FUENTES SISMOGÉNICAS Y DESLIZAMIENTOS EN VILLAVICENCIO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

*Alfonso Mariano Ramos Cañón**

*Andrés José Alfaro Castillo***

Resumen: este documento presenta un panorama sobre la situación de Villavicencio relacionada con las fuentes sismogénicas que pueden afectar la zona urbana de la ciudad, un análisis general de los deslizamientos que se han presentado y el modelo morfodinámico, en el que se presentan los diferentes grados de susceptibilidad de los materiales constitutivos divididos en aquéllos de zona montañosa y los de zona plana.

Abstract: this document presents the seismic sources that could affect the urban area of Villavicencio city. It also presents a general analysis of the landslides in the history of the city and the morphodynamical model in which several degrees of susceptibility of the constituent substances are shown. These have been divided into those of mountainous zones and those of flat zones.

1. GENERALIDADES

Villavicencio es la capital del Departamento del Meta, polo de desarrollo económico y social de los Llanos Orientales colombianos. El comercio es el sector más dinámico en la economía, ya que por Villavicencio se canalizan hacia Bogotá y otras ciudades del interior la mayoría de los productos agropecuarios y agroindustriales de los Llanos Orientales.

La ciudad se ubica en el límite oriental del piedemonte de la cordillera oriental; está localizada a los 04° 09' 12" de latitud norte y 73° 38' 06" de longitud oeste, a una altura de 467 mts sobre el nivel del mar y dista de Bogotá 126 kms en dirección suroriental. Según datos preliminares

* *Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Investigador Instituto Geofísico Universidad Javeriana.*

** *Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Master en Ingeniería Sísmica, Universidad Politécnica de Cataluña. Director Instituto Geofísico Universidad Javeriana.*

del censo de 1993, la población urbana superaba los 190.000 habitantes. En el territorio municipal se distinguen claramente dos regiones, una montañosa, ubicada al oeste y noroeste de la ciudad, conformada por el costado oriental de la cordillera oriental, y la otra, una planicie ligeramente inclinada hacia el oriente y suroriente, correspondiente al piedemonte y bordeada al norte por el río Guaitiquía y al sur por el río Guayuriba; por la parte central de esta planicie cruzan los ríos Ocoa y Negro, así como numerosos caños y corrientes menores. La precipitación media anual es de 4.260 mm, lo que es un factor importante como detonante en la generación o activación de deslizamientos. Las lluvias están distribuidas en un régimen monomodal donde los meses más lluviosos son abril, mayo y octubre [IGAC, 1996].

Debido a su ubicación geográfica y al régimen pluviométrico predominante, la ciudad se ve afectada por fenómenos de remoción en masa, con pérdida de vidas y deterioro de la infraestructura. Además, está amenazada por eventos sísmicos debido a las múltiples fuentes sismogénicas que han sido epicentro de sismos significativos en los últimos años. Aquí vale la pena mencionar el sismo de Tauramena, ocurrido el 19 de enero de 1995. La combinación de estos factores, sumada a la importancia de este centro urbano para el desarrollo económico y social de los Llanos Orientales colombianos, implica que Villavicencio sea una ciudad en la que de forma prioritaria se deban adelantar estudios para desarrollar acciones de prevención y mitigación de desastres. Este artículo resume parte de la investigación denominada Microzonificación Sísmica Preliminar de Villavicencio realizada por el Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S. A. en el marco del convenio interinstitucional "Estudios de amenaza y microzonificación sísmica, vulnerabilidad estructural y evaluación de escenarios de daño".

2. El modelo geológico de la zona urbana de Villavicencio

Las fuentes sismogénicas son zonas de la corteza terrestre en donde existe la posibilidad de que se genere algún tipo de movimiento o que se produzca liberación de energía almacenada por los materiales de la corteza, es decir, son el lugar de origen de los sismos. Para conocer las fuentes sismogénicas que afectan a un sitio específico es necesario conocer el marco geológico y tectónico en el que éste se encuentra. En la investigación realizada por el Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S. A., se generó un modelo geológico de la zona urbana de Villavicencio que se muestra en la figura 1 [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000].

Este modelo geológico se obtuvo mediante la fotointerpretación geológica y geomorfológica de las fotografías aéreas relacionadas en las tablas 1 y 2 [IGAC, 1997] y el análisis de la bibliografía consultada. Para la denominación estratigráfica se usó la definida por Ingeominas [Ingeominas, 1996] en la plancha No. 266, Villavicencio, a escala 1:100.000.

TABLA 1. Relación de cartografía

Fuente	Escala	Descripción
IGAC [Plancha 288-II-B 1983, 1983 Plancha 288-II-D]	1:25.000	266-II-B, 266-II-D, 1983
IGAC [1992]	1:10.000	Plano urbano de Villavicencio, 1992
DANE [1999]		Base Digital, 1999, Formato E00

TABLA 2. Relación de fotografías aéreas

Vuelo	Sobre	Escala aproximada	Fecha de Toma	Fotos No
C-2627	37876	1:43.400	2-4/12/97	084 - 088
C-2627	37875	1:44.000	2-4/12/97	077 - 081
C-2627	37874	1:46.300	2-4/12/97	064 - 068

Fuente: [IGAC, 1997].

Durante el proceso de fotointerpretación se encontraron características y rasgos cuya precisión y definición requieren de control y verificación de campo, relacionados especialmente con la composición litológica de los materiales y con la ubicación y definición de zonas de discontinuidad estructural, como son las fallas y fracturas principales.

Villavicencio está ubicada sobre una gran abanico coluvio aluvial, correlacionable con los abanicos coalescentes característicos que se presentan a la salida del piedemonte oriental de la cordillera oriental. Fotogeológicamente se puede observar que este abanico consta de dos lóbulos principales que se desprenden desde los caños Maizaro y Buque, con mayor espesor para el lóbulo que sale del caño Buque (ver figura 1).

