

3. APLICACIONES SIG EN ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA CIUDADES INTERMEDIAS. CASO TUNJA, BOYACÁ

Jorge Luis Rodríguez González
Diego Fernando Gualdrón Alfonso

3.1 Introducción

Tunja está ubicada en una región de amenaza sísmica intermedia, registra varios eventos sísmicos durante los cuales se han presentado daños significativos en algunas zonas específicas de la ciudad, especialmente, en el centro histórico, que data de los años de 1500 d.C., donde se ubican la sede de la Alcaldía Mayor de Tunja y la gobernación de Boyacá, entre otros principales edificaciones de entidades administrativas, museos, parques, iglesias y monumentos históricos de la época de la colonia, demandando gran concentración de ciudadanos en las horas del día.

El crecimiento urbano se ha desarrollado principalmente en el flanco oriental y en la zona plana del eje del sinclinal para uso residencial y comercial, con edificaciones que superan los 5 pisos de altura y con alta densidad poblacional.

El proyecto es necesario, ya que toda capital de departamento en Colombia, deberá disponer de los estudios de microzonificación sísmica con el objetivo de contar con las herramientas e instrumentos para organizar y ejecutar el Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Así mismo, para los constructores y diseñadores, es fundamental conocer las propiedades y características de los suelos y los espectros de diseño estructural (respuesta del suelo ante un evento sísmico). Para los Consejos Departamentales, Distritales y Municipales para la gestión del riesgo acompañados por la ingeniería geotécnica, es indispensable localizar las zonas potenciales de suelos expansivos, licuación y movimientos de remoción en masa con el fin de delimitar zonas susceptibles de inestabilidad.

Los resultados de la microzonificación sísmica, beneficiarán a la población de Tunja en general, dado que permitirán determinar con mejor precisión las recomendaciones en el diseño y la construcción de edificaciones nuevas, así como las pautas para el reforzamiento estructural de las edificaciones antiguas.

La microzonificación sísmica será la base para la elaboración de los planes de prevención y atención de desastres en caso de un sismo, generando un nuevo conocimiento en el área de geotecnia y estructuras ante el comportamiento del suelo en Tunja en presencia de ondas sísmicas.

El presente proyecto de Modelo Piloto de Microzonificación, establece las bases para alimentar la geodatabase geotécnica, permitirá la validación de la caracterización de los suelos con la construcción de perfiles geotécnicos y así tener un acercamiento a una modelación en 3D del suelo de la ciudad.

Es necesario resaltar, que en la actualidad se desarrollan las modelaciones geotécnicas y sísmicas por parte del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geo ambientales (GIISAG) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja, con el fin de encontrar los espectros de diseño estructural para las diferentes zonas de la ciudad de Tunja; por tal motivo, los datos e información en este aspecto estarán sujetos al avance de dichas modelaciones. Los ensayos geofísicos en campo con el fin de determinar la velocidad cortante de onda de diferentes estratos, estudio de microtrepidaciones y el análisis para la generación de los coeficientes de aceleración dependen del avance del convenio suscrito entre la Alcaldía de la ciudad y el grupo de investigación GIISAG, debido a los altos costos y tiempo para la ejecución de los mismos; por tal motivo, se plantea un modelo inicial de microzonificación para la ciudad de Tunja, actualizando la geotadabase en el momento de contar con los resultados de dichos ensayos.

3.2 Antecedentes

Colombia, por su posición geográfica, es atravesada por la cordillera de Los Andes, en la cual se encuentran situadas las más importantes capitales de departamento, centros de producción industrial y grandes centros poblados. El país bordea el Cinturon de Fuego del Pacífico donde chocan las placas de Nazca y Suramericana y en la costa Atlántica; limita con la placa Caribe, motivos por los cuales se encuentra expuesto a diferentes fenomenos naturales como sismos, tsunamis, y deslizamientos entre otros (López Ramírez, Reyes Echeverria, y Ramírez, 2001).

El 31 de marzo de 1983, la ciudad de Popayán (ubicada al suroeste del país), sufrió un sismo de magnitud 5.5 en la escala de *Richter*, dejando aproximadamente 300 muertos y más de 10,000 personas damnificadas (Cardona Arboleda Omar Darío, 2004). A raíz de la ocurrencia del sismo, con la Ley 11 de 1983, se promulgan las pautas de reconstrucción de dicha

ciudad, así mismo, dá origen al Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84 mediante el Decreto 1400 de 1984 (Contreras, 2018).

En el año de 1997, la Unidad de Prevención y Atención de Emergencias (UPES), el Instituto en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, atendiendo la solicitud distrital de generar una estrategia para la prevención y atención de desastres por riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá, presentan los resultados del convenio: Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá donde se delimitan 5 zonas de comportamiento homogéneo del suelo en la ciudad.

Cada zona establece parámetros particulares para el diseño y construcción de edificaciones y líneas vitales (UPES, INGEOMINAS, y UNIANDES, 1997).

A través del tiempo el CCCSR-84, demostró ser insuficiente y debió ser actualizado. Por esta necesidad, fue aprobada por el Congreso de la República la Ley 400 de 1997, que corresponde al Reglamento de Construcción Sismo Resistente (AIS, 1997), sustituyendo al CCCSR de 1984.

El 25 de enero de 1999, el eje cafetero de Colombia, que corresponde a los departamentos de Quindío, Risaralda y Caldas, ubicados sobre la Cordillera Central de los Andes, sufrió un sismo con magnitud de 6.4 grados en la escala de *Richter*. La ciudad de Armenia, capital del departamento del Quindío, fue la más afectada con cifras aproximadas de 1,000 muertos, 4,000 heridos y cerca de 13,000 edificaciones afectadas (Cardona Arboleda Omar Darío, 2004).

El Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, promulgó El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) (AIS, 2010). Posteriormente, al Decreto 926 de 2010, han sido introducidas modificaciones en los Decretos 2525 del 13 de julio de 2010, 092 del 17 de enero de 2011 y 340 del 13 de febrero de 2012.

En la NSR-10, se incluye un nuevo mapa de sismicidad elaborado por la Red Sismológica Nacional, que permitió identificar de manera más acertada las zonas de amenaza sísmica en Colombia. Para realizar este mapa, se registraron entre 1995 y el 2009 alrededor de 22,000 eventos adicionales que permitieron realizar un mejor estimativo (Aguirre Patiño María Fernanda, 2012).

Tunja, capital del departamento de Boyacá, ha registrado en los últimos 30 años 3 sismos de baja intensidad. Así mismo, la ciudad se encuentra a 160 km de La Mesa de los Santos, en dicha zona, se encuentra el nido sísmico de

Bucaramanga, donde se presenta el 50% de los movimientos telúricos que se registran en el país. La razón de esta actividad es que muy profundamente hay una gran lámina de rocas que todavía está fría y que al romperse producen sismos (Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2000).

La NSR – 10 (AIS, 2010), establece que para capitales de departamento localizadas en zona de amenaza intermedia y alta, deberán armonizar los instrumentos de planificación para el ordenamiento territorial con un estudio de microzonificación sísmica. En la actualidad la ciudad de Tunja (Colombia), cuenta con datos de caracterización geotécnica y geológica de forma dispersa y sin ningún tratamiento geoespacial que establezca información base para la toma de decisiones de planificación.

Según el Instituto Geofísico Universidad Javeriana (2000), en los últimos 500 años se han presentado un número importante de eventos sísmicos en la zona de estudio. Catálogos sísmicos del Programa para la Mitigación de los Efectos de los terremotos de la Región Andina (SISRA), registran 253 temblores entre 1643 y 1981, con magnitudes variables entre 2.0 y 5.5 con un promedio de un sismo cada dos años. Catálogos del *Preliminary Determination of Epicenters* (PDE), muestran que entre 1973 y 2005, se presentaron en la misma zona 28 sismos con magnitudes que varían de 3.7 a 5.8 con un promedio aproximado de un sismo por año.

3.3 Estado del arte

En un recuento mundial de estudios de microzonificación sísmica, en el Norte de Anatolia, Turk, Gümüşay y Tatar (2012), analizaron la importancia del uso de las fotografías aéreas en los estudios de microzonificación sísmica, y la integración de los datos en un SIG. Estos autores desarrollan un modelo basado en el uso de los SIG con el objetivo de determinar las zonas urbanas de Erbba (Turquía), con riesgo de desastre por fenómenos naturales. Así mismo, es la herramienta base para los posteriores estudios de microzonificación sísmica y planeamiento del territorio urbano.

Mediante la evaluación e integración de datos geotécnicos, geológicos, fotografías aéreas, datos topográficos, historia de eventos sísmicos, microtemblores y exploraciones geotécnicas entre otros parámetros, es posible detectar zonas potenciales de licuefacción del suelo en el área de estudio. Sin embargo, se encontró en la evaluación de fotografías aéreas de 1972 y 2006, y la integración de estos datos con los SIG, que una urbanización considerablemente densa se ha desarrollado cada vez más hacia

la localización de la falla geológica. El estudio reveló las zonas potenciales para la licuefacción del suelo.

Turk et al. (2012), presentan una metodología de microzonificación donde el eje fundamental de análisis y generación de resultados es el SIG. Como complemento, el estudio incorpora la herramienta Model Builder de ArcGIS 9.2 con el fin de facilitar las operaciones de análisis espacial y delimitación de zonas con riesgo de terremotos.

Los resultados son los mapas de dirección del crecimiento urbano de la ciudad, zonas de potencial licuefacción, el porcentaje de edificaciones en riesgo por sismo y recomendaciones para la ubicación de nueva infraestructura.

