

Análisis estadístico de los resultados obtenidos por tres metodologías aplicadas, para el conocimiento de la amenaza sísmica en el área piloto del municipio de Betulia, Santander.

Sergio Andres Patiño Sanabria, Héctor Armando Meneses Carvajal

Trabajo de grado para optar al título de:

GEÓLOGO

Director:

M.Sc. Jorge Eduardo Pinto Valderrama

Codirector:

M.Sc. Edwin Fernando Mendoza Beltrán

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología.