empleado en este estudio permite simular fluidos newtonianos y no-newtonianos (flujos hiperconcentrados con altas concentraciones de sedimentos) como avenidas torrenciales o flujos de lodos. El modelo es apto para trabajar en topografías complejas, tales como planicies de inundación, conos de deyección y áreas urbanizadas; adicionalmente permite el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación.

Una vez introducida la información esquematizada o discreta de toda el área a analizar en el modelo matemático FLO-2D se debe dar inicio al proceso de calibración y verificación del modelo con base en la información disponible de caudales, niveles, áreas inundables y registros históricos. Igualmente, se realiza el análisis de sensibilidad con el fin de investigar

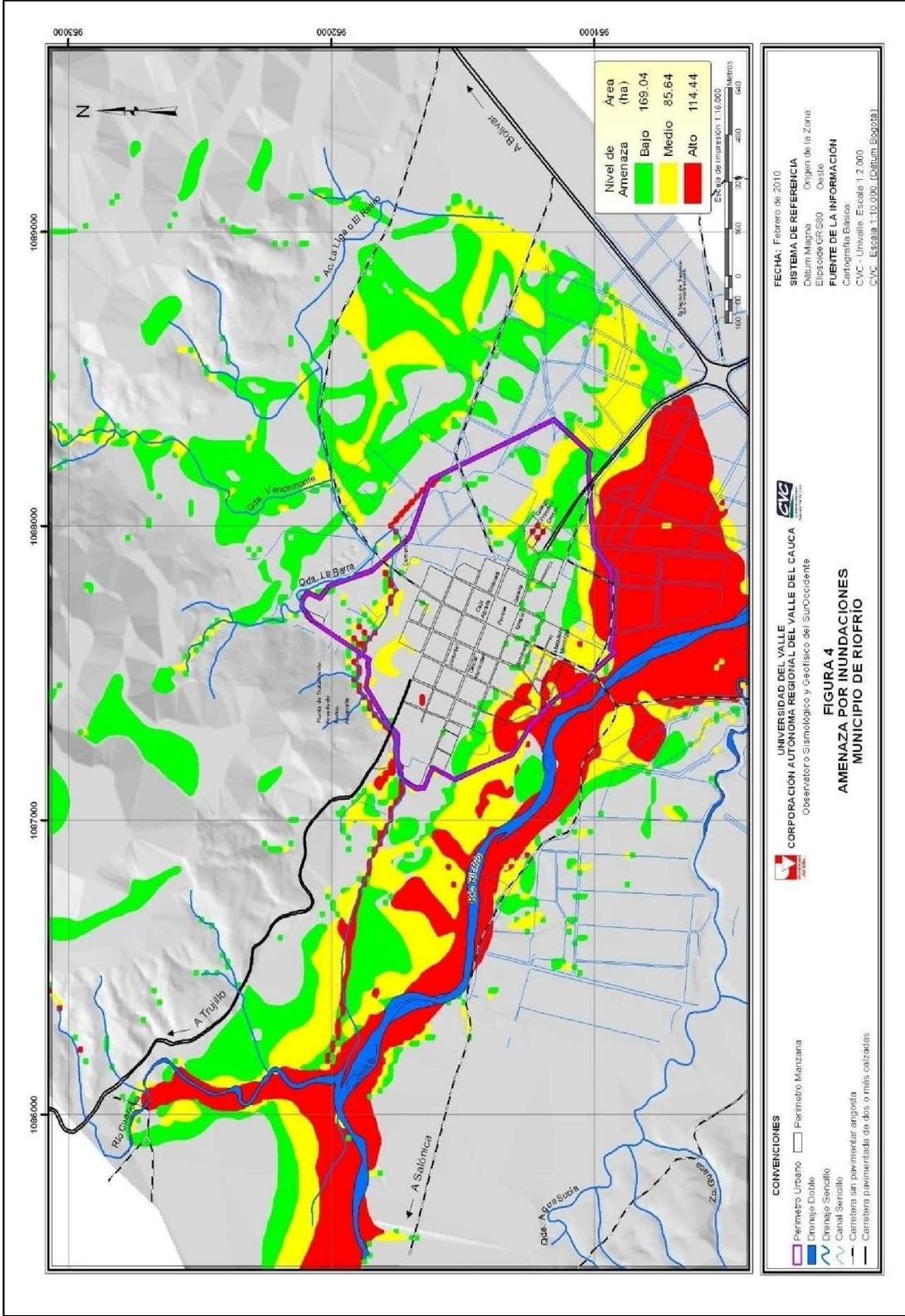
la influencia de los principales parámetros numéricos y físicos en el comportamiento hidrodinámico de los cauces y canales de la zona de estudio del municipio de Riofrío.

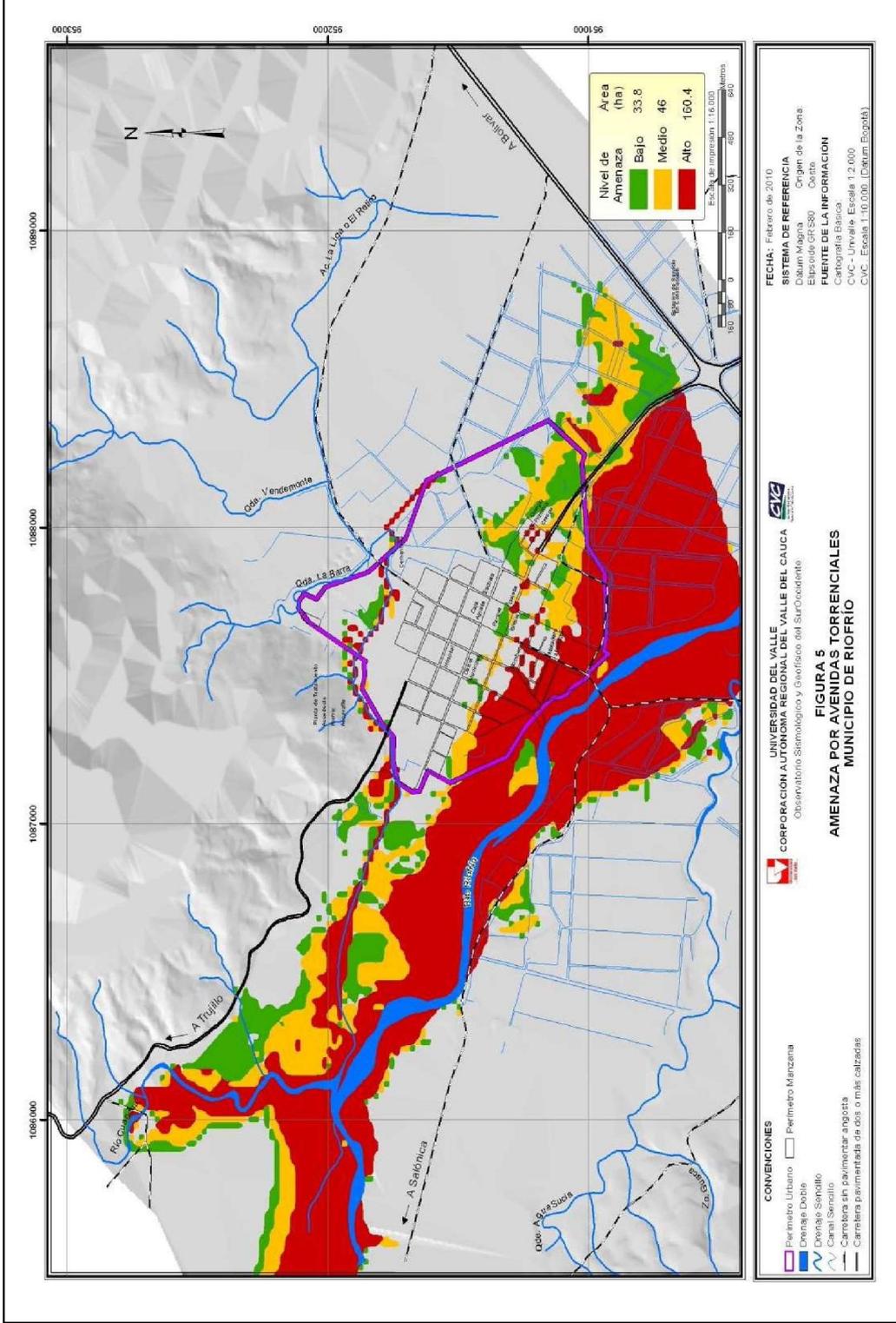
Posteriormente, y habiendo definido los valores de los diferentes parámetros mediante los procesos de análisis de sensibilidad y calibración, se procedió a realizar las simulaciones para la determinación de las áreas potencialmente inundables y los niveles de amenaza para los escenarios correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, para los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales.

RESULTADOS

Los mapas de inundaciones y avenidas torrenciales obtenidos para el periodo de retorno de 100 años se presentan en las Figuras 4 y 5, respectivamente. En estos mapas se presentan los tres niveles de intensidad (alta, media y baja) definidos en la metodología de amenaza establecida para la profundidad de inundación.

Una vez obtenidos los mapas de inundaciones y avenidas torrenciales para los eventos correspondientes a periodos de retorno de 10, 30 y 100 años se procedió a implementar la metodología de amenaza (niveles de intensidad vs. niveles de frecuencia) para determinar los mapas de amenaza por inundaciones y por avenidas torrenciales, permitiendo así establecer en cada escenario los niveles de amenaza (alta, media y baja).