Según Turk (2009), los desastres están directamente relacionados con la ubicación geográfica. Por lo tanto, los datos geográficos antes y después de un desastre son necesarios para estimar la vulnerabilidad antes del evento y cuantificar los daños después de él. La adquisición precisa y rápida de estos datos tiene un directo impacto en el éxito de los planes para el futuro. En tales casos, fotografías aéreas e imágenes de satélite han sido aceptadas como fuentes de datos geográficos indispensables.

Por lo tanto, para que las medidas necesarias puedan ser tomadas en el menor tiempo y con la mayor eficiencia, se requiere de la integración entre las fotografías aéreas, las imágenes de satélite, los datos geológicos y los datos geotécnicos en un entorno SIG. La confiabilidad de los datos que se introducen en un SIG es parte fundamental en los procesos de análisis geográfico, estos se obtienen a partir de fuentes diferentes, como fotografías aéreas, imágenes de satélite, escaneo láser, sistemas de posicionamiento global (GPS), mediciones terrestres y digitalizaciones de mapas, los cuales deberán tener un tratamiento y procesamiento especial.

Las investigaciones sobre ingeniería geotécnica son en casos específicos investigaciones que abarcan una extensión espacial muy grande, en este tipo de estudios, donde los componentes de análisis espacial son muy densos, los SIG, han surgido como ayuda fundamental; sin embargo, el avance científico de los SIG se ha enfocado con más rigurosidad en disciplinas tales como: Ingeniería ambiental, ordenamiento territorial, cartografía y ciencias agropecuarias. Este hecho muestra que, aunque existen avances de SIG en geotecnia, estos avances han sido lentos y no han llamado la suficiente atención de los desarrolladores de software para SIG que permitirán avances

más rápidos y accesibles a toda la comunidad en temáticas específicas como la modelación en 3D.

Por ejemplo, Kaufmann y Martin (2008), presentan una metodología la cual permite integrar mapas geológicos, perfiles estratigráficos 2D, registros de exploraciones del subsuelo y demás datos análogos y digitales de uso común con el fin de construir un modelo 3D geológico a través de herramientas SIG denominadas *Geomodeler*. Las herramientas base de la metodología propuesta es la creación de una base de datos con los atributos de cada pozo de exploración, luego con ArcGIS, se elaboran los límites y extensiones de las formaciones geológicas, se digitalizan los perfiles o cortes geológicos y se fabrica el modelo digital de elevación; y el *Geomodeler* realiza la interacción e integración de los datos, permite reinterpretación y validación del modelo 3D.

Otros estudios como el desarrollado por Jiménez, García-Fernández, Zonno, y Cella (2000), han integrado modelos geológicos 3D como insumo para la modelación de eventos sísmicos en proyectos de microzonificación.

En el proyecto de microzonificación sísmica de Bucarest, Kienzle et al. (2006), implementaron herramientas SIG para el modelamiento 3D de la geología e hidrogeología de la ciudad, denominado Modelo Digital Geológico (MDG), a partir de información de exploraciones geotécnicas, digitalización de mapas, cortes geológicos y bases de datos de sondeos geotécnicos a diferentes profundidades. Las herramientas SIG empleadas fueron interpolación *Kriging* y extensión TOPOGRID de ESRI. El modelo resultante incluye no solo información acerca de la profundidad y espesor de las diferentes unidades geológicas, sino también los datos hidrogeológicos.

Otros estudios presentan metodologías más complejas para la integración de herramientas SIG en los estudios de microzonificación sísmica. Nath (2005), incluye dentro de su metodología la ponderación o pesos a los atributos espaciales de: Pendiente, tipo de suelo, litología, deslizamientos, respuesta del sitio, aceleración máxima del terreno y resonancia, para finalmente realizar análisis de superposición, combinación e integración entre las capas resultantes.

Los actuales estudios de microzonificación sísmica con herramientas SIG, están basados en metodologías particulares adaptados a las singularidades de cada región y a los datos espaciales disponibles. Karimzadeh, Miyajima, Hassanzadeh, Amiraslanzadeh, y Kamel (2014), presentan una metodología

basada en 3 pasos: Elaboración de la geodatabase con la inclusión de la mayor cantidad de atributos espaciales, análisis sísmico y análisis de vulnerabilidad.

En la primera etapa se emplean herramientas de interpolación espacial (*kriging*), para elaborar los mapas temáticos de geología, topografía, pendientes, profundidad del aluvión, profundidad del nivel freático y el mapa de material sedimentario. Dentro del análisis sísmico, *ArcGIS* es empleado como herramienta para generar el mapa de sismos denominado: *Ground Shake Map* (GSK), insumo inicial dentro de la metodología *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) empleada en zonas de alta actividad sísmica. En la tercera etapa, análisis de vulnerabilidad, *ArcGIS* permite superponer las capas de: Tipo de construcción (acero, mampostería, concreto, etc.), mapa de terremotos, población y con el apoyo de las curvas de fragilidad de cada tipo de material de construcción determina el porcentaje de daño para cada escenario propuesto.

3.3.1 Experiencias internacionales

Kılıç, Özener, Ansal, Yıldırım, Özaydın y Adatepe (2006), llevaron a cabo en Turquía una investigación donde el SIG fue capaz de almacenar información geotécnica de 107 sondeos, que incluyen ensayos estáticos y dinámicos de laboratorio y campo, análisis de la tectónica del sitio, análisis de agua subterránea y nivel freático, análisis de pendientes y lecho de roca. La evaluación dinámica con SIG, consistió en realizar el mapeo de la variación de la velocidad de onda de corte, clasificación de sitios, análisis de respuesta en sitio, simulación de sismo, análisis de la microzonificación respecto al movimiento del suelo y evaluación de los mapas de microzonificación sísmica. El estudio determinó, además de la microzonificación sísmica, la gran capacidad de los SIG para almacenar y analizar información georreferenciada.

En Asia, en la región China de Wushan, Li y Zhou, (2012), realizaron un estudio de estabilidad de taludes en donde los datos más representativos fueron *raster* representados en Modelos Digitales de elevación (MDEs), y mapas de pendientes dentro de un marco de base de datos geográfica de un SIG, el cual fue denominado *Wushan County*. Para este estudio se determinaron distintos métodos de cálculo estadístico apropiados para los materiales presentes en el sitio, se realizó con el SIG un análisis de fenómenos de remoción en masa con los datos *raster* que fueron vectorizados para obtener una mejor visualización. *Wushan County*, ahora es una fuente de consulta y toma de decisiones ingenieriles para la zona de estudio debido a su alta capacidad de

actualización, este hecho fortalece el uso de la teledetección y los datos *raster* en estudio de la geotecnia y la geología.

Hoy en día se encuentran en auge las investigaciones del suelo y del subsuelo con SIG, la ingeniería geotécnica, demanda cada vez más de caracterizaciones del suelo y de su modelamiento para adelantar proyectos de carácter ambiental o de nuevas infraestructuras, es así como en Asia se ha hecho un uso extensivo de los SIG aplicados a la geotecnia, evidencia de esto son investigaciones como la realizada en la ciudad de Mumbai (India), por MHASKE, S.Y y CHOUDHURY, D. (2011), sobre las velocidades de onda de corte en el suelo como aporte al estudio macro de amenaza sísmica de la ciudad, determinando que el suelo posee velocidades de onda de corte entre los 110 y 350 m/s, la información necesaria para la investigación proviene principalmente de 400 sondeos almacenados en una base de datos, graficada en mapas de contorno de velocidad, analizada espacialmente y validada, todo por medio de un SIG.

Otro ejemplo se presenta en China, donde Cheng, Zhang, y Peng (2013), han comprobado la validez de los SIG en estudios geotécnicos. En esta investigación se utilizó *ArcGIS* para determinar la amenaza geológica. Se compararon los resultados del software con los fenómenos naturales ocurridos, encontrando una similitud bastante alta validando finalmente los SIG en este tipo de estudios de evaluación de indicadores cualitativos.

Estos indicadores incluyen datos cuantitativos los cuales pueden ser: Inclinación y altura de la pendiente o la precipitación; estos deben ser clasificados de acuerdo con un índice de evaluación. Por lo tanto, los indicadores deben tener un valor de importancia asignado. Por ejemplo, para el gradiente, altura y tipo de pendiente, estructura de la roca y suelo, vegetación, precipitación, e impacto de las actividades humanas de la ingeniería.

Una ventaja importante de los procesos con SIG son las herramientas de análisis espacial y geoestadística. En diversas partes del mundo se han usado este tipo de herramientas. Entre ellos se destaca el realizado en Tokio (Japón), Pokhrel, Kuwano, y Tachibana (2013), quienes desarrollaron una metodología por medio del método *Kriging*. Se interpolan datos provenientes de múltiples sondeos para calcular el potencial de licuefacción en ubicaciones no muestreadas. Este estudio determinó que el método de interpolación *Kriging*, es un método adecuado e imparcial para interpolar valores de potencial de licuefacción en el sitio de estudio.

En la ciudad de Gyeongju (Corea del Sur) Sun, Chun, Ha, Chung, y Kim, (2008), desarrollaron una herramienta SIG denominada “Sistema de información geotécnica GTIS” con el fin de predecir amenazas sísmicas. El pilar de esta investigación fue el uso del método geoestadístico *Kriging*, para la interpolación de variables como cotas topográficas, lecho de roca, coeficientes de aceleración de ondas, entre otras. Esta investigación comparó el análisis de los datos con otros tipos de interpolación tradicionales, concluyendo que el *Kriging*, es el método de interpolación más acertado en las predicciones. Así se verificó la utilidad de la GTIS, como instrumento regional de síntesis para su uso en la planificación de los riesgos sísmicos. Finalmente, el aplicativo realizó la visualización correspondiente de los resultados por medio de mapas temáticos. Aplicativos como el mencionado anteriormente, definiendo proyectos de gran envergadura en los cuales la información necesaria para el estudio no proviene de un único trabajo de investigación.

En un estudio en el canal de Zayed, Labib y Nashed (2013), determinaron el potencial de expansión del suelo, mediante la creación de una base de datos geoespaciales con las propiedades de las arcillas presentes en la zona de estudio, para luego modelar por medio de mapas las propiedades de estas, en la zona de estudio. Concluyendo que los SIG pueden ser utilizados con eficacia con el fin de visualizar y analizar los resultados de los estudios experimentales y de inspecciones *in situ*, como se evidencia en su estudio acerca del suelo expansivo en la región de Toshka (Egipto), esta afirmación es coincidente con resultados de otras investigaciones similares donde se ha de resaltar el de Cartaya, Méndez, y Pacheco, (2006). En este documento sobre la modelación de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, los autores concluyen que las aplicaciones SIG, son una herramienta fundamental cuando se requiera modelar diversas variables, principalmente por la gran cantidad de datos que es posible procesar con el fin de realizar procesos de superposición y álgebra de mapas como resultados cartográficos finales.

La difusión de la información para compartir con usuarios expertos y no expertos, es otro camino que han tomado los SIG, con el fin de profundizar más en los estudios de microzonificación y que expertos del tema puedan re-orientar dichas investigaciones.

La funcionalidad de los paquetes *WebGIS*, es difundir datos geográficos entre el público general y específico del área de interés, sin la necesidad de contar con software SIG, de tal forma que se realicen consultas interactivas en línea.

Más de 30 diferentes paquetes *WebGIS*, están disponibles en la actualidad (Pessina y Meroni, 2009). Entre estos, los más populares y de éxito comercial son: *ESRI*, *ArcIMS*, *Intergraph*, *GeoMedia Mapa web* y *AutoDesk MapGuide*; mientras que la *UNM MapServer*, es una aplicación de código abierto que ha sido ampliamente adoptada. En los análisis de riesgo por sismo, donde un alto nivel de criterios de profesionales multidisciplinarios e interdisciplinarios se requiere, la tecnología *WebGIS*, permite interactuar de forma sincrónica y asincrónica de tal manera que los aportes enriquezcan los resultados finales de los estudios. Así mismo, la constante actualización de las bases de datos provee resultados más precisos y accesibles a la población objetivo.

3.3.2 Experiencias regionales

En Latinoamérica se valida la importancia de los SIG en la geotecnia, Cartaya et al., (2003), sostienen que los SIG son un apoyo importante y eficaz para la modelación de diferentes variables por su capacidad de procesar grandes volúmenes de información, su capacidad de generar topología y la habilidad de superposición de escenarios mediante técnicas de álgebras de mapas. Esta afirmación coincide con Torres, Suescún, y Castillo (2006), quienes manifiestan que los SIG tienen características que los hacen un apoyo muy importante en diferentes proyectos de la ingeniería civil, así mismo, su uso no ha sido totalmente explorado desaprovechando el gran potencial de estos en la resolución de problemas ingenieriles, principalmente, por el poco conocimiento de dichas herramientas, lo planteado anteriormente deja abierta la discusión del uso de tecnologías modernas como los SIG en metodologías tradicionales de análisis avanzados en las ciencias de la tierra.

Finalmente, en Colombia se han desarrollado investigaciones sobre microzonificación y uso de los SIG en la parte del eje cafetero y centro del país, y a continuación se destacan algunos de los proyectos más representativos. Slob, Hack, Scarpas, van Bemmelen, y Duque (2002), evalúan, mediante un SIG, los daños que causa un terremoto en la Ciudad de Armenia (Colombia). Los autores proponen un método donde observan la variación espacial de las respuestas sísmicas del sitio, dicha información se puede utilizar como base para la cartografía de microzonificación sísmica. Ellos, determinaron la variación espacial de la aceleración espectral para diferentes frecuencias, mediante observaciones después del terremoto de la ciudad en enero de 1999.

Farbiarz, Jaramillo, y Villarraga (2000), midieron módulos de rigidez y propiedades de amortiguamiento del suelo, para determinar las características del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Medellín

(Colombia), y así establecer las aceleraciones máximas. Mediante estos estudios se pudo observar la asombrosa variedad de los suelos y la amplia variación de sus características. Algunas de las secciones estudiadas presentan características como, baja plasticidad y presentan periodos en el extremo más corto del espectro. Por ello, lograron establecer aceleraciones máximas que varían entre 0.18 g y 0.38, todo esto con la ayuda de los SIG.

Para la ciudad de Tunja, se ha realizado el Estudio de microzonificación Sísmica Preliminar del Instituto Geofísico Universidad Javeriana (2000). La investigación se basó en la norma para estudios de microzonificación sísmica de la *Association Francaise Du Genie Parasismique* (AFPS), con un nivel de detalle tipo A (nivel bajo de detalle a partir de recopilación e interpretación de la información existente). Como primer paso, recopiló la información de eventos sísmicos previos ocurridos en la zona de interés, análisis de la geología, geomorfología y geotecnia y la probabilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa inducidos por sismos. Adicionalmente, se realizaron análisis de fotointerpretación geológica, estadísticas de la población y clasificación de los tipos de suelo.

Otros estudios preliminares han buscado la caracterización geotécnica de diferentes sectores de la ciudad (Dallos Morantes y Niño Plazas, 2009). Rincón Arango (2000) y Montes Leguizamón y Villate Corredor (2001), cuentan con información secundaria de datos geotécnicos y geológicos de zonas particulares de la ciudad.

Los estudios morfométricos y morfodinámicos de la ciudad de Tunja (Torres Rincón y Cáceres Cárdenas, 2005; Corredor Castellanos y Salamanca Garcia, 2003; Bautista Rubiano y Roberto Flórez, 2003), zonifican las cárcavas y los rellenos antrópicos que se han realizado con el fin de permitir la expansión urbana principalmente con usos residenciales. Los inventarios de fenómenos de remoción en masa (Dallos Morantes y Niño Plazas, 2009), permiten la localización y evaluación de la susceptibilidad de riesgo de activación en la eventualidad de un sismo.

3.4 Metodología

La metodología desarrollada en el presente proyecto de investigación, consta de tres partes fundamentales: Recolección y procesamiento de datos e información primaria y secundaria con el fin de establecer la geodatabase Geotécnica, la definición de las variables geotécnicas a modelar en función de la disponibilidad de la información, la calidad de la misma y la dispersión

dentro del área de estudio y el análisis y generación de cartografía delimitando zonas homogéneas y la elaboración de modelos 3D requeridos por los expertos para el modelo piloto de la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja.

La primera figura presenta el flujograma con las actividades desarrolladas en el proceso metodológico de la presente investigación. El desarrollo del estudio requiere implementar diferentes herramientas SIG, por lo cual, fue necesario integrar información tipo *vector*, como *raster*, con bases de datos, con información tomada de diferentes fuentes de consulta. Así mismo, de herramientas 3D para la presentación de modelos y *ModelBuilder*, para la ejecución de rutinas y del modelo prototipo de microzonificación.

La metodología se fundamenta en las experiencias internacionales y en el proceso y uso de herramientas basado en las observaciones de diferentes autores de los últimos años, así mismo, en los resultados que se requieren obtener con la investigación.

Se inicia con la búsqueda de información secundaria en las diferentes entidades públicas y privadas que administren datos geográficos, como Curadurías Urbanas, Alcaldía Mayor de Tunja, Universidades y estudios previos sobre el tema en el área de estudio.

Para la creación de la base de datos geotécnica, se realizan las transformaciones necesarias a formatos vector y raster y las proyecciones a un mismo sistema coordenado.

Para el procesamiento y análisis de la información, se utilizan herramientas ArcGIS, principalmente interpolación espacial; se generan los *shapes* necesarios para cada variable a los diferentes intervalos de profundidad.

El modelo inicial planteado para la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja consiste en la inclusión de las siguientes variables, ponderadas a partir de la metodología de panel de expertos (Salcedo Patarroyo, Camilo Santiago, 2017):

- **Variables de clasificación geotécnicas:**
 - Índice de Consistencia (IC)
 - Cohesión o resistencia al corte (CU)
 - Límite Líquido (LL)
 - Índice Plástico (IP)
- **Variables geológicas**
 - Depósitos y formaciones geológicas

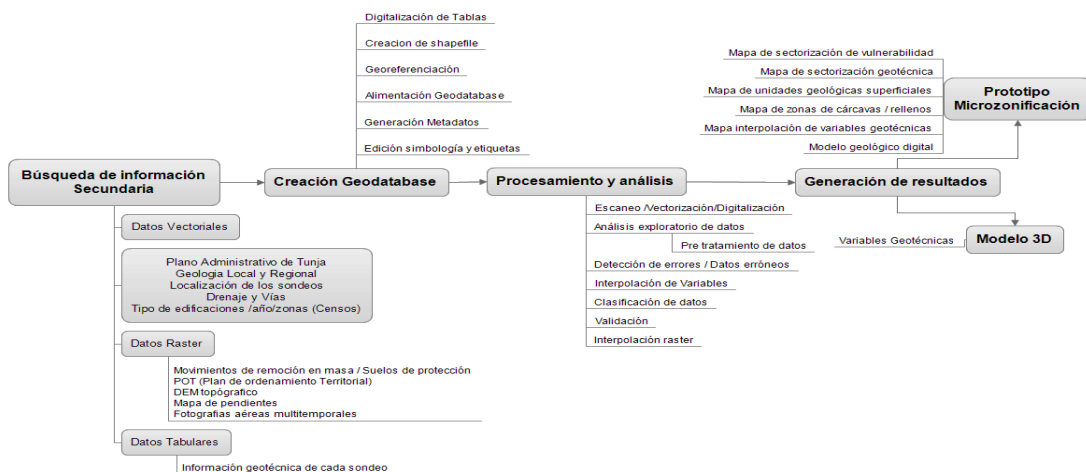
- **Variables dinámicas del suelo**
 - Tipo de perfil de suelo a partir de correlaciones con Vs y SPT
- **Variables usos del suelo**
 - Suelos de relleno
 - Suelos de cárcavas
 - Suelos sin intervención
- **Variables topográficas**
 - Pendientes
 - Profundidad de sondeos

Los expertos consultados para la determinación de variables características y sus ponderaciones son profesionales de la Alcaldía Mayor de Tunja, UPTC y Universidad Santo Tomás, Sede Tunja.