2.1 LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

Las formaciones geológicas que afloran en Villavicencio y sus alrededores varían en edad desde el Paleozoico hasta el Cuaternario; su descripción de la más antigua a reciente es la siguiente:

2.1.1 ROCAS PRECÁMBRICAS A JURÁSICAS

- Metamorfitas del Quetame: constan de varios conjuntos de metamorfitas, cuarcitas, filitas verdes, grises y moradas, metalimolitas y, en menor proporción, por esquistos sericíticos y cloríticos y brechas cataclásticas. Afloran entre los caños Buque y Parrado al oeste de la falla El Mirador; fotogeológicamente presentan leve diferenciación con relación a las rocas que las circundan [Ingeominas, 1996].
- Formación Brechas de Buenavista: de acuerdo con Dorado [1990], esta formación consta de un segmento inferior donde se encuentran ruditas o conglomerados cementados en cuya armazón predo-

minan fragmentos angulosos de pizarras, filitas y esquistos y, en menor porcentaje, fragmentos de conglomerados ortocuarcíticos con cantos redondeados de cuarzo lechoso. El segmento superior de aproximadamente 45 a 60 m de espesor está representado por brechas y conglomerados.

2.1.2 Rocas cretáceas

De acuerdo con Ingeominas [1996] las formaciones son:

- Formación lutitas de Macanal: consta de lodolita gris oscura, laminar con delgadas intercalaciones de arenisca lítica de grano medio, con algunos niveles calcáreos. Esta formación conforma principalmente el relieve ubicado al norte y noreste de Villavicencio.
- Formación arenisca de Cáqueza: consta de areniscas cuarzosas, blancas, de grano medio a conglomerático con gránulos de cuarzo de hasta 1 cm de diámetro. Presenta intercalaciones de lodolita gris verdosa. Conforma una franja que se extiende desde el suroeste hacia el noroeste en dirección NNE.
- Formación Fómeque: consta de arcillolitas pardo amarillentas, alternando con areniscas líticas de color gris, localmente calcáreas, en capas medias a gruesas. Conforma una franja delgada que se extiende en dirección paralela a la estructura principal (NNE).
- Formación Une: consta de arenisca de color gris claro a blanco amarillento, cuarzosa, de grano grueso a ligeramente conglomerático, con gránulos de hasta 5 cm de diámetro, constituidos por cuarzo blanco lechoso. Presenta estratificación cruzada e incluye niveles de lodolita gris y lentes de carbón, especialmente hacia la parte superior.
- Formación Chipaque: consta de lodolita negra a gris oscura en bancos gruesos, con intercalaciones de arenisca cuarzosa, de color gris claro a gris oscuro, de grano medio en capas de 40 cm de espesor. Esta formación aflora al nororiente de Villavicencio en las colinas inferiores ubicadas al occidente de la vía Villavicencio - Cumaral.
- Grupo Palmichal: según Caro y García [1987] esta formación consta de un nivel inferior con predominio arenoso, un nivel intermedio de lutitas arcillosas con esporádicas intercalaciones arenosas y un nivel superior arenoso.

2.1.3 Rocas terciarias

- Formación La Corneta: consta de conglomerado que incluyen desde bloques hasta guijos de cuarcita, arenisca y lodolita en matriz arenosa gruesa [Ingeominas, 1996]. Aflora en las colinas bajas que se ubican al suroccidente de Villavicencio, ubicadas al occidente de la vía Villavicencio - Acacías.

2.1.4 Depósitos cuaternarios

En el estudio realizado por la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá [1989] se encuentran descritos los siguientes depósitos cuaternarios:

- Abanicos coluvio aluviales: en la parte más alta del abanico de Villavicencio se sitúa la ciudad, donde predominan los suelos de textura franco limosa. Conforma un cono terraza aluvio torrencial.
- Coluviones: son depósitos recientes de talus, (material transportado de la parte alta de las laderas) producto del desgarre de materiales en la parte alta de las laderas.
- Terrazas aluviales: el área de las terrazas aluviales, en sus niveles altos y bajos, se localiza en ambas márgenes del río Guatiquía. Son depósitos que conforman diferentes niveles de altura y desarrollo de escarpes aterrazados.
- Depósitos aluviales recientes: esta unidad está formada por aluviones recientes denominados generalmente vegas; se hallan a lo largo de los ríos Guatiquía, Ocoa y Upín, que al salir de la cordillera forman un sistema entrelazado con muchos brazos en su lecho y frecuentes desplazamientos.

2.2 Estructuras tectónicas

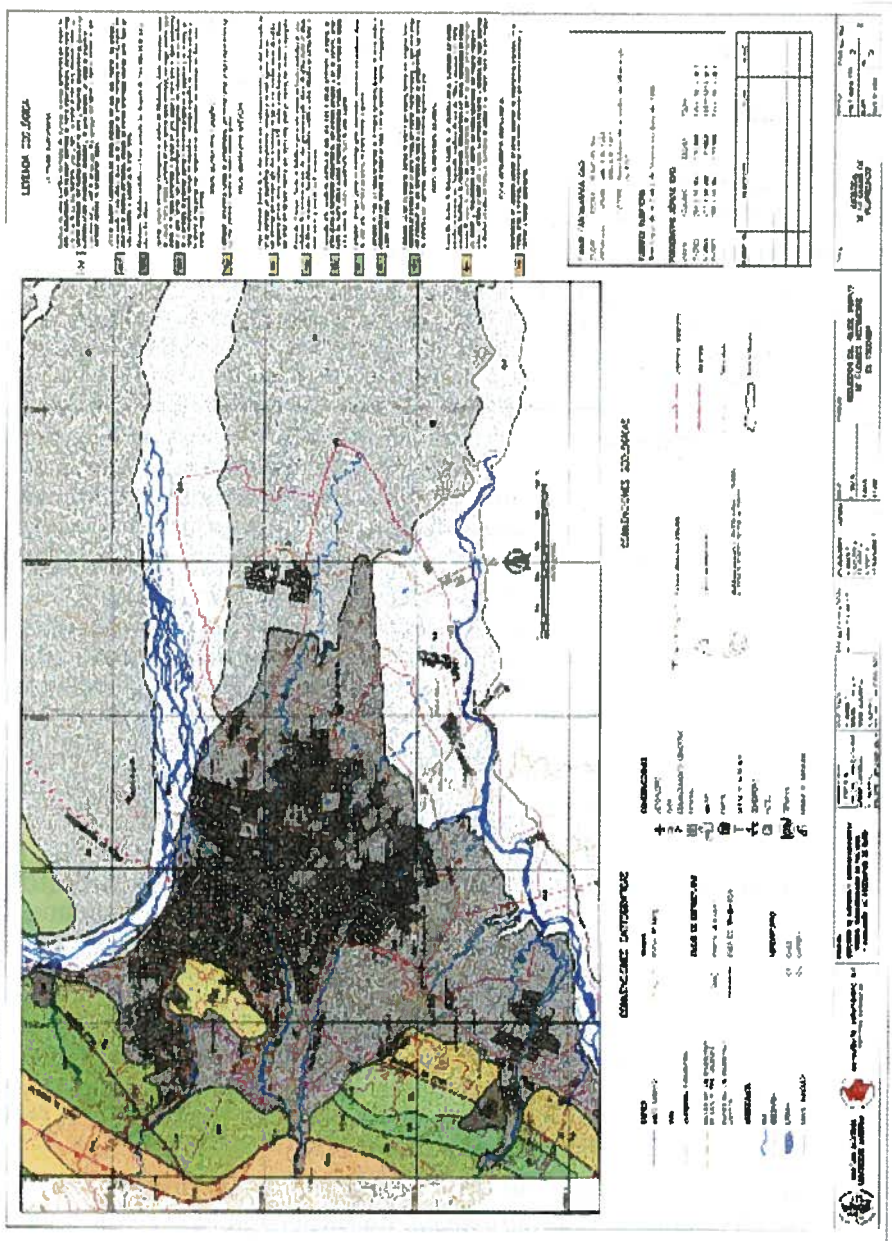
Las estructuras tectónicas activas se refieren a aquéllas que tienen indicios de movimiento en época reciente (cuaternario), mientras que las estructuras tectónicas potenciales son aquéllas que evidencian algún tipo de movimiento en tiempos antes del Cuaternario. Es importante discriminar las estructuras tectónicas en los dos tipos mencionados, ya que su incidencia en la amenaza específica de la ciudad será distinta.