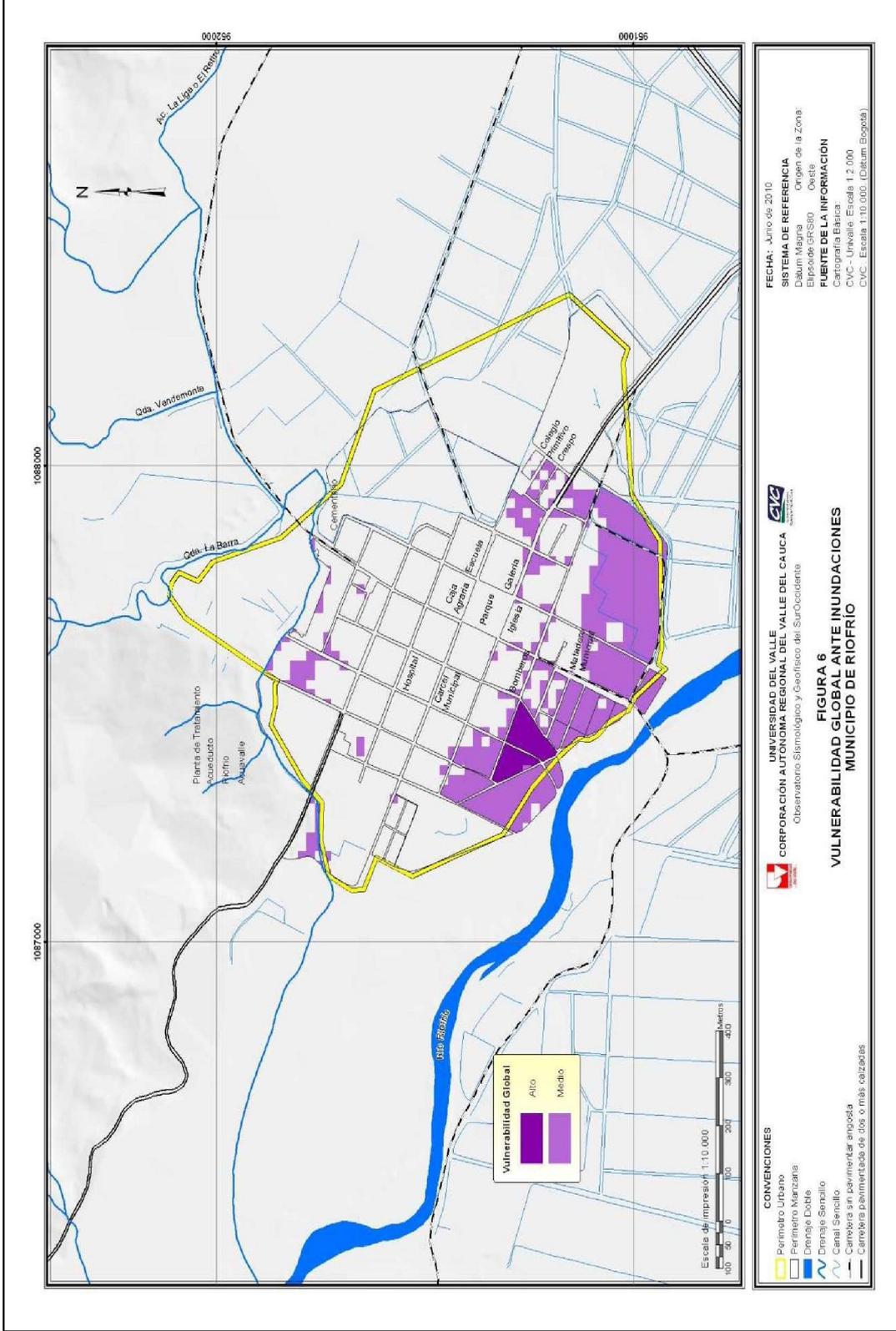


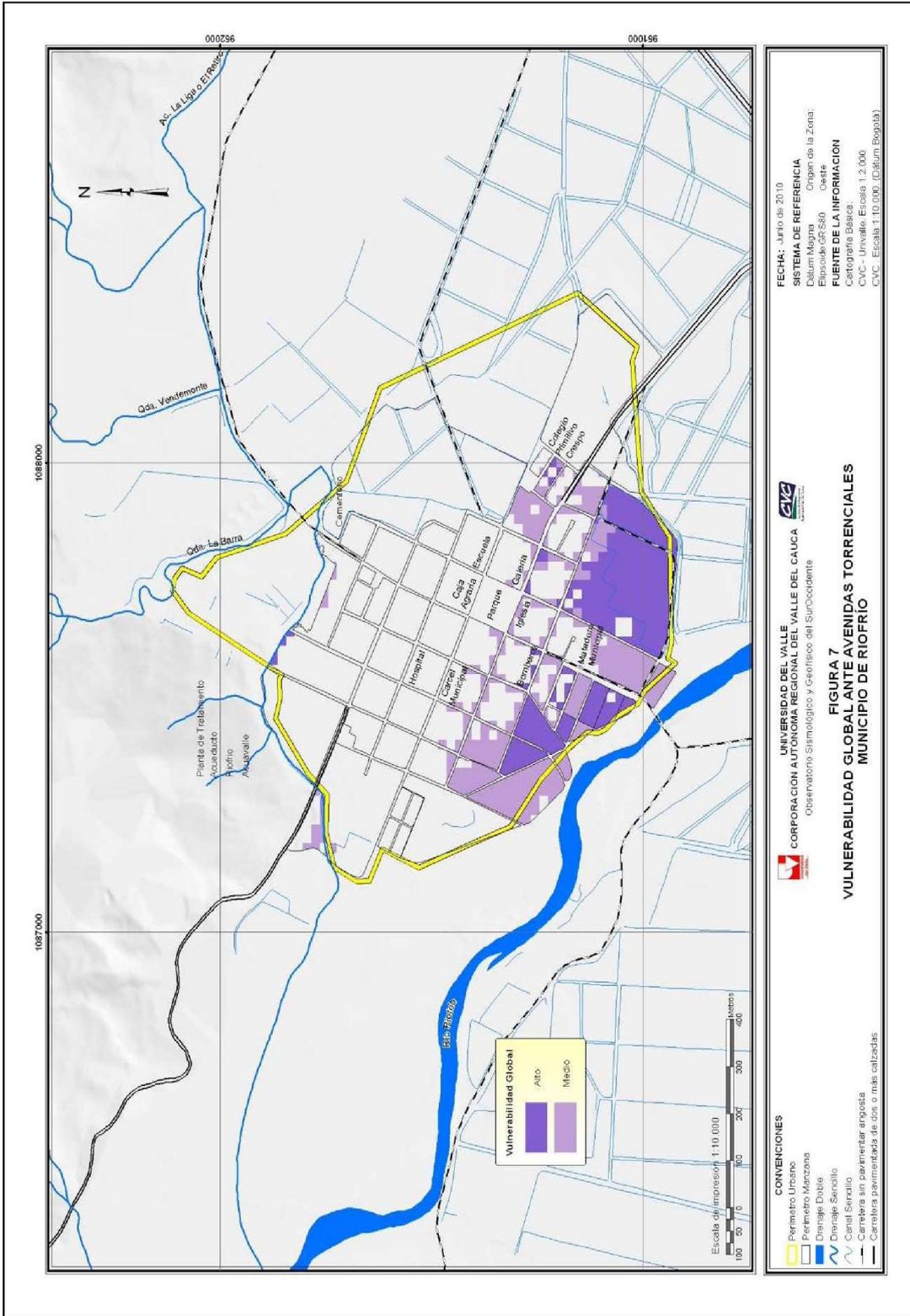
7. VULNERABILIDAD Y ESCENARIOS DE AFECTACIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad y los escenarios de afectación parte de un modelo conceptual y metodológico que involucra no solamente la medición de parámetros o indicadores estructurales (paredes, cubiertas estado de conservación, etc.), sino también algunos indicadores corporales (edad, sexo, dependencia total, etc.) los cuales permiten un acercamiento mucho más acertado y real a la situación de emergencia de una comunidad. En este sentido la vulnerabilidad se define como una suma de valores que expresan aspectos relacionados con la exposición y la fragilidad de un conjunto de elementos tanto estructurales como corporales. Mientras que el riesgo se define como el resultado del producto escalado del factor de amenaza y del factor de vulnerabilidad, ambos condicionantes y concomitantes entre sí.

A partir de esta base teórico-metodológica se logró identificar las principales zonas ó sectores de la cabecera municipal que presentan niveles relativos de vulnerabilidad y afectación global (estructural y corporal), estimando consecuentemente los diferentes modos de daños esperados, el número aproximado de viviendas afectadas y el número de personas damnificadas durante una situación de emergencia tanto de día como de noche.

A partir de la evaluación de la vulnerabilidad ante inundaciones y avenidas torrenciales, se logró identificar que las viviendas y las personas que habitan estos barrios, presentan unos niveles de exposición a la amenaza elevados y unas condiciones de fragilidad bastante delicadas. Las siguientes figuras representan la distribución espacial de la vulnerabilidad global para la cabecera municipal de Riofrío tanto ante inundaciones como ante avenidas torrenciales; en ellas podemos apreciar que el sector sur del casco urbano encierra niveles de vulnerabilidad media ante inundaciones con una presencia relevante de vulnerabilidad alta en el barrio El Lago, mientras que para la vulnerabilidad ante avenidas torrenciales, la situación se agrava un poco más en la medida en que nuevos sectores aparecen con niveles altos, es el caso del barrio El Castillo y algunos lados de manzana en el barrio El Centro. (Figuras 6 y 7).





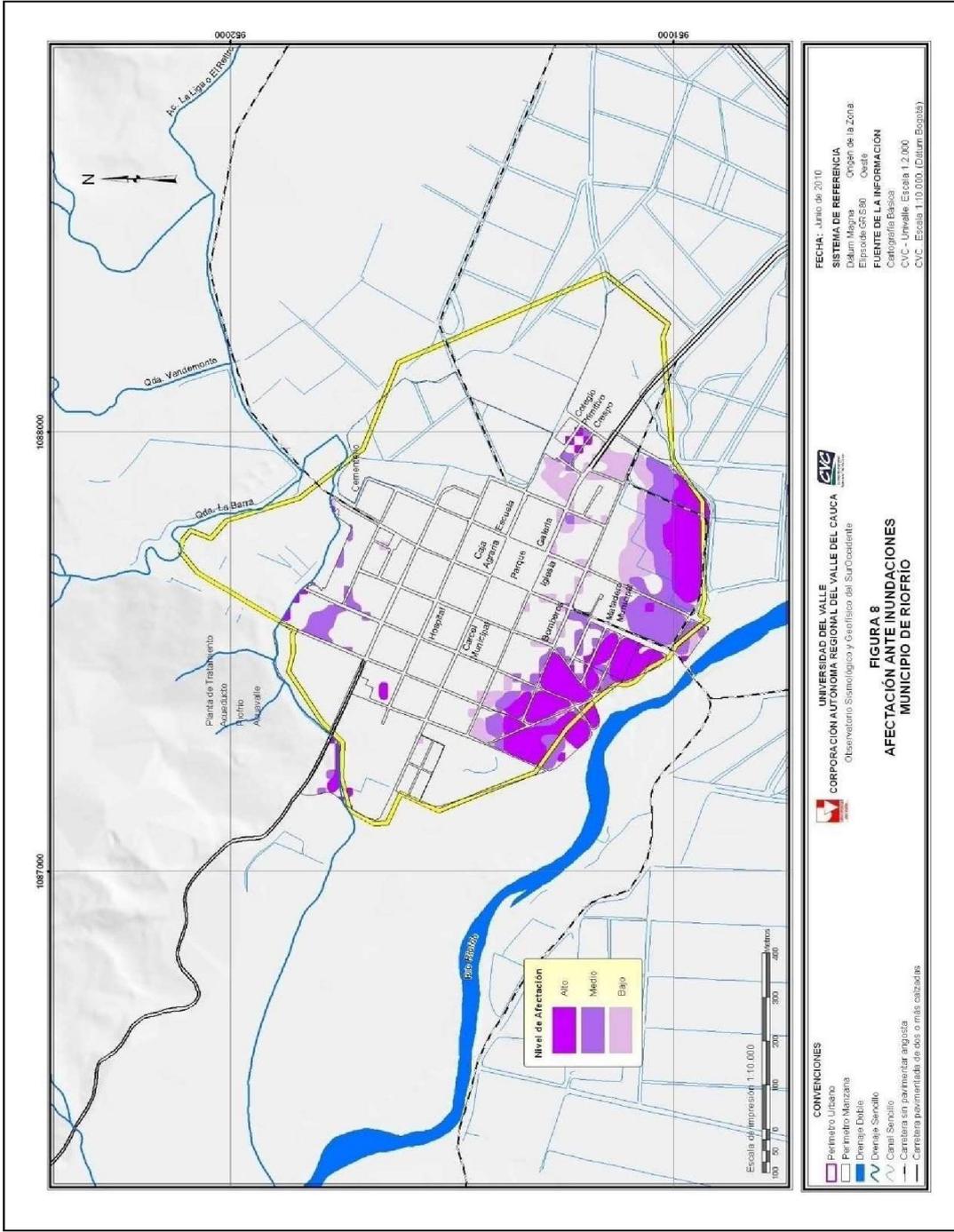
La relación entre el peligro de un fenómeno natural y las condiciones vulnerables creadas por una comunidad en su entorno físico y social es lo que determina el grado de afectación ó modo de daño que pueda sufrir la misma; de esta forma se determinó el riesgo en términos de afectación o daño para cada uno de los fenómenos naturales evaluados.