El siguiente paso del modelo es la incorporación de la variable tipo de perfil de suelo en función de la Vs, con el fin de incluir los parámetros dinámicos en el prototipo.

Finalmente, para la elaboración de los modelos 3D de diferentes propiedades índice geotécnicas se emplean las herramientas ArcGIS de ArcScene, ArcHydro y la extensión AHGW.

Figura 3-1 Actividades modelo inicial de microzonificación sísmica - Tunja.



Fuente: Autores.

3.5 Definición del área de estudio

Tunja es la capital del departamento de Boyacá. En la Figura 3.2 se observan los límites de la ciudad: Por el norte limita con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora. Registra 200 desarrollos urbanísticos en la zona urbana y 10 veredas en el sector rural: Barón Gallero, Barón Germania, Chorroblando, El Porvenir, La Esperanza, La Hoya, La Lajita, Pirgua, Runta y Tras del Alto. Los ríos: Jordán que atraviesa a la ciudad de sur a norte y la Vega que va de occidente a oriente, se consideran sus principales fuentes hídricas. La ciudad de Tunja se encuentra ubicada sobre la cordillera Oriental, en la parte central del Departamento de Boyacá, localizado a $05^{\circ}32'7''$ de latitud norte y $73^{\circ}22'04''$ de longitud oeste, con alturas que van desde los 2.700 m.s.n.m. hasta 3.150 m.s.n.m., con una extensión de 121.4 Km², y una temperatura de 13°C (Alcaldía Mayor de Tunja, s. f.).

Figura 3-2 Panorámica sinclinal de Tunja.



Fuente: Autores.

3.6 Procesamiento de datos

3.6.1 Modelo Digital de elevación (MDE)

La Figura 3., muestra que la zona de estudio presenta alturas entre 2670 a 3030 m.s.n.m. Las elevaciones más bajas se encuentran en la zona del eje del sinclinal de Tunja, caracterizada por presentar una zona residencial de estratos 3 a 6; de los 2696 a 2780 m.s.n.m. sectores de la Fuente, Los Cristales, Ciudadela Comfaboy, La Granja, correspondientes a los flancos occidental del sinclinal y de los 2780 m.s.n.m. a los 3038 m.s.n.m. sectores de San Lázaro y San Rafael en los límites urbanos de la ciudad. El centro histórico y administrativo de la ciudad se encuentran entre los 2800 a 2750 m.s.n.m y al sur la zona residencial estratos 1 a 3 entre los 2750 y 2900 m.s.n.m.

3.6.2 Mapa de pendientes

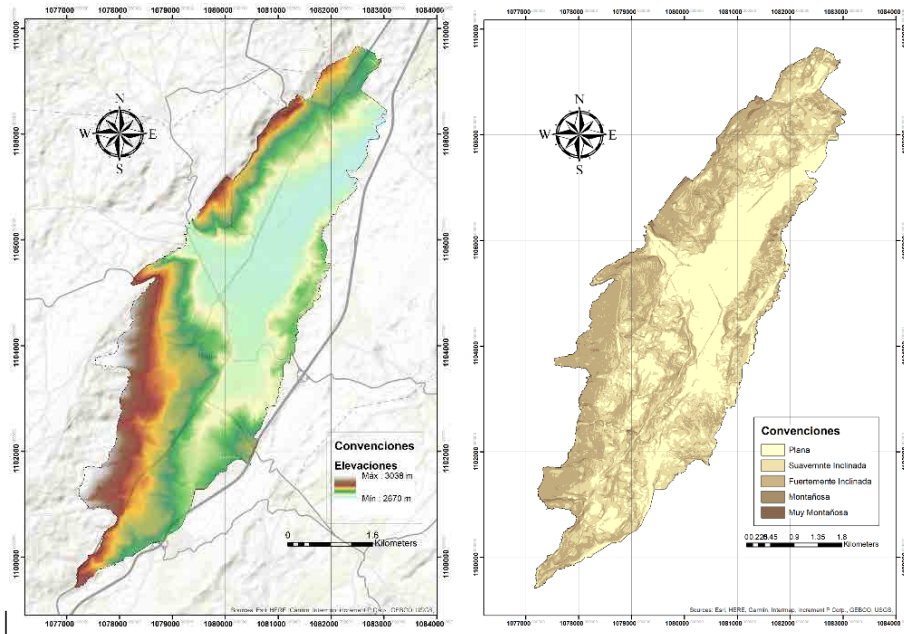
Se realizó la clasificación de las pendientes de acuerdo con la metodología presentada por Jiménez (2009), la cual aplica para proyectos de zonificación y susceptibilidad por eventos de remoción en masa.

En la Figura 3.3., se muestra el mapa de pendientes de la zona urbana de la ciudad de Tunja, las pendientes varían entre un 0% al 64%. En las zonas del eje del sinclinal correspondiente a los depósitos cuaternarios Fluvioacústico y Aluvial las pendientes son planas.

Al norte, el depósito Coluvial está caracterizado por pendientes suavemente a fuertemente inclinadas y la formación Bogotá, al occidente y sur son fuertemente inclinadas con zonas aisladas de pendientes montañosas.

La formación Tilatá al oriente de la ciudad presenta pendientes planas a suavemente inclinadas. En general, la zona urbana de Tunja, se encuentran en pendientes entre Plana a Fuertemente inclinadas.

Figura 3-3 Modelo Digital de Elevación y pendientes de Tunja – Zona Urbana.



Fuente: Autores.

3.6.3 Interpolación espacial de parámetros geotécnicos

De acuerdo con la metodología planteada y la BDG, se caracteriza la variación espacial de las propiedades geotécnicas índice, como lo son: Contenido de Wn (%), LL, LP, IP, IC, e y una propiedad de resistencia, Cu (Kg/cm²), a diferentes profundidades.

Para la caracterización y evaluación de las variables geotécnicas espacialmente, se empleó el software ArcGIS 10.4, se interpoló mediante el método *kriging*, debido a que se obtienen interpretaciones más ajustadas a la realidad y con errores cuadráticos más bajos que los demás métodos de interpolación (Sun et al., 2008; Karimzadeh et al., 2014; Kienzle et al., 2006; Pokhrel et al., 2013).

De acuerdo a la identificación estratigráfica según las condiciones geotécnicas, se escogen 8 rangos de profundidad para ver el desarrollo y variabilidad de los parámetros geotécnicos del área de estudio, los cuales son: 0 a 3 metros, 3 a 5 metros, 5 a 7 metros, 7 a 9 metros, 9 a 11 metros, 11 a 15 metros 15 a 20 metros y mayores a 20 metros.

A partir de la metodología de panel de expertos, se establecen las siguientes variables geotécnicas como las más relevantes para el presente estudio, las cuales son empleadas para la generación de la interpolación espacial:

- Límite líquido (LL): Esta propiedad corresponde al contenido de agua expresado en porcentaje (%) con respecto al peso del suelo, donde el suelo pasa por una transición entre estado líquido y plástico. El análisis de dicha propiedad es importante ante un sismo, dado que las ondas vibratorias generarán acomodación de partículas de suelo generando un posible estado líquido con sus efectos de licuefacción.
- Índice de consistencia Relativa (IC): Se determina mediante la relación entre la diferencia del límite líquido y la humedad natural respecto al Índice Plástico (IP).
- Índice plástico (IP): Se determina mediante la diferencia entre LL y el límite plástico.
- Cohesión: Se utiliza para representar la resistencia al corte del suelo.
- Relación de vacíos: La relación de vacío de un suelo es el volumen de suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea la relación de vacío más suelto es el suelo.
- Suelo de fundación: Esta variable de la BDG, no es una propiedad del suelo natural, pero se incluye, dado que la ciudad de Tunja presenta en sus flancos oriental y occidental procesos de remoción en masa tipo cárcavas las cuales han sido rellenadas en grandes zonas a causa de la expansión urbana. La determinación de estas zonas, se realiza a partir de un análisis de fotografías áreas multitemporales. El intervalo de clasificación es cualitativo y se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3-1 Suelo de fundación.

DESCRIPCION DEL SUELO
Suelo Natural (sin proceso de erosión)
Cárcava
Relleno antrópico

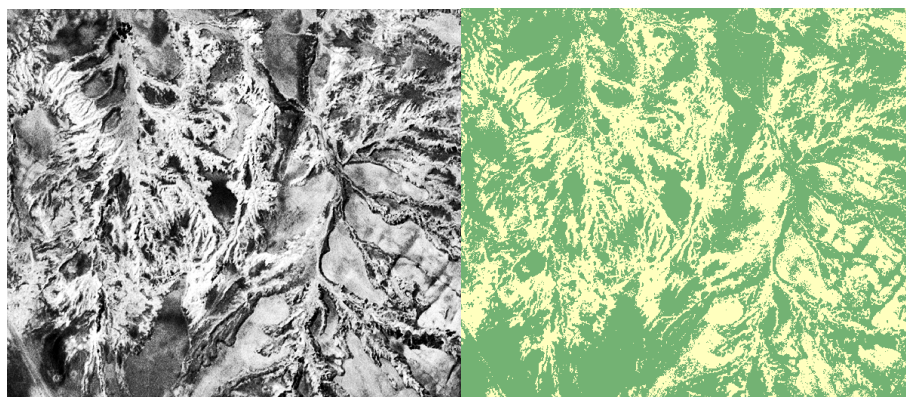
Fuente: Autores.