Cuellar y otros [1988] realizaron un estudio con el fin de profundizar en la actividad tectónica del sistema de fallas de Guaicáramo, donde se encontró gran actividad tectónica local; en 45 días de monitoreo se registraron 40 sismos; sin embargo, no fue posible asignar estos eventos a ninguna de las fallas conocidas, lo que se atribuye a la amplia incertidumbre y al desconocimiento de la actividad tectónica en este sistema de fallas.

2.2.1 Estructuras tectónicas activas

En el sector cercano a Villavicencio las principales fallas de oriente a occidente son: Villavicencio, Colepato, Mirador-Bavaria, Servitá, La Reforma, Blanca, Pipiral y Susumuco [Cuellar et al., 1988]. Estas fallas hacen parte del sistema de fallas de Guaicáramo, considerado como el más activo en el territorio colombiano. Varias de las fallas asociadas a él se han mostrado muy activas en los últimos años. Muestra de ello es la actividad sísmica registrada en el municipio de El Calvario entre marzo - mayo de 1988, cuando se presentaron dos sismos de magnitud apreciable (entre 4 y 5 en la escala de Richter), que originaron daños en varias edificaciones de El Calvario y San Francisco [Cuellar et al., 1988].

FIGURA 1. Modelo geológico de Villavicencio



Fuente: [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000]

2.2.2 ESTRUCTURAS TECTÓNICAS POTENCIALES

Según Cortés y De La Espriella [1990], el sistema de fallamiento ha tenido una evolución sincrónica con los plegamientos y deformación de las rocas que conforman el Macizo de Quetame. Sin embargo, la datación o precisión cronológica en la actividad de los sistemas de

datación o precisión cronológica en la actividad de los sistemas de fallamiento no es siempre evidente, puesto que aparentemente algunas fallas se generaron desde el Paleozoico y posteriormente fueron reactivadas simultáneamente con los otros procesos de deformación y orogénesis.

Cortés y De La Espriella [1990] reconocen tres sistemas de fallamiento en la región estudiada: el sistema SE-NW, el sistema SW-NE y el sistema E-W.

- Sistema de Fallas SE-NW
  - Falla de Río Negro: el grupo de fallas del sistema SE-NW es muy evidente en la zona del macizo de Quetame y su principal elemento lo constituye la falla de Río Negro, una falla antigua con posibles reactivaciones posteriores al Paleozoico. Esta falla es de carácter regional y tiene una zona de influencia de por lo menos 5 km. La falla de Río Negro, con rumbo N40-50W desde la población de Cáqueza hasta la localidad de La Reforma, afecta a las rocas del grupo Quetame, en especial a la formación Puente La Balsa y aún ha deformado y fracturado intensamente a las rocas de la formación Cáqueza. Se ha interpretado como una falla antigua con actividad alta en el Pre-Mesozoico.
  - Hacia el SE, la falla de Río Negro se interrumpe en la falla de Servitá. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta última es parte de un grupo de fallas de dirección SW-NE, asociadas al límite de la región andina con la Amazonía. La relación entre la falla de Río Negro y el sistema de fallas SW-NE no es muy clara; es probable que la combinación de sus efectos haya producido la zona cartográficamente compleja al norte del río Guayuriba.
- Otras Fallas del Sistema SE-NW
  - En la zona de esfuerzos de la falla de Río Negro, y sin subestimar el concepto de que una zona de esfuerzos genera no solamente fallas paralelas sino otras en varias direcciones, se observaron en el área estudiada una serie de fallas del sistema SE-NW, en general con buzamientos altos, tales como la falla de Guayabetal (N30-35W vertical), con angosta zona de brechamiento; la falla de Conucos (N30W/paravertical), que podría ser el límite de una pequeña cuenca intramontana; la falla de Espinal, más producto de deducción preliminar que de observación directa en el terreno, y otras de menor magnitud.
  - Aparte de la falla de Río Negro, existen la falla Jabonera y la falla de Monteredondo. La primera está localizada al occidente del río Negro, en la loma Jabonera, con rumbo N35-45W y buzamiento alrededor de 75 grados al NE. Esta falla coloca en contacto fallado la formación arenisca de Gutierrez con la formación Quebrada Honda y más al sur con la formación lutitas de Portachuelo. La falla de Monteredondo está localizada a lo largo de Río Negro, entre la loma Los Pavitos y la parte baja de la Quebrada Blanca, donde es desplazada por la falla Blanca. Tiene rumbo N30W y buzamiento de 70 a 80 al oriente; coloca en contacto a la formación Guayabetal con la formación arenisca de Gutiérrez.

- Sistema SW-NE

Las observaciones en el borde llanero, que corresponden a la zona de influencia de la falla frontal de la cordillera oriental, son fallas tanto normales como de cabalgamiento, en algunos casos imbricadas y con zonas de influencia o de fracturación ancha (entre 150 y 200 metros cada una).