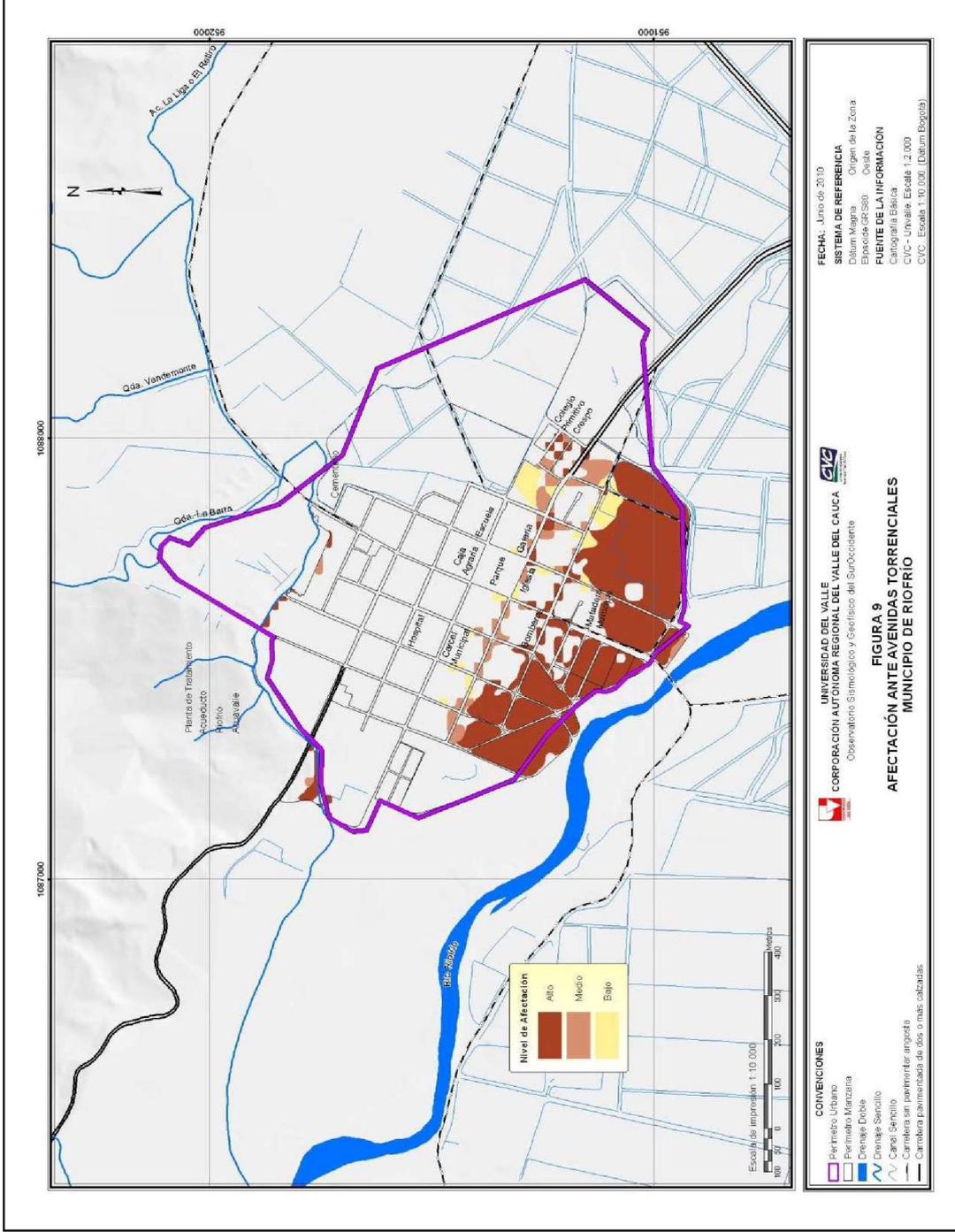
Las Figuras 8 y 9 reflejan los resultados obtenidos en cuanto a afectación global tanto para inundaciones como para avenidas torrenciales respectivamente, en ellas se pueden apreciar que Las zonas de mayor afectación se encuentran localizadas principalmente al sur de la cabecera municipal cerca del cauce del río Riofrío y unos pequeños sectores cercanos a las acequia La Liga o El Retiro, donde las características propias asociadas a la amenaza y la vulnerabilidad las convierten en sectores cuyos daños derivados a partir de la ocurrencia de un fenómeno de origen hidrológico, bien sea inundaciones o avenidas torrenciales, podrían ser graves traducidos en un elevado número de personas lesionadas, con fracturas, invalidez física y fallecidas; la población infantil y senil en estos casos serían una de las más afectadas.

En cuanto a las viviendas, el modo de daño esperado podría traducirse en el deterioro físico de las paredes y daños estructurales en las mismas. Igualmente podemos apreciar un incremento cercano al 37% en los niveles altos de afectación ante avenidas torrenciales con respecto a los niveles percibidos ante inundaciones. En dichos sectores encontramos localizados los barrios El Lago, El Castillo y parte de El Centro.

De acuerdo con los resultados, la cabecera municipal afronta una situación de riesgo en la que importantes sectores de la población se encuentra en niveles de afectación moderados y altos, sin incluir la zona de expansión, debido principalmente a la ausencia de urbanización. Cerca del 34,8% del área estudiada en la cabecera del municipio presenta niveles moderados de afectación ante inundaciones, mientras que aproximadamente el 42,8% del área estudiada se encuentra en una zona de afectación alta: en cuanto a avenidas torrenciales, la situación de riesgo tiende a agudizarse debido a que cerca del 11% del área se encuentra en niveles de afectación moderada, mientras que el 80,2% aproximadamente,

presenta niveles de afectación relativa, donde se esperarían daños graves estructurales en las viviendas y la pérdida de la vida de gran parte de la población.





Debido a la complejidad de los fenómenos naturales y la dinámica espacial que presentan los elementos corporales expuestos en función del espacio-tiempo, existe una variedad de posibilidades de manifestación del daño. En este sentido se adoptó la propuesta de complementar el análisis mediante la concepción de escenarios de afectación, lo que permitió aproximarnos al daño específico en función del número ó porcentaje de personas afectadas.

Para generar dicho modelo se efectúa el cruce de información correspondiente al modo de daño con el número de personas en la vivienda por escenario (diurno y nocturno). Las figuras 10 y 11 muestran el porcentaje de población que se encuentran en niveles de afectación medio y alto durante el día como durante la noche; aproximadamente 584 personas podrían verse afectadas dada la ocurrencia de un evento de origen hidrológico (bien sea inundaciones o avenidas torrenciales) durante el día, mientras que cerca de 977 personas podrían verse afectadas durante la noche lo que refleja un incremento aproximado de exposición del 60 % de población.