Con el fin de determinar las zonas de cárcavas y las zonas de cárcavas rellenadas a través del tiempo (rellenos antrópicos), se emplean fotografías áreas de los años 1939, 1945, 1957, 1960, 1978, 1984, 1992 y 2005 en formato *TIFF*, cada mosaico se *georreferencia* a partir de entre 7 a 13 puntos de control, con un error medio cuadrático promedio de 1.05. Luego de referenciado cada mosaico, se emplean las herramientas para la creación de las firmas espectrales y se aplica una clasificación supervisada. Por emplearse fotografías aéreas, los resultados deberán ser analizados cuidadosamente editando las zonas clasificadas a partir

de una inspección visual subjetiva. La Figura 3-4., muestra un ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para la determinación de zonas de erosión en la zona sur este de la ciudad de Tunja para el año 1960. El color amarillo muestra las zonas de cárcavas. Con la comparación multitemporal y procesos de análisis espacial se determinan las zonas de rellenos antrópicos, es decir, cárcavas rellenas para ser empleadas en proyectos de urbanización.

A partir del análisis de fotografías aéreas multitemporales, se observa en la Figura 3-5., que las zonas de cárcavas predominan hacia el flanco oriental del sinclinal, principalmente sobre la formación Tilatá, las cuales en un 40% han sido rellenas para proyectos urbanísticos. En los barrios Cooservicios y San Antonio, se presentan los mayores porcentajes de cárcavas rellenas. Por otro lado, en el flanco occidental del sinclinal, sobre la formación Bogotá, Cacho y el depósito Coluvial se muestran, en menor medida cárcavas rellenas para uso residencial, principalmente en los barrios Altamira y la Fuente.

Figura 3-4 Resultado clasificación supervisada, sector sur este – Tunja 1960.



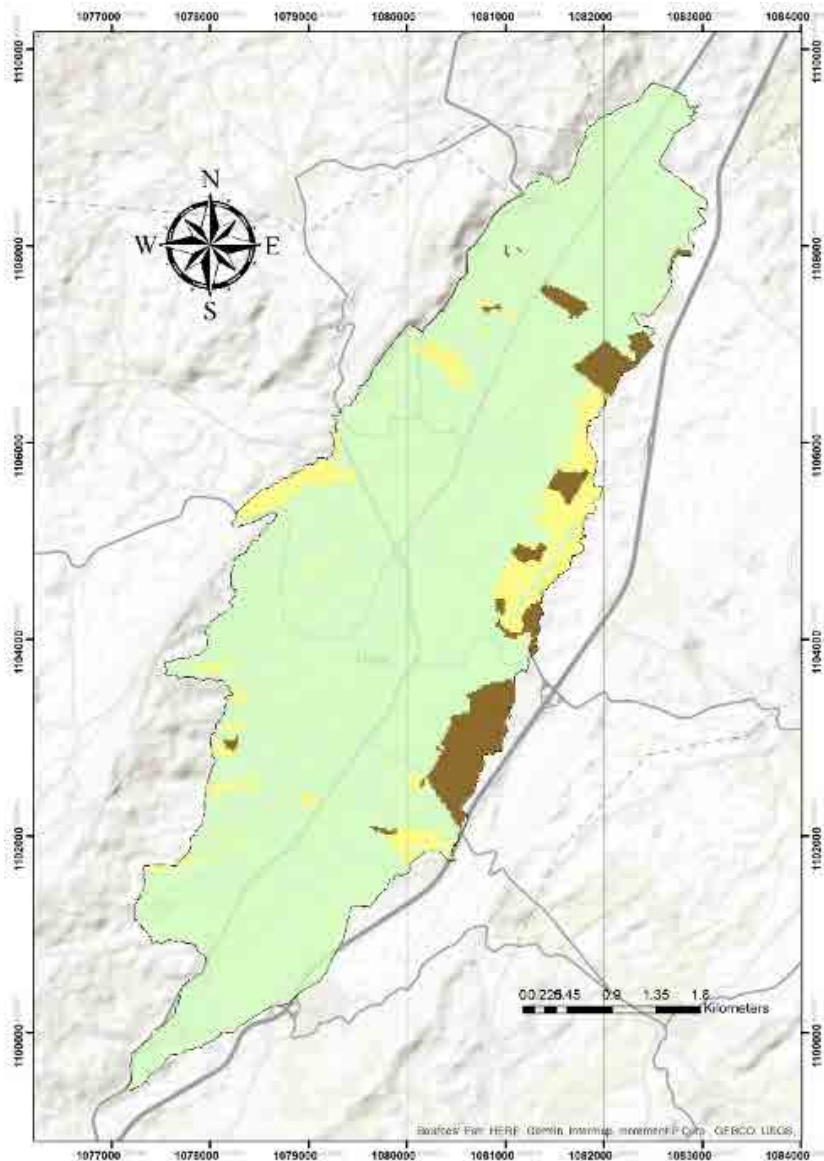
Fuente: Autores.

La Figura 3-5., muestra el resultado del tipo de suelo en función de relleno, cárcava o sin proceso de erosión.

- Litología: Este parámetro se emplea dentro de la BDG con el fin de integrar la litología dentro del modelo inicial de microzonificación.
- Velocidad de onda de corte (V_s): Es el parámetro dinámico que permite determinar el comportamiento local del suelo ante la aplicación de cargas dinámicas y sísmicas. Ante la dificultad actual de contar con datos dinámicos para la ciudad de Tunja, se determina su valor a partir de correlaciones con ensayos de penetración estándar (SPT).
- Realizada la transformación a velocidad de onda de corte, se determina

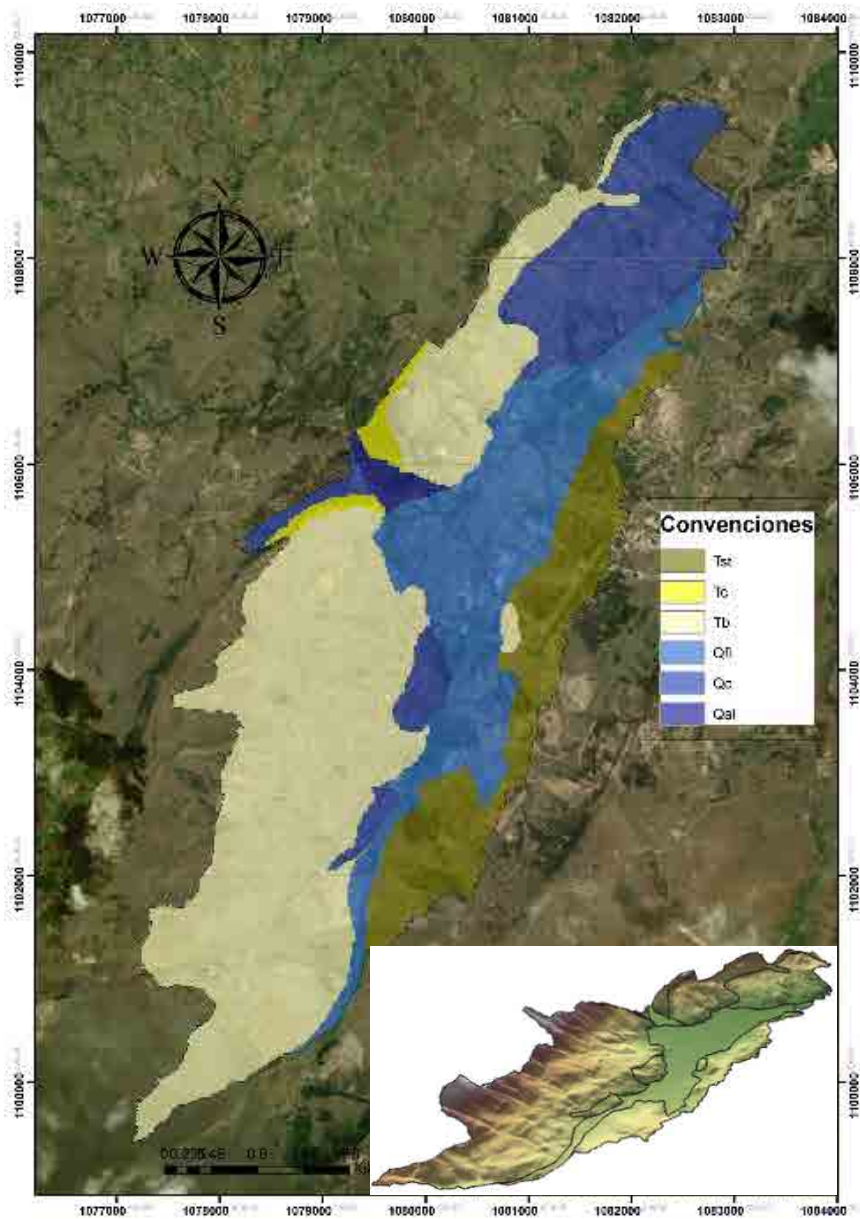
el tipo del perfil de suelo basado en la sección A.2.4.4 de la Norma de Construcción Sismo resistente de Colombia (NSR-10). La Figura 6., muestra el resultado del tipo de perfil de suelo a partir de la velocidad de onda de corte. En la ciudad de Tunja, predomina el tipo D, con zonas hacia los flancos del sinclinal con tipo de perfil de suelo C.