Las principales fallas en esta zona son la falla de Servitá (N40E/70E), de tipo normal, que podría ser la continuación de la falla de Santa María [Ulloa y Rodríguez, 1979] [Ingetec, 1980] y que produce continuos alineamientos de pequeñas cañadas; su zona de fracturación asociada es de unos 200 m de harina de falla, brechas cataclásticas y replegamientos locales en las rocas pelíticas; la falla Argentina, con una zona de 20 m de intenso replegamiento y fracturación, y la falla El Mirador (N45E/60-70W), que se ha interpretado como inversa; en una zona de fracturación de unos 200 m constituidos por brecha cataclástica, se observa la mayor deformación asociada a la falla frontal de la cordillera oriental.

De acuerdo con Ingeominas y la Universidad de los Andes [1996], el sistema Servitá-Santa María corresponde a una serie de fallas inversas, en dirección N20-40E, buzamiento de 45NW y posiblemente con componente de rumbo dextral, que se prolonga aproximadamente por 180 km, formando un corredor de 10 km de ancho. Dentro de este sistema se encuentran los segmentos de falla Colepato y Servitá.

La falla de Colepato tiene una longitud total de 40 km, 45% de su longitud está catalogada como activa con una tasa de actividad intermedia entre 0.01 a 0.1 cm/año. Utilizando correlaciones entre la longitud de ruptura y magnitud, con una magnitud máxima probable de 6.7 Ms. La falla de Servitá tiene una longitud total aproximada de 60 km, con 45% de longitud de tramo activo. La tasa de actividad es calificada de intermedia a alta (0.01 a 1 cm/año) con una magnitud máxima probable de 6.9 Ms [Ingeominas y Universidad de los Andes, 1996].

En la zona de transición en el borde llanero y el núcleo del macizo de Quetame, las principales fallas del sistema SW-NE son: la falla Pipiral (N35E/75W), con zona de fracturación de unos 200 a 250 m, la falla Minas (N50E/vertical) y la falla del Estado (N20E/80W) que ha producido una silla topográfica en la cuchilla de Portachuelo.

- Sistema E-W

Fallas que podrían incluirse en este sistema se observan en diferentes localidades, por ejemplo la falla Quebrada Honda, en Susumuco; sin embargo, la más relevante por su longitud es la falla Pescado. Esta falla parece conformar el límite entre bloques norte y sur; el bloque norte está compuesto por unidades estratigráficas del Paleoceno al Terciario, limitadas entre sí por fallas del sistema SW-NE; por otro lado, se encuentra el bloque sur con rocas del Mesozoico superior al Terciario, mucho más deformadas que las del bloque norte. Da la impresión de que se tratara en este caso de una falla de cabalgamiento

cuyo bloque sur se traslapara con el bloque norte; no obstante, las evidencias de este estudio no permiten aseverarlo con total certeza.

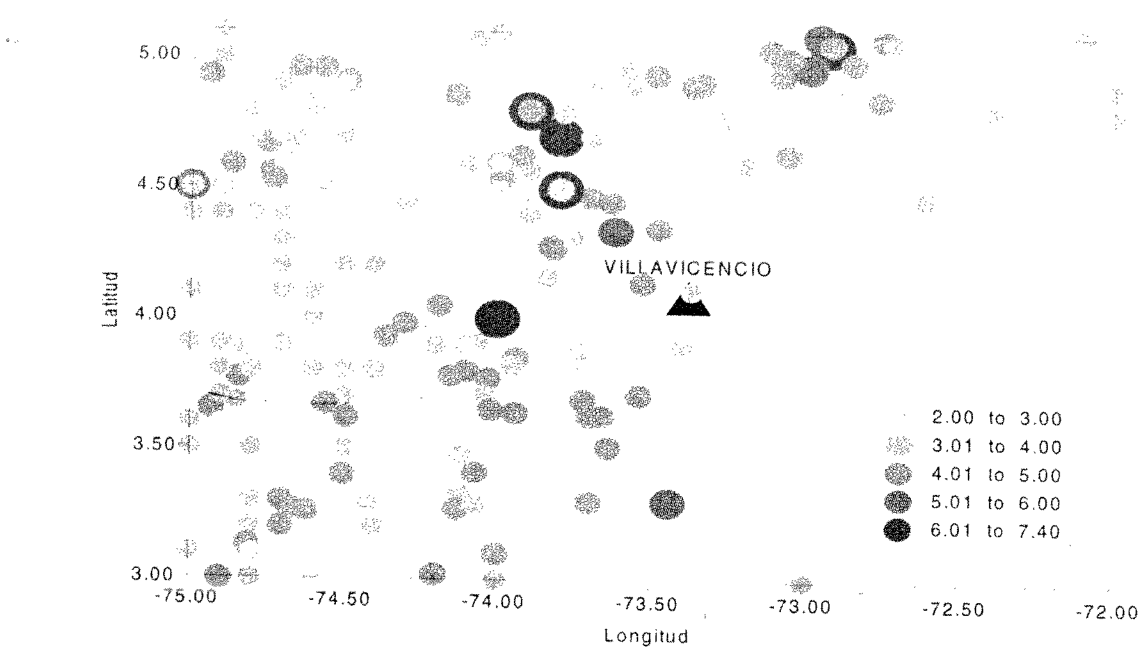
3. La sismicidad histórica

El uso del catálogo de eventos sísmicos es de suma importancia tanto desde la perspectiva histórica como a nivel de datos actualizados, porque además de ser una herramienta para la ubicación de fuentes sismogénicas en el área de estudio, permite tener una visión global de los aspectos que pueden tener alguna injerencia en la determinación de la amenaza sísmica de una zona en particular.

Para ello se consultó el catálogo de eventos sísmicos del United States Geological Survey (USGS) [USGS, 2000]. En él se incluyen los datos del proyecto SISRA, denominado Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina, realizado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) en cooperación con el USGS, para el período comprendido entre 1471 y 1981, y para el lapso entre 1981 y 1999; éste incluye los datos del *Preliminary Determinations of Epicenters* (PDE).

La consulta del catálogo se delimitó entre las latitudes 2.5 N y 5.5 N y las longitudes 71.5 W y 75.5 W, obteniéndose del SISRA 340 eventos y del PDE 64 sismos (figura 2).

Figura 2. Ubicación geográfica de los sismos [USGS, 2000].



El catálogo de eventos sísmicos extractado del USGS tiene datos históricos a partir del año 1625, iniciando con un terremoto de intensidad estimada de 7 en la escala de Mercalli Modificada [Pujades, 1999], y con magnitud estimada de 4.5 Ms; de este evento se tiene información del fallecimiento de personas [Ramírez, 1975].

El sismo más grande del que se tiene información fue el sucedido el 31 de Agosto de 1917 a las 6:36 a.m., con una magnitud 7.3 Ms y una intensidad epicentral de 8 en la escala de Mercalli Modificada, con daños en edificaciones y muertos. Este sismo estuvo antecedido por una serie de eventos ocurridos el día anterior a las 10:24 p.m. y a las 11:00 p.m., el primero de ellos con una magnitud de 4 Ms y el segundo con una magnitud de 3.5 Ms, con intensidades de 5 y 4 en la escala de Mercalli Modificada, respectivamente. Los periódicos de la época dieron cuenta de este sismo de la siguiente forma:

> "El municipio de Villavicencio fue sacudido por un fuerte sismo que derribó el costado occidental de la catedral y dejó seis adultos y un menor muertos. El movimiento telúrico ocurrió el viernes 31 de Agosto, cuando los feligreses aterrorizados por los temblores del jueves ingresaron a la iglesia para recibir la comunión. Los daños tanto en la iglesia como en la casa cural fueron avaluados en 45 mil pesos oro" (citado en [Llano 7 dias, 1995]).

Históricamente se tienen cinco eventos sísmicos con intensidades mayores o iguales a seis (en los años 1625, 1743, 1917, 1950, 1966) en el área de estudio (epicentros ubicados entre latitudes 3.6 N y 4.6 N y las longitudes 73.15 W y 74.15 W); sin embargo, se sabe de dos eventos fuera de la zona de estudio con magnitud siete y ocho, ocurridos en 1928 y 1967, que se sintieron fuertemente en Villavicencio; el último de ellos fue el macrosismo del Huila que sacudió la mayor parte del territorio nacional [Ramírez, 1967].

Es importante mencionar que en documentos consultados y analizados en este estudio [Cuellar et al., 1988 y Coyne et Bellier y Consultoría Colombiana, 1995] se menciona la existencia de una zona que podría ser catalogada de silencio sísmico en el sistema de fallas de Guaicáramo, en la parte ubicada al frente de Villavicencio, lo que significaría que existe una acumulación de energía en este tramo que no ha sido liberada gradualmente a diferencia de otras partes del lineamiento de este sistema. Esto se evidencia al analizar la sismicidad asociada; por lo tanto, en el momento en que esta concentración de esfuerzos sobrepase la resistencia de los materiales, se podría liberar una cantidad importante de energía.

4. DESLIZAMIENTOS

Debido a su ubicación geográfica en el piedemonte llanero colombiano, a lo que hay que adicionar el régimen pluviométrico en la zona y el marco tectónico, la ciudad es sumamente propensa a diferentes tipos de fenómenos de remoción de masa.

A través de una revisión de eventos previos, se han podido observar ciertos lugares específicos de la ciudad, donde se han presentado deslizamientos que tienen como factor detonador preponderante el agua. En la tabla 3 se resumen los deslizamientos ocurridos en la zona urbana de Villavicencio durante la década de 1990.

TABLA 3. Villavicencio. Deslizamientos en la zona urbana. 1990-1999.

Fecha	Lugar	Daños y víctimas	Referencia
06/12/1990	Cerro Cristo Rey (El rincón de María)	6 muertos, 10 heridos 3 viviendas arrasadas	[El Tiempo, 1990]
09/16/1992	Playa Rica	6 viviendas destruidas	[El Tiempo, 1992]
11/21/1996	Cerro Cristo Rey (San José)	1 muerto, 5 heridos 3 viviendas arrasadas	[El Tiempo, 1996]
05/28/1997	Cerro Cristo Rey (El Espejo)	3 muertos, 5 heridos, 4 viviendas arrasadas 3 desaparecidos 200 m^3 de lodo	[El Tiempo, 1997]
06/10/1997	Cerro Cristo Rey (El Espejo)	15 viviendas arrasadas 4 muertos	[Llano 7 días, Filtración 1997]
06/10/1997	Playa Rica (Barrio Villa Lorena)	6 familias en peligro de perder su vivienda	[Llano 7 días, Filtración 1997]
1996	Desembocadura Quebrada Honda	Tramo tubería de conducción destruida	[Llano 7 días, Acueducto 1997]
07/22/1997	Quebrada Honda Planta de tratamiento La Esmeralda	Deslizamiento 35 mil m^3 de material. 140 metros de tubería de conducción destruida.	[Llano 7 días, Acueducto 1997]

Se evidencia, pues, el impacto de los deslizamientos, representado en pérdidas de la infraestructura de la ciudad y pérdida de vidas humanas. La mayoría de deslizamientos han ocurrido en el cerro Cristo Rey, zona gobernada por una dinámica de bloques que constantemente están en movimiento relativo, por lo que los materiales térreos se encuentran muy fracturados.

Salas y Turkstra [1992] realizaron un estudio con el objetivo de definir zonas amenazadas en el área urbana de Villavicencio, donde plantean que uno de los factores principales para la generación de fenómenos de remoción de masa en la ciudad es la actividad tectónica que produce sismicidad. Dicha actividad sísmica produce inestabilidad en los taludes que puede generar caída de rocas, deslizamientos y erosión, dependiendo de la pendiente. La pluviosidad existente en la zona incrementa el contenido de agua del suelo, haciéndolo más susceptible a la erosión; sin embargo, en dicho trabajo encontraron zonas donde, debido a la cantidad significativa de la vegetación y los procesos de forestación, el suelo está protegido del poder destructivo del agua.

En dicho trabajo se delimitaron zonas amenazadas por canales de agua que han sido el resultado de diferentes fenómenos interrelacionados entre sí (desprendimiento de material e inundaciones); sin embargo, no fue posible determinar la magnitud de esos eventos en alta, media y baja, ya que la intensidad de estos fenómenos no siempre es la misma para caracterizarlo con un nivel determinado. Salas y Turkstra responsabilizan a los planificadores locales de falta de cono-

cimiento de las zonas amenazadas en Villavicencio y de no imponer restricciones al crecimiento de la ciudad, situación que se ve reflejada en la pérdida de vidas humanas y daños en la infraestructura de la ciudad ocasionados por los deslizamientos [Salas y Turkstra, 1992].