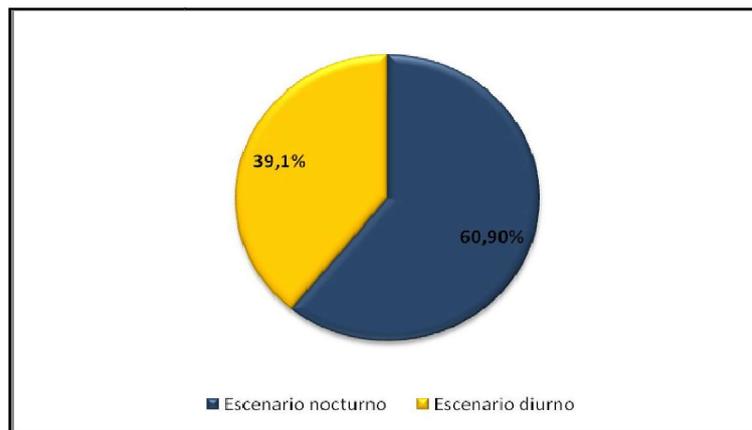


Figura 10 Porcentaje de población en nivel de afectación alto.

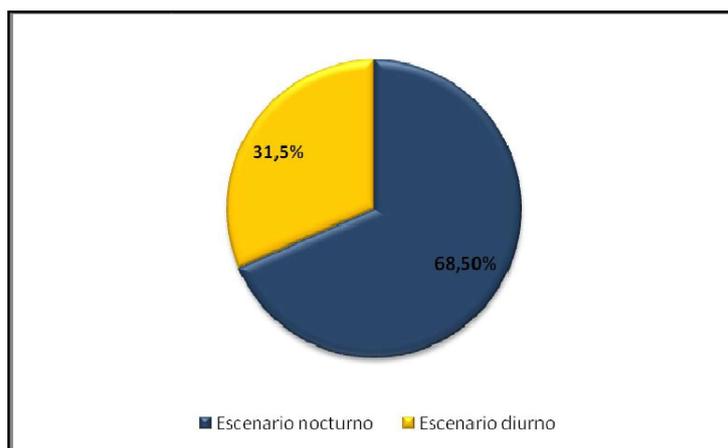


Figura 11 Porcentaje de población en nivel de afectación medio.

8. SOCIALIZACIÓN

Como actividad final correspondiente a los términos de referencia del proyecto se llevó a cabo la socialización de resultados y lineamientos generales, la cual se desarrolló el día 16 de Julio de 2010, en el Auditorio del Hospital del municipio de Riofrío.

Por medio de una amplia convocatoria a todos los actores institucionales y sociales de la localidad, la Secretaría de Planeación Municipal invitó a funcionarios representantes de los diversos organismos que conforman el CLOPAD, tales como funcionarios de la alcaldía, hospital, centros educativos, organizaciones no gubernamentales (ONG's), policía, defensa civil y bomberos, entre otros.

Entre las principales actividades realizadas en la jornada se destacan la incorporación de aspectos conceptuales en el desarrollo de la actividad 1, correspondiente a la resolución de un crucigrama diseñado como estrategia pedagógica para la sensibilización de los actores participantes en el taller. Posteriormente, los participantes articulados en grupos de trabajo, desarrollaron el ejercicio de cartografía social, correspondiente a la actividad 2, en el que los integrantes de los grupos representaron en la cartografía base del municipio los escenarios de afectación que desde su percepción y experiencia consideraron importantes a tener en cuenta. (Figura 12). Finalmente, se presentaron los resultados de los estudios de

amenaza, vulnerabilidad y afectación, para proceder a exponer los principales lineamientos generales para la actualización del Plan de Emergencias y Contingencias del municipio (PLEC) y por supuesto, el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT).



Figura 12. Fotografías actividad de socialización. Municipio de Riofrio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En el municipio de Riofrío, las inundaciones se presentan básicamente por la antigüedad de un alcantarillado que capta, tanto aguas residuales como aguas lluvias, a esto se suma la falta de previsión y los usos inadecuados del suelo, que hacen su aporte a la problemática. De otro lado, los afluentes mencionados (río Riofrío, Cuncua, etc.) en este informe, son desencadenantes de inundaciones afectando a los habitantes de varios barrios, que ven como sus casas cada vez son más vulnerables a las inundaciones durante la ola invernal.

Geológicamente el área de estudio en el Municipio de Riofrío presenta pocos afloramientos en estado fresco de las unidades litológicas Gabro de Riofrío y Complejo Ultramáfico de Bolívar presentes en la parte Norte del municipio y que son la fuente principal del aporte de sedimentos de diferentes tamaños a los cauces que actúan en la zona, en especial del río Riofrío. Concordante con esto, predominan los suelos residuales de tamaños de grano de arena media a gruesa, producto de la meteorización química y física de estas unidades.

La base de las colinas conformadas por la litología cristalina y los suelos residuales de estas, se encuentran constituidas por depósitos coluviales tipo talud, en los que predominan los cantos subangulosos de hasta 1m de diámetro, denominados derrubios, rodeados por una matriz de arena gruesa a media. Estos Suelos Coluviales son afectados por procesos de remoción en masa y erosión concentrada, en los que sobresalen reptación, desprendimiento de bloques, surcos, carcavamiento, entre otros, afectando diferentes zonas importantes del municipio como el barrio FUNVIVIR y la carretera a Trujillo.

La cartografía de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales generada se constituye en una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio de Riofrío, la optimización de los sistemas de alerta y emergencia, el diseño y construcción de obras de protección y, en general, la

gestión del riesgo. La cartografía de amenaza generada representa una medida no estructural para el control de estos fenómenos naturales.