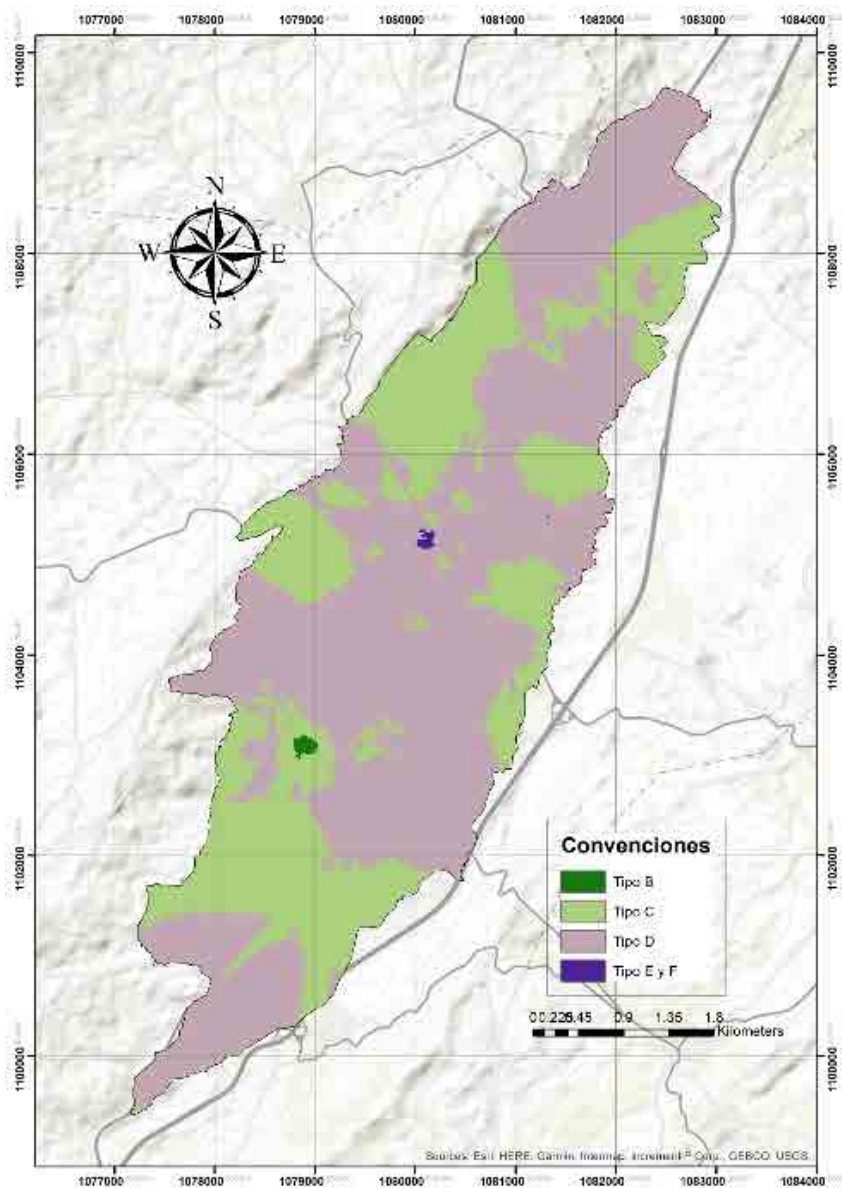
Figura 3-5 Cárcavas y rellenos en Tunja.



Fuente: Autores.

Figura 3-6 Geología y Tipo perfil de suelo en Tunja.





Fuente: Autores.

3.7 Modelo geoespacial para la microzonificación

El modelo inicial planteado para la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, consiste en la inclusión de las siguientes variables, ponderadas a partir de la metodología de panel de expertos:

- Variables de clasificación geotécnicas:
 - Índice de Consistencia (IC)
 - Cohesión o resistencia al corte (CU)
 - Límite Líquido (LL)
 - Índice Plástico (IP)
- Variables geológicas
 - Depósitos y formaciones geológicas
 - Variables dinámicas del suelo
 - Tipo de perfil de suelo a partir de correlaciones con Vs y SPT
- Variables usos del suelo
 - Suelos de relleno
 - Suelos de cárcavas
 - Suelos sin intervención
- Variables topográficas
 - Pendientes
 - Profundidad de sondeos

Los expertos consultados para la determinación de variables características y sus ponderaciones son profesionales de la Alcaldía Mayor de Tunja, UPTC y Universidad Santo Tomás, Sede Tunja.

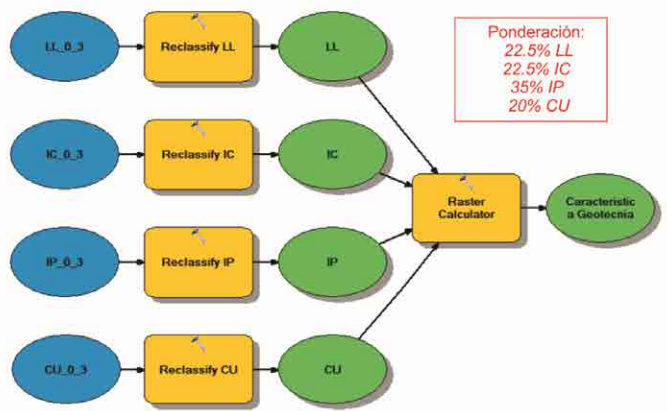
El prototipo para la microzonificación sísmica de Tunja, consiste en un modelo espacial donde inicialmente se genera un mapa de características geotécnicas incluyendo variables de clasificación ponderadas. La Figura 3-7., muestra el diagrama de flujo modelada para el intervalo de 0 a 3 metros en *ModelBuilder* de ArcGIS.

La segunda etapa del prototipo, consiste en la inclusión de las variables litológicas y de uso del suelo, en cada intervalo de profundidad establecido. La Figura 3- 8., muestra el siguiente paso en el modelo para el ejemplo de profundidad 0 a 3 metros.

Con los resultados de comportamiento geotécnico local en cada intervalo definido de profundidad, se realiza una superposición de cada *shapefile*, con el fin de obtener un único valor en cada pixel del *raster*. Se obtiene así el comportamiento total del suelo.

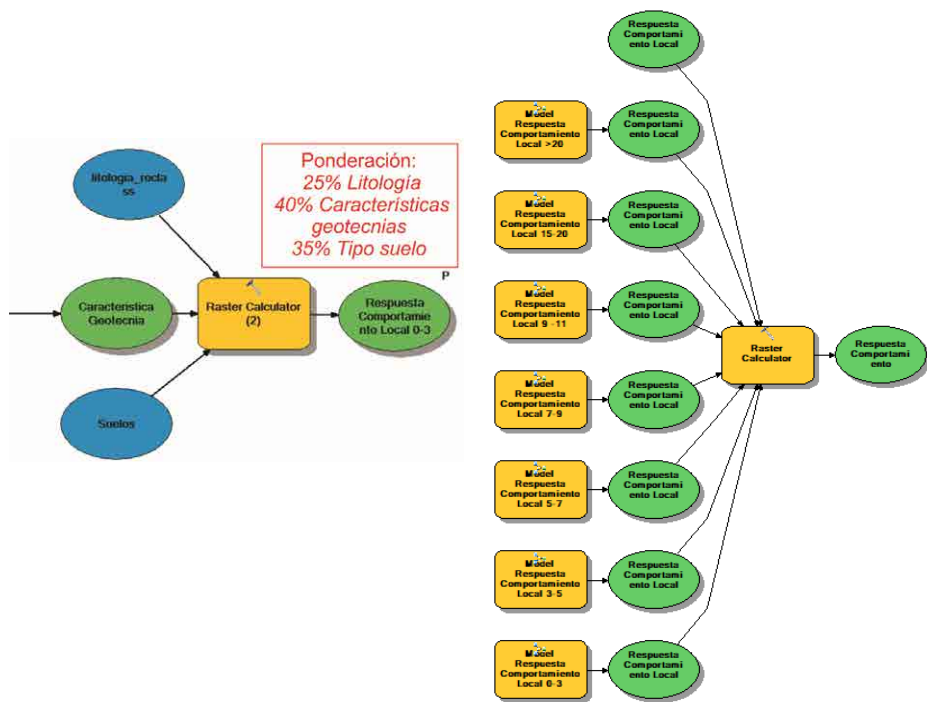
La Figura 3-8., presenta el *ModelBuilder* y la Figura 3-9., muestra el resultado total de la superposición de los diferentes intervalos de profundidad.

Figura 3-7 Diagrama de flujo mapa Características Geotécnicas.



Fuente: Autores.

Figura 3-8 Diagrama de flujo mapa Respuesta comportamiento Local.



Fuente: Autores.

En la Figura 3-9., se presenta el resultado final de la superposición de las variables geotécnicas a diferentes profundidades. Se indica que la zona de

mayor susceptibilidad geotécnica se encuentra en el eje del sinclinal sobre el depósito Fluviolacustre, en los barrios Mesopotamia, Santa Inés, La María, UPTC, Estadio, Batallón, Las Quintas y las zonas comerciales del Centro Comercial Unicentro y Viva; todos en la zona de estratos 4 a 6 de la ciudad. Así mismo, el flanco oriental del sinclinal presenta zonas de susceptibilidad Media –Alta principalmente en las zonas de cárcavas rellenas para proyector urbanísticos residenciales.