En el estudio del Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S. A [Microzonificación de Villavicencio, 2000] se realizó un plano de pendientes categorizadas en pendientes de 25% al 50% y pendientes mayores al 50% en la zona urbana de Villavicencio. Con este plano se estableció que las pendientes de las zonas donde habían sucedido deslizamientos son menores en muchos sitios a las de otras zonas que poseen los mismos materiales constitutivos. Con ello fue posible determinar el panorama crítico debido a la alta susceptibilidad que tiene Villavicencio en cuanto a deslizamientos. Dicha concentración de zonas susceptibles a deslizamiento con pendientes entre 25% -50% se ubicaron en zonas de rocas blandas fracturadas y las de pendientes mayores de 50% en rocas más resistentes de las formaciones Cáqueza, Une, Chipaque y La Corneta, ubicadas en la zona montañosa al occidente de Villavicencio. De esta manera se verifica la hipótesis de alta susceptibilidad al deslizamiento.

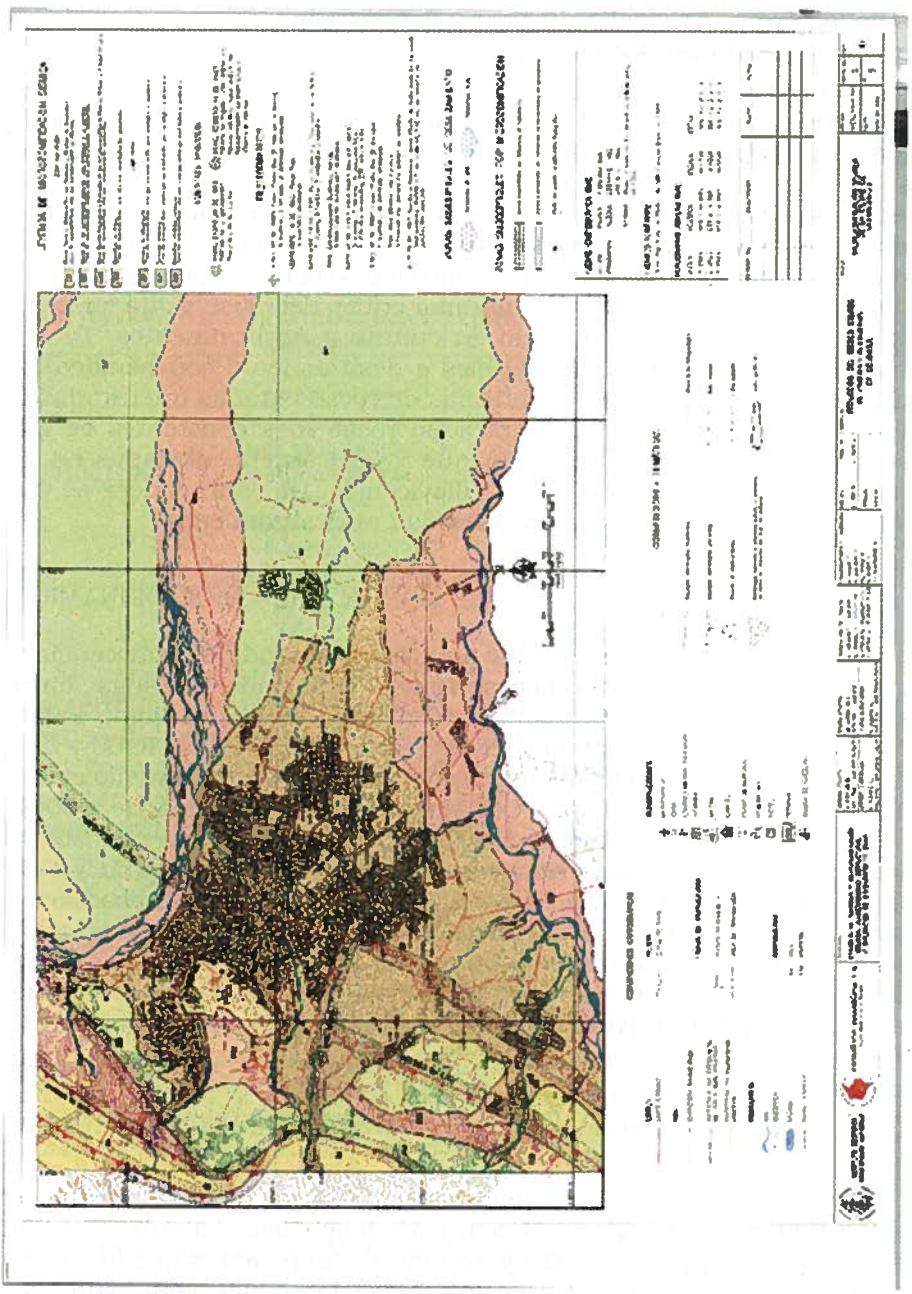
5. Zonificación Morfodinámica

Dada la grave problemática que aqueja a la ciudad de Villavicencio y a otras ciudades colombianas, se vienen realizando investigaciones para la microzonificación sísmica de algunas ciudades como Pasto [Pantoja et al., 2000], Barrancabermeja [Calpa et al., 2000, IGUJ y CC, Microzonificación de Barrancabermeja, 2000], Ibagué [Jaramillo et al., Marco tectónico, 2000, IGUJ y CC, Microzonificación de Ibagué, 2000], Neiva [Pinto, 2000, Pabón et al., 2000], Tunja [Guacaneme, 2000, Jaramillo et al, amenazas sísmicas, 2000], Villavicencio [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000]. Todos estos estudios hacen parte de un proyecto de reducción de riesgo sísmico en Colombia [Alfaro et al., 2000]. Vale la pena comentar que las consecuencias de los eventos sísmicos se ven agravadas por los asentamientos subnormales como resultado del conflicto armado colombiano [Alfaro et al., reducción, 2000].

En Villavicencio se han determinado cuatro sub-zonas (IM, IIM, IIIM y IVM) en la zona montañosa y tres sub-zonas (IP, IIP y IIIP) en la zona plana, con diferentes grados de susceptibilidad al deslizamiento (figura 3).