Con base en los mapas de amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales generados para los diferentes escenarios considerados (es decir, para las crecientes de periodos de retorno de 10, 30 y 100 años) se determinó la extensión de las zonas del perímetro urbano expuestas a los niveles de amenaza alto, medio y bajo, arrojando los siguientes resultados:

| Escenario (Tr, años) | Área urbana afectada por inundaciones (ha) | | | |
|--------------------------------|--|---------------|--------------|------------|
| | Amenaza alta | Amenaza media | Amenaza baja | Área total |
| 10 | 3.97 | 11.79 | 0 | 15.76 |
| 30 | 1.45 | 5.66 | 12.41 | 19.52 |
| 100 | 3.52 | 9.67 | 16.55 | 29.74 |
| Global | 6.56 | 12.38 | 10.79 | 29.74 |
| Porcentaje del área urbana (%) | 7.75 | 14.63 | 12.75 | 35.13 |

| Escenario (Tr, años) | Área urbana afectada por avenidas torrenciales (ha) | | | |
|--------------------------------|---|---------------|--------------|------------|
| | Amenaza alta | Amenaza media | Amenaza baja | Área total |
| 10 | 6.02 | 7.82 | 0 | 13.84 |
| 30 | 13.41 | 8.63 | 9.93 | 31.96 |
| 100 | 12.39 | 4.34 | 11.98 | 28.72 |
| Global | 14.11 | 10.16 | 7.63 | 31.91 |
| Porcentaje del área urbana (%) | 16.68 | 12.01 | 9.02 | 37.71 |

Considerando el fenómeno de inundaciones originadas por los desbordamientos de los cauces y las lluvias, el 35.1% del área urbana del municipio de Riofrío se encuentra expuesta a algún grado de amenaza; es decir, un poco más de la tercera parte del área

urbana se encuentra amenazada. Por otra parte, el 22.4% de la zona urbana del municipio se encuentra expuesta a un nivel de amenaza alto o medio.

Para el fenómeno de avenidas torrenciales el 16.7% del área urbana se encuentra expuesta a un nivel de amenaza alto, el 12% a un nivel de amenaza medio y el 9% a un nivel de amenaza bajo. El área urbana amenazada por Avenidas Torrenciales representa el 37.7% del área urbana total, y el 28.7% del área urbana se encuentra expuesta a un nivel de amenaza alto o medio. Estas cifras indican que el fenómeno de avenidas torrenciales es un poco más crítico que el de inundaciones para la zona urbana del municipio de Riofrío.

Al considerar conjuntamente los mapas de amenaza globales por inundaciones y avenidas torrenciales se obtuvo el mapa de amenaza integrado por estos dos fenómenos. Este mapa indica o representa la condición o nivel de amenaza más crítico que se puede tener en cada punto del área urbana al considerar tanto el fenómeno de inundaciones como el de avenidas torrenciales. Este mapa integrado arrojó las siguientes áreas de la zona urbana del municipio de Riofrío expuestas a los niveles de amenaza alto, medio y bajo:

| Tipo de fenómeno | Área urbana afectada por la integración de los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales (ha) | | | |
|--------------------------------------|---|---------------|--------------|------------|
| | Amenaza alta | Amenaza media | Amenaza baja | Área total |
| Inundaciones y avenidas torrenciales | 14.19 | 11.93 | 7.79 | 33.91 |
| Porcentaje del área urbana (%) | 16.77 | 14.1 | 9.21 | 40.08 |

Según los resultados alcanzados, el 40% del área urbana del municipio se encuentra expuesta a algún grado de amenaza por inundaciones o avenidas torrenciales (es decir, 33.91 ha), lo cual representa un porcentaje relativamente alto de toda el área urbana. Igualmente se debe destacar que el 30.8% del área urbana (o sea 26.12 ha) se halla expuesta a un nivel de amenaza alto o medio. Así se establece que, el mapa integrado de amenaza

por inundaciones y avenidas torrenciales presenta condiciones más críticas que los resultados de los mapas de amenaza individuales por cada uno de los dos fenómenos, razón por la cual este mapa debería ser tenido en cuenta para el reordenamiento territorial del municipio y el planteamiento de medidas de protección y mitigación necesarias.

5.2 RECOMENDACIONES

Los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales constituyen una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para diferentes propósitos, tales como:

Optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio, de acuerdo con los niveles de amenaza. Los mapas permiten identificar las zonas que presentan un mayor grado de amenaza, en las cuales se deben establecer fuertes restricciones de uso del suelo.

Implementación y optimización de los sistemas de alerta y emergencia ante la ocurrencia de inundaciones y avenidas torrenciales. La predicción de la profundidad que alcanzaría el agua en la planicie de inundación, así como la velocidad del flujo y el producto de la profundidad por la velocidad, permiten estimar el posible impacto generado por una creciente y, en consecuencia, establecer prioridades en las actividades a implementar (medidas no estructurales) antes, durante y después de los desbordamientos.

Diseño de obras de protección, mitigación y/o control. Los mapas de amenaza indican las zonas potencialmente inundables y las características de los flujos en dichas zonas en caso de presentarse un evento extremo, por lo cual permiten plantear y analizar diferentes alternativas de obras (medidas estructurales) que conduzcan a la prevención, mitigación y/o control del fenómeno y definir finalmente la alternativa más apropiada considerando los diferentes aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos.

Los mapas de amenaza generados debido a la posible ocurrencia de los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales deben ser empleados para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación y evaluación del riesgo, y finalmente para el reordenamiento del territorio del municipio de Riofrío teniendo en cuenta los diferentes grados o niveles de amenaza establecidos, así:

Nivel de amenaza alto: zona en la cual podrían generarse graves daños a núcleos urbanos, por lo cual se considera que no debe ser urbanizable y debe contar con una protección especial. Si no se contempla el diseño y construcción de estructuras de protección para las zonas donde existan construcciones (casas, edificios, bodegas, hospitales, instituciones educativas, etc.) es necesario planear a mediano y largo plazo su reubicación.

Nivel de amenaza medio: zona en la cual podrían ocurrir daños significativos a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos; por tal motivo se debe prohibir la construcción de viviendas, granjas, hoteles, centros escolares o sanitarios, hospitales, bomberos, cementerios y actividades de naturaleza similar. Se debe considerar la reubicación de las construcciones existentes en esta zona a largo plazo si no se contempla el diseño y construcción de estructuras de protección.

Nivel de amenaza bajo: zona en la cual podrían presentarse daños leves a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos, por cual se puede permitir la construcción de viviendas y hoteles, adoptando las medidas de seguridad correspondientes.