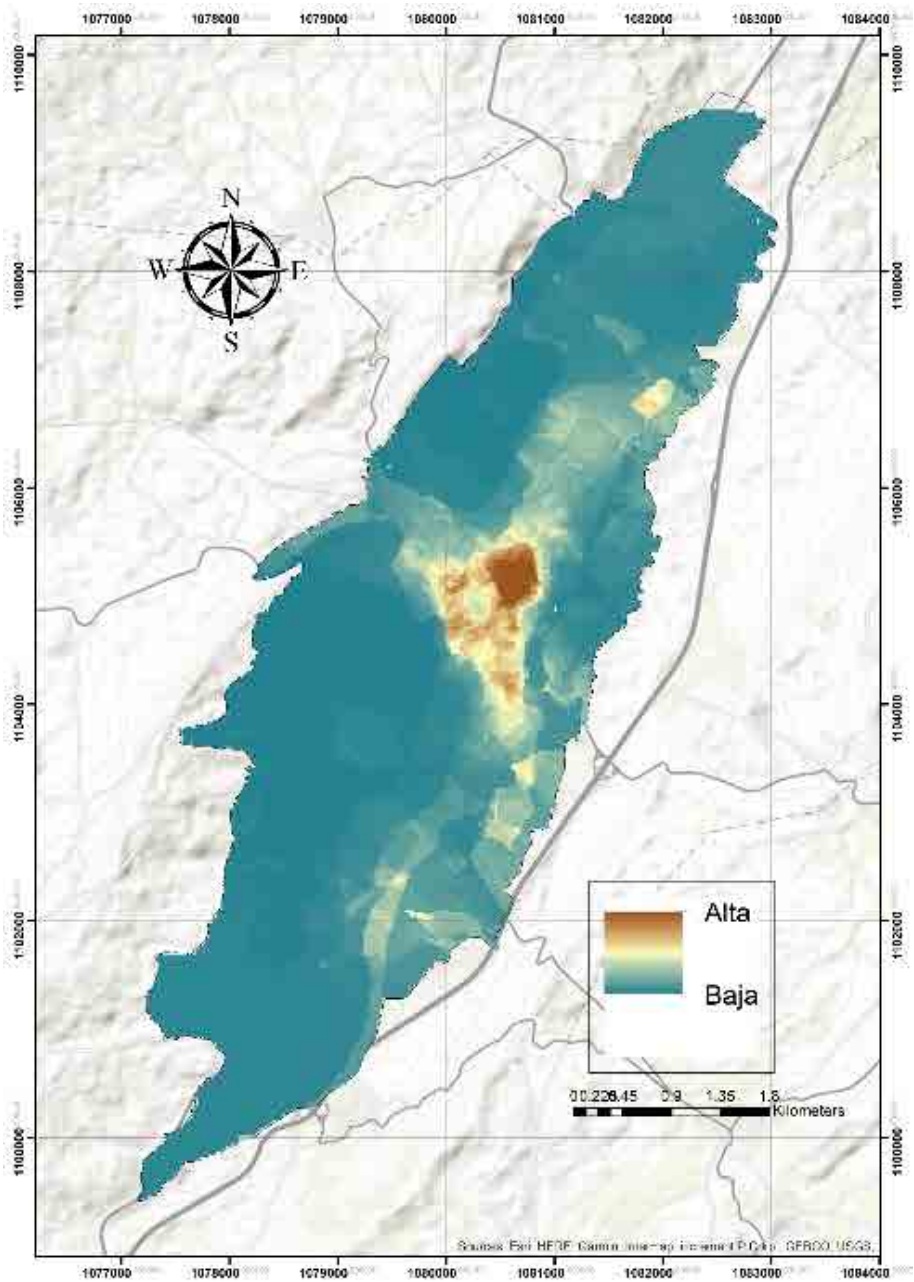
El siguiente paso del modelo es la incorporación de la variable tipo de perfil de suelo en función de la V_s , con el fin de incluir los parámetros dinámicos en el prototipo. La Figura 3-10., muestra que al incluir la variable dinámica del suelo (Tipo de perfil de suelo), las zonas críticas de susceptibilidad por evento sísmico son:

Hacia el Norte:

- Uso residencial: Mesopotamia, La María, Urbanización Hayuelos (en construcción), Edificio Inaltezza (edificación de 30 pisos), Altagracia.
- Uso comercial: Centro comercial Viva (en construcción), Centro Empresarial Green Hills, Centro Comercial Unicentro, Centro Comercial Verano Mall (en construcción).
- Uso educativo: UPTC, Campus Universidad Santo Tomás, (en construcción edificio de aulas).
- Uso médico: Clínica Medimas, Centro médico y empresarial Da Vinci.
- Otra infraestructura: Estadio la Independencia y Nuevo Terminal de transporte terrestre (en construcción).

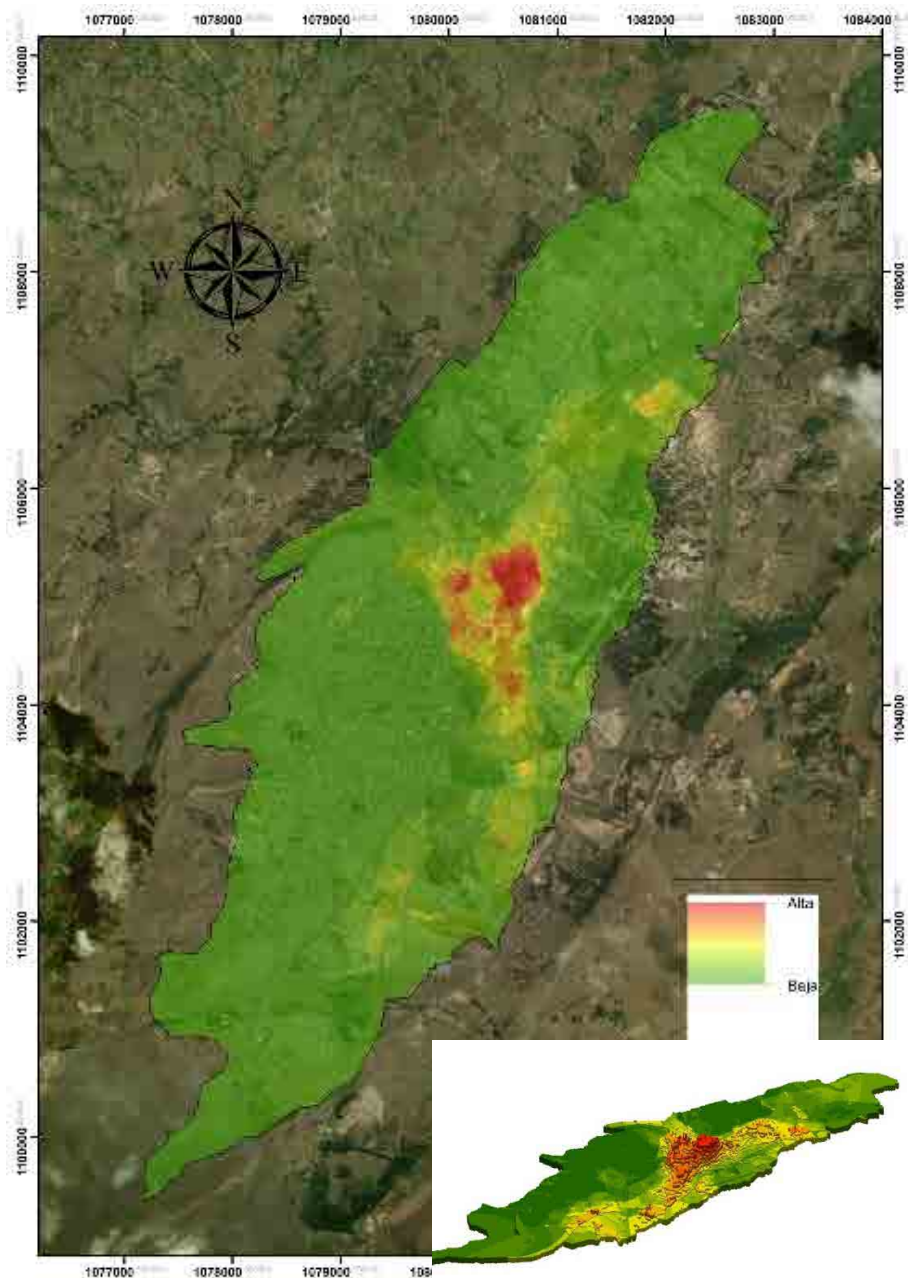
La característica predominante de las zonas anteriormente mencionadas, es que se presenta en estratos 4 a 6, áreas de gran concentración de habitantes (Universidades, Centros comerciales, empresariales y médicos), y nuevos desarrollos urbanísticos de carácter residencial con alturas importantes en las edificaciones. Adicionalmente, son zonas susceptibles a inundación según registros históricos de la ciudad.

Figura 3-9 Mapa resultado superposición de intervalos de profundidad.



Fuente: Autores.

Figura 3-10 Mapa final de susceptibilidad del suelo por evento sísmico.



Fuente: Autores.

Hacia el este de la ciudad:

- Uso residencial: Los Patriotas, Curubal, Barrio Batallón, Prados de Alcalá, Terranova Coral (en construcción torres de 12 pisos).
- Uso educativo: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Algunas zonas de susceptibilidad media son:

- Barrio San Antonio.
- MultiParque Centenario.
- Barrio Villa Bachué.
- San Ricardo.
- Barrio Santa Ana.
- Plaza de mercado del Norte.
- Las Quintas.
- Santa Inés.

3.8 Discusión

Los SIG, actualmente tienen un gran potencial y desarrollo dentro de la ingeniería geotécnica, en especial, para la realización de estudios de microzonificación sísmica de ciudades, principalmente por la flexibilidad en el manejo de datos, la diversidad en los análisis espaciales y la visualización de los resultados en modelos 2D y 3D.

Aunque en la actualidad las investigaciones sobre ingeniería geotécnica se presentan en casos específicos, existen investigaciones que abarcan una extensión espacial muy grande, en este tipo de estudios, donde los componentes de análisis espacial son muy densos, los SIG, han surgido como ayuda fundamental; sin embargo, el avance científico de los SIG se ha enfocado con más rigurosidad en disciplinas tales como: Ingeniería ambiental, ordenamiento territorial, cartografía y ciencias agropecuarias. Este hecho muestra que, aunque existen avances de SIG en geotecnia, estos avances han sido lentos y no han llamado la suficiente atención de los desarrolladores de software para SIG, lo que permitiría avances más rápidos y accesibles a toda la comunidad en temáticas específicas como la modelación en 3D.