La sub-zona IM está compuesta por rocas duras de las formaciones metamorfitas de Quetame y Brechas de Buenavista. La sub-zona IIM esta conformada por rocas un poco menos competentes que las anteriores (areniscas con intercalaciones de lodolitas y conglomerados) de las formaciones Cáqueza, Une, Chipaque y La Corneta. La sub-zona IIIM está compuesta por rocas blandas fracturadas y replegadas (lodolitas y lutitas con intercalaciones de arenisca) de las formaciones lutitas de Macanal, Fómeque y el grupo Palmichal. La sub-zona IV está compuesta por depósitos de talus y en otros sitios, como en el caso del

FIGURA 3. Zonificación morfodinámica de Villavicencio



Fuente: [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000]

cerro de Cristo Rey, consiste de cerros conformados por materiales de terrazas aluviales. La descripción de las sub-zonas correspondientes a la zona montañosa es mostrada en la tabla 4.

TABLA 4. Zonificación morfodinámica en la zona montañosa de Villavicencio

Sub-zona	Descripción	Susceptibilidad
IM – Rocas Duras – Metamorfitas de Quetame y Brechas de Buenavista	Cuarcitas; filitas verdes, grises y moradas; metalimolitas; en menor proporción, esquistos sericíticos y cloríticos. Se incluyen brechas y conglomerados cementados (cemento silíceo o calcáreo), clastosoportados, en cuyo esqueleto predominan fragmentos angulosos a semiredondeados de pizarras, filitas, y esquistos, y en menor porcentaje, fragmentos de conglomerados. El tamaño de los fragmentos varía entre gravas y bloques.	Baja
IIM – Rocas de las formaciones Cáqueza, Une, Chipaque y La Corneta	Se trata de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso con intercalaciones de lodolitas de color gris verdoso a gris oscuro. Se incluyen también conglomerados compuestos por fragmentos con tamaños que varían entre cantos y bloques, de cuarcita, arenisca y lodolita en matriz arenosa gruesa.	Medio-Alta
IIIM – Rocas Blandas Fracturadas y replegadas de las formaciones lutitas de Macanal, Fómeque y el Grupo Palmichal	Consta de lodolitas gris oscuras o lutitas de color negro, laminadas y con delgadas intercalaciones de arenisca de grano medio. En algunos sitios se encuentran capas delgadas de conglomerados. Los niveles arenosos son friables a muy friables.	Alta
IVM – Depósitos de Talus	Material transportado de la parte alta de las laderas, con predominio de la gravedad. En algunos sitios pueden estar conformados por cerros constituidos por terrazas aluviales.	Muy Alta

Fuente: [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000]

La sub-zona IP está conformada por los materiales del abanico de Villavicencio; el tamaño de grano varía desde grueso, en las partes cercanas a las estribaciones de la cordillera, hasta fino, en las partes más alejadas. La sub-zona IIP está constituida por materiales de las terrazas aluviales compuestas por gravas con poco contenido de arena, localizadas en ambas márgenes del río Guatiquía. La sub-zona IIIP está conformada por depósitos aluviales recientes constituidos por fragmentos de rocas sedimentarias con un alto porcentaje de matriz areno-arcillosa. La descripción de las sub-zonas correspondientes a la zona plana es presentada en la tabla 5.

TABLA 5. Zonificación morfodinámica en la zona plana de Villavicencio

Sub-zona	Descripción	Susceptibilidad
IP – Abanico de Villavicencio	Cono o terraza aluvio-torrencial de características heterogéneas. Así, en las partes cercanas a las estribaciones de la cordillera, consiste en materiales gruesos que han sido arrastrados de las partes altas por acción de la gravedad y las corrientes de agua; alejándose un poco más de la cordillera, el material consiste en cascajo y gravilla; finalmente, en las partes más alejadas de las estribaciones se encuentran materiales más finos, como arenas, limos y arcillas.	Baja
IIP – Terrazas Aluviales	Compuestas por gravas con muy poco contenido de arena. Estos depósitos son producto de eventos torrenciales recientes como flujos de lodo, escombros o avalanchas de origen fluvial. Se localizan en ambas márgenes del río Guatiquía.	Media
IIIP – Depósitos Aluviales Recientes	Constituidos por fragmentos de rocas sedimentarias con un alto porcentaje de matriz areno-arcillosa. Se hallan a lo largo de los ríos Guatiquía, Ocoa y Upín.	Alta

Fuente: [IGUJ y CC, Microzonificación de Villavicencio, 2000]

6. CONCLUSIONES DE LA ZONIFICACIÓN MORFODINÁMICA

Villavicencio se encuentra ubicada en una zona en la que predomina un número significativo de fallas activas como el sistema de fallas frontal de la cordillera oriental (Sistema de fallas de Guaicáramo), que en los últimos años ha sido fuente de eventos sísmicos de una magnitud apreciable como el ocurrido en enero de 1995 en la población de Tauramena. El silencio sísmico presente al frente de Villavicencio en el Sistema de fallas de Guaicáramo hace reflexionar sobre la posibilidad de generación de un sismo de gran magnitud (>7) debido a la liberación de energía acumulada que no ha sido liberada gradualmente.

Se ha encontrado a través de la interpretación de fotografías aéreas el lineamiento de la falla de Villavicencio, interceptada en el centro de la zona urbana de la ciudad por la falla del caño Buque, indicando un posible movimiento relativo de esta última. Sin embargo, se observa que el trazo de estas fallas está cubierto por sedimentos del abanico de Villavicencio, demostrando que es posible la actividad de estas fallas después del Cuaternario. Además de las anteriores fallas, se delimitaron en Villavicencio la falla de Colepato, la falla Bavaria y la falla El Mirador.

A través de la fotointerpretación y del análisis de la bibliografía consultada se caracterizaron los materiales del subsuelo. Para analizar la posible generación de fenómenos de remoción en masa con base en el conocimiento que se tiene de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas, estas se dividen en zona de montaña y zonas planas.

La alta concentración de zonas susceptibles a deslizamiento con pendientes entre 25% y 50% en zonas de rocas blandas y fracturadas al noroccidente de la ciudad hace que sea un factor preocupante, ya

que se encuentra en la zona de acceso de Villavicencio desde el centro de Colombia y es el sitio de convergencia del oriente con el centro del país. Si se generara allí un deslizamiento de grandes proporciones, el intercambio económico de la región oriental sufriría un colapso, además de las personas que pueden resultar damnificadas.

En la zona donde se presentan pendientes topográficas mayores del 25% pasan algunas corrientes de agua naturales; es importante observar que si se presenta un deslizamiento de los materiales que tienen esta pendiente podría generarse un estancamiento de esta agua (caños Parrado y Maizaro), generando a su vez avalanchas que podrían afectar a los habitantes aguas abajo de dichos cauces naturales con flujos de lodos.