Se recomienda plantear, dimensionar y evaluar, considerando los aspectos social, ambiental, técnico y económico, distintas medidas estructurales (obras) orientadas a la prevención, mitigación y/o control de los desbordamientos durante las crecientes y avenidas torrenciales de los ríos Riofrío y Cuancua; esto con el fin de evitar o reducir magnitud e intensidad de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales. Entre estas medidas se pueden considerar las siguientes: continuación del dique marginal existente sobre la margen izquierda del río Riofrío hacia aguas arriba del puente Alfonso Bonilla Aragón; áreas de almacenamiento, las cuales permiten amortiguar las crecientes al retener temporalmente

una fracción del volumen de agua transportado por el río; y, desviación de parte del caudal del río Riofrío a su paso por el municipio.

Debido a que se encontró en la parte noroccidental del casco urbano y la zona de expansión del municipio una importante área con un nivel bajo de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, ocasionado especialmente por el escurrimiento superficial originado por las aguas lluvias en las laderas de la zona montañosa adyacente a la cabecera municipal, se recomienda plantear, dimensionar y evaluar la construcción de un canal interceptor que permita captar los caudales de escorrentía superficial correspondientes a lluvias de periodos de retorno de 100 años; adicionalmente estos caudales podrían ser utilizados para el riego de cultivos de las parcelas y haciendas localizadas próximas a este sector.

En las zonas localizadas por fuera de la cabecera municipal y zona de expansión urbana adyacentes a los cauces Riofrío y Cuancua se recomienda plantear y analizar la construcción de diques marginales para la protección de los terrenos aledaños para un periodo de retorno de 30 años; estos terrenos pueden ser utilizados para fines agropecuarios.

Las medidas no estructurales, solas o en conjunto con las estructurales, pueden minimizar significativamente las afectaciones de los elementos expuestos en las áreas amenazadas y, por ende, disminuir los costos de los posibles daños. Entre las principales medidas estructurales recomendadas se tienen las siguientes:

Sistemas de pronóstico y alerta temprana: tienen la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de la inundación, avisando a la población para la oportuna evacuación de las áreas potencialmente afectadas por el fenómeno y tomando las medidas necesarias para reducir los perjuicios resultantes de la inundación. Para el sistema de pronóstico se requiere de un sistema de monitoreo (registro continuo y permanente de precipitaciones y niveles de agua en la parte alta de la cuenca y los ríos Riofrío y Cuancua) y transmisión telemétrica a un centro de pronósticos.

Elaboración y desarrollo de programas de prevención, educación y alerta, dirigidos a toda la población, incluyendo hospitales, escuelas, instituciones públicas y privadas, industrias, infraestructura.

Realizar una zonificación técnica de las áreas sometidas a diferentes niveles o grados de amenaza, así:

Zona de amenaza alta: cualquier construcción que exista en esta área reduce el área de escurrimiento, elevando los niveles de aguas arriba de esta sección; esta zona debe quedar libre para evitar daños importantes y represamientos; no se debe permitir ninguna nueva construcción en esta zona y el municipio podrá, paulatinamente, trasladar las construcciones existentes; esta área puede ser usada para la agricultura u otro uso similar; adicionalmente, se puede permitir la instalación de líneas de transmisión y conductos hidráulicos o cualquier tipo de obra que no produzca obstrucción al escurrimiento, como por ejemplo, estacionamientos, campos de deportes, entre otros.

Zona de amenaza media: las áreas expuestas a este nivel de amenaza pueden tener los siguientes usos: (a) parques, actividades de recreación y deportivas cuyo mantenimiento, después de cada crecida, sea simple y de bajo costo; normalmente una simple limpieza restablece rápidamente su condición de uso; (b) agropecuario; (c) viviendas con más de un piso, donde el piso superior quedará por lo menos en el nivel del límite de la crecida y estructuralmente protegida contra crecidas; (d) industrial y comercial, como áreas de cargas, estacionamiento, áreas de almacenamiento de equipos o maquinaria fácilmente removible o que no estén sujetos a los daños que genera una crecida; en este caso no se debe permitir el almacenamiento de artículos perecederos y principalmente tóxicos; (e) servicios básicos, líneas de transmisión, calles y puentes, siempre y cuando estén correctamente proyectados.

Zona de amenaza baja: teniendo en cuenta la baja probabilidad de ocurrencia y las pequeñas láminas de agua y bajas velocidades de las inundaciones que pueden presentarse

en esta zona no se requiere una reglamentación especial debido a que los posibles daños se considera pueden ser de menor cuantía.

Se recomienda diseñar e implementar un programa de mediciones de campo orientado a la recolección de información durante la ocurrencia de los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales en el municipio de Riofrío: El programa debe permitir la toma de datos e información sobre las características más importantes de los eventos catastróficos, tales como, registro de niveles de agua, duración de las crecientes, límites de áreas inundadas o afectadas, profundidades de agua y lodos en las diferentes zonas afectadas, toma y análisis de muestras de lodos para determinar sus propiedades sedimentológicas (granulometrías, concentraciones, etc.) y reológicas. (esfuerzos cortantes, viscosidad). El análisis de la información recolectada permitirá la optimización y actualización de los modelos hidrodinámicos y de lodos implementados en el presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad del Valle, específicamente el Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano expresa su agradecimiento a todas las entidades y personas que en una u otra forma aportaron en la ejecución y desarrollo del proyecto, logrando con ello, el estricto cumplimiento de los objetivos propuestos.

A la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC por la confianza depositada en la Universidad del Valle, representada en el Observatorio Sismológico al asignarle la ejecución del estudio y el apoyo que todas sus dependencias en todo momento prestaron.

A HIDRO-OCCIDENTE por sus valiosos comentarios y sugerencias como entidad interventora del proyecto.

De manera particular a INGEOMINAS, IDEAM, IGAC, Alcaldías Municipales de los municipios objeto de estudio, CENICAFE, Secretarías de Planeación, Defensa Civil, Bomberos, Cruz Roja, entre otras por su colaboración en el suministro de registros e información.