En el presente proyecto, se adaptaron metodologías encontradas en diversas partes del mundo, por ejemplo, se elaboró una base de datos geotécnica con más de 400 registros de sondeos a diferentes profundidades, las cuales permitieron generar los modelos 3D de algunas propiedades índice del suelo. Para la elaboración de los modelos 3D de diferentes propiedades, índice

geotécnicas, se emplean las herramientas *ArcGIS* de *ArcScene*, *ArcHydro* y la extensión *AHGW*, mostrando su versatilidad y eficiencia en la generación de modelos 3D.

La recolección de datos primarios para el modelo (propiedades índices del suelo, estratigrafía y datos dinámicos), fueron un gran inconveniente en el proyecto, debido principalmente a las diferentes fuentes de información; en ocasiones, los trámites administrativos demoraban la respuesta varios meses y en otras, los datos debieron ser corregidos y validados. La gran cantidad de datos generó que la etapa de procesamiento para obtener la información requerida fuera muy dispendiosa.

Así mismo, en el modelo inicial no se pudo tener en cuenta el parámetro relación de vacíos (e) dado que se presentaron muy pocos datos en la base de datos BDG y al realizar los procesos de interpolación, en los límites espaciales los datos no eran coherentes.

El modelo inicial de microzonificación permite reajustar las ponderaciones o pesos de cada una de las variables, una de ellas, es la pendiente relacionada con el tipo de litología presente, dado que en depósitos cuaternarios las pendientes bajas, serán indicadores de mayor grado de susceptibilidad y en formaciones terciarias pendientes fuertes, presentarán efectos de borde amplificando las ondas sísmicas.

La expansión urbana de los últimos 20 años se ha desarrollado principalmente en la parte oriental, sobre los depósitos aluvial y fluvio-lacustre, sobre el eje del sinclinal. Esta zona tiene el más alto indicador de susceptibilidad del suelo y los más altos estratos socioeconómicos de la ciudad.

En su expansión urbana, la ciudad se ha desarrollado en menor medida en el flanco occidental, sobre la formación Bogotá y en pendientes clasificadas como fuertemente inclinadas; adicionalmente, existen zonas de erosión por cárcavas y otras áreas de cárcavas que han sido rellenadas para desarrollos habitacionales. Dicha zona, tiene una susceptibilidad media baja, pero no se deberá desconocer el efecto de amplificación de ondas por efecto de borde y por los rellenos antrópicos en la evaluación estructural de futuras edificaciones.

Los resultados muestran que se requiere hacer una zonificación de usos del suelo y limitar la expansión urbana hacia la zona plana de la ciudad, así de la delimitación de zonas protegidas por cárcavas para evitar rellenos en uso residencial.

Se resalta que los resultados obtenidos en este proyecto son preliminares por la falta de información. La mayoría de datos encontrados correspondían a la parte central de la ciudad de Tunja, mientras que hacia los límites urbanos, fueron muy pocos los datos que se encontraron y esto pudo haber influenciado los resultados.

El análisis multitemporal de fotografías aéreas permite establecer los cambios en los usos del suelo de la ciudad, así mismo, evaluar la expansión urbana y determinar áreas influenciada por rellenos antrópicos, con el fin de establecer zonas homogéneas para el comportamiento geotécnico del suelo.

3.9 Conclusiones

- El modelo inicial de microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, presenta una base metodológica para la representación del comportamiento del suelo a partir de variables índice y clasificación a partir de ponderación por expertos.
- Se construyó un modelo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con software especializado, que permitió la organización, análisis y presentación de información de manera gráfica y alfanumérica como soporte del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja.
- Las variables geotécnicas que se definieron en el estudio fueron: propiedades índices, cohesión, estratigrafía, zonas de cárcavas, pendientes y correlaciones con Vs y SPT, dado que eran los datos de fuentes confiables y presentaban una dispersión adecuada dentro del área de estudio; el panel de experto avaló la selección de dichas variables. La propiedad relación de vacíos es necesaria incluirla dentro del modelo, se requiere realizar más ensayos de laboratorio para contar con mayor cantidad de datos dentro de toda la ciudad.
- La presencia de un depósito cuaternario en el valle del sinclinal de Tunja, genera una zona de susceptibilidad alta y media del suelo ante eventos sísmico. Dicha zona corresponde a proyectos urbanísticos de estratos 4, 5 y 6 de la ciudad.
- Los mayores indicadores de susceptibilidad se encuentran sobre el depósito fluvio-lacustre, en pendientes muy planas, por tales razones se hace necesario evaluar efectos locales por licuación de suelos.
- En los análisis geotécnicos se evidencio una zona crítica entre la glorieta y los barrios Mesopotamia, Rincón de la Pradera, Saucos de la Pradera, Santa Inés, El Estadio, donde se presentan materiales con las siguientes características, contenido de agua mayores a 60%, límites líquidos entre 35 a 70 %, límites plásticos entre 20 a 50%, índice plástico de 10 a mayores de 40%, índice que liquidez entre 0

y mayores a 1, cohesión entre 0,255 a 2,04 Kg/cm², peso unitario de menores a 1,4 a 2 T/m³, suelos de consistencia baja, plasticidades altas a extremadamente altas, con comportamientos de un líquido lo que podría tratarse de turbas y materiales orgánicos entre profundidades de 3 a 9 metros.

- La ciudad de Tunja se encuentra, en su gran mayoría, sobre un perfil de suelo tipo D y algunas zonas al sur de la formación Bogotá y en los flancos oriental y occidental del sinclinal un perfil de suelo tipo C. La sismicidad de la zona es intermedia, por lo cual, se requiere con urgencia realizar ensayos dinámicos con el fin de avanzar en el estudio de microzonificación definitiva y demás estudios derivados de él.
- En la ciudad de Tunja, las pendientes varían entre un 0% al 64%. En las zonas correspondiente a los depósitos cuaternarios Fluvioacustre y Aluvial las pendientes son planas. Al norte, el depósito Coluvial está caracterizado por pendientes suavemente a fuertemente inclinadas y la formación Bogotá, al occidente y sur son fuertemente inclinadas con zonas aisladas de pendientes montañosas. La formación Tilatá al oriente de la ciudad, presenta pendientes planas a suavemente inclinadas.
- Las zonas de cárcavas predominan hacia el flanco oriental del sinclinal, principalmente sobre la formación Tilatá, las cuales en un 40% han sido rellenadas para proyectos urbanísticos. En los barrios Cooservicios y San Antonio, se presentan los mayores porcentajes de cárcavas rellenas. Por otro lado, en el flanco occidental del sinclinal, sobre la formación Bogotá, Cacho y el depósito Coluvial se presentan, en menor medida cárcavas rellenas para uso residencial, principalmente en los barrios Altamira y la Fuente.
- La zona de mayor susceptibilidad geotécnica se encuentra en el eje del sinclinal sobre el depósito Fluvioacustre, en los barrios Mesopotamia, Santa Inés, La María, UPTC, Estadio, Batallón, Las Quintas y las zonas comerciales del Centro Comercial Unicentro y Viva; todas estas zonas corresponden a estratos 4 a 6 de la ciudad. Así mismo, el flanco oriental del sinclinal, presenta zonas de susceptibilidad Media – Alta principalmente en las zonas de cárcavas rellenas para proyectos urbanísticos residenciales. La característica predominante de las zonas anteriormente mencionadas, es que se presenta en los estratos 4 a 6, áreas de gran concentración de habitantes (Universidades, Centros comerciales, empresariales y médicos) y nuevos desarrollos urbanísticos de carácter residencial con alturas importantes en las edificaciones. Adicionalmente, son zonas susceptibles a inundación según registros históricos de la ciudad.
- La expansión y desarrollo urbano de la ciudad de Tunja, en los últimos años se ha incrementado en el flanco oriental del sinclinal y sobre la zona plana de los depósitos cuaternarios, existen zonas de carácter

residencial construidas sobre cárcavas rellenadas. Dicha zona tiene una susceptibilidad media a alta, por lo cual se deberá conocer el efecto de amplificación de ondas por efecto de borde y por los rellenos antrópicos en la evaluación estructural de futuras edificaciones.

3.10 Recomendaciones

- Se recomienda actualizar constantemente la geodatabase con información primaria, y aumentar el volumen de información secundaria para mejorar las estimaciones de los modelos y cubrir en su totalidad la ciudad de Tunja. También, se recomienda validar la caracterización con la construcción de perfiles geotécnicos y así tener un acercamiento a una modelación en 3D del suelo de la ciudad.
- En las fases de recolección de información en campo, se hace necesaria la ejecución de ensayos de tipo dinámico, especialmente, aquellos que permitan determinar la velocidad de onda promedio a 30 m, la UPTC, con sede en Tunja, ha adquirido un sismógrafo que permitirá ejecutar dichos ensayos y recolectar los datos de forma sistemática, retroalimentando así la BDG y ejecutando nuevos análisis espaciales.
- Es necesario evaluar lo más pronto posible, el efecto sísmico sobre las zonas de susceptibilidad geotécnica Alta y Media, dado que es, precisamente en estas zonas, donde la expansión urbana se ha estado direccionando en los últimos años. Los nuevos proyectos urbanísticos de tipo residencial y comercial que se están desarrollando en las zonas de mayor susceptibilidad, son proyectos de ocupación especial como son centros comerciales y edificaciones habitacionales que supera los 15 pisos de altura.
- Se recomienda realizar un inventario de afloramientos rocosos a lo largo de la formación Bogotá, Tilatá y Cacho, ya que, ante la eventualidad de ondas sísmicas, el efecto de borde modifica el comportamiento de estas zonas.