Finalmente, es imprescindible reconocer la conveniencia de que una ciudad de tal importancia económica para el país tenga un estudio de microzonificación sísmica que se constituya en una herramienta de planeación para su desarrollo urbanístico y que sirva de base para las medidas de prevención y atención de desastres de tipo natural.

REFERENCIAS

Alfaro, A., Franco, A. Torres, A. "Desastres naturales y desplazados en Colombia - de desastre natural a catástrofe social". Memorias del XX Congreso Nacional de Facultades de Ingeniería, 2000.

Alfaro, A, Junco, J, Franco, A. Torres, A. "Reducción del riesgo sísmico de ciudades intermedias en Colombia. Retos y limitaciones". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Calpa, C., Jaramillo, M., Florez, H. "Amenaza sísmica y por inundaciones en Barrancabermeja". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Caro, P., García, J. *Estudio geológico - geotécnico del Cerro de Cristo Rey.* Bogotá: Ingeominas, 1987.

Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. *Base digital de Villavicencio.* Bogotá: DANE, 1999.

Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). "Plancha 288-II-B Escala 1:25.000". Bogotá: IGAC, 1983.

Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). "Plancha 288-II-D Escala 1:25.000". Bogotá: IGAC, 1983.

Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). "Plano urbano de la ciudad de Villavicencio. Escala 1:10.000". Bogotá: IGAC, 1992.

Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). Subdirección de Investigaciones y Divulgación Geográfica. *Diccionario geográfico de Colombia.* Bogotá: IGAC, 1996. En: CD ROM.

Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). "Fotografías aéreas 64 - 68, 77 - 81 y 84 - 88 del Vuelo C-2627", 1997.

Cortés, R. y De La Espriella, R. "Apuntes sobre la tectónica del valle del río Negro al oriente de Cundinamarca". En: Geología Colombiana, 17, 1990, pp. 133-142.

Coyné et Bellier y Consultoría Colombiana. "Diagnóstico del riesgo sísmico para los túneles y estructuras de la carretera Bogotá Villavicencio". Informe de Progreso No 4. Bogotá, 1995.

Cuellar, J., Dimaté, C., Duarte, J. "Estudio de la Actividad Sísmica del Sistema de Fallas de Guaicáramo entre Villavicencio (Meta) y Aguaclara (Casanare)". Bogotá: Ingeominas, 1988.

Dorado, J., "Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la formación Brechas de Buenavista (Límite Jurásico - Cretáceo), región noroeste de Villavicencio (Meta)". En: Geología Colombiana, 17, 1990, pp. 7 - 40.

Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, SEDIC, "Consultores Civiles e Hidráulicos. Aprovechamiento Hídrico del macizo de Sumapaz, Etapa río Blanco, Anexo C, Sismología". Bogotá, 1989.

Escobar, P. "Microzonificación sísmica preliminar de Ibagué". Proyecto de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2000.

Guacaneme, J.J. "Microzonificación sísmica preliminar de Tunja". Proyecto de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2000.

Ingetec. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. "Licitación G110 conducción y central subterránea. Apéndice B. Geología e Investigación del subsuelo". Vol 3 y 4. Estudio realizado para la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. Bogotá, 1980.

Ingeominas. "Plancha 266 Villavicencio". Escala 1:100.000. Bogotá, 1996.

Ingeominas y Universidad de los Andes. "Proyecto de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto N° 3, Estudios tectónicos y neotectónicos". Convenio 01.93 OPES - DNPAD – Ingeominas, 1996.

Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana. "Microzonificación sísmica preliminar de Barrancabermeja". Memoria Técnica. Bogotá, 2000.

Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana. "Microzonificación sísmica preliminar de Ibagué". Memoria Técnica. Bogotá, 2000.

Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana. "Microzonificación sísmica preliminar de Villavicencio". Memoria Técnica. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Jaramillo, M., Escobar, P., Ramos, A. "Marco tectónico y amenaza sísmica de Ibagué". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Jaramillo, M., Pabón, G., Ramírez, O., Guacaneme, J. J. "Amenazas sísmicas y geotécnicas en Tunja". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000.

Pabón G., Jaramillo, M., Calpa, C., Pinto, R. "Modelo geológico y geotécnico de Neiva". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Pantoja, J., Calpa, C., Coral, H., Alfaro, A. "Riesgo sísmico y amenaza volcánica en la ciudad de Pasto". Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2000. Disponible para consulta en: http://metis.javeriana.edu.co/digit/geo/bddc.html.

Pinto, R. "Microzonificación sísmica preliminar de Neiva". Proyecto de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2000.

Pujades, L. *Memorias del curso estructuras sometidas a acciones dinámicas*. Barcelona, 1999.

Ramírez, J. "Macrosismo del Huila". En: *Revista Javeriana*, 333, 1967, pp. 323-333.

Ramírez, J. "Historia de los Terremotos en Colombia". Mimeo. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Investigaciones y Divulgación Geográfica. Bogotá, 1975.

Salas, J. y Turkstra, J. "Urban Analysis in Hazards Zones Using Aerial Photografs and Geo-information System, Villavicencio". Memorias del Segundo Simposio Latinoamericano de Riesgo Geológico Urbano. II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Vol 1. pp. 357-375. Pereira, 1992.

Sin autor. "Seis muertos por alud en Villavicencio". En: *El Tiempo*, 79, 06/12/1990.

Sin autor. "Damnificadas 16 familias". En: *El Tiempo*, 81, 09/16/1992.

Sin autor. "El invierno deja un muerto en Villavicencio". En: *El Tiempo*, 85, 11/21/1996.

Sin autor. "Tres muertos por avalancha en Villavo". En: *El Tiempo*, 86, 05/28/1997.

Sin autor. "Filtración de aguas causó la tragedia en El Espejo". En: *Llano 7 días*, 06/10/1997.

Sin autor. "En riesgo el acueducto". En: *Llano 7 días*, 07/22/1997.

Sin autor. "Terremoto sacudió la Catedral, Especial 100 años de historia de Villavicencio". En: *Llano 7 días*, 05/04/1999.

Ulloa, C., Rodríguez, E. "Geología del cuadrángulo K12, Guateque". En: *Bol. Geol.*, 12 (1), 3-55, 1979.

United States Geological Survey. "Catálogo de Terremotos para América del Sur. Proyecto del CERESIS". En: http://www.earthquake.usgs.gov. Fecha de consulta: Junio de 2000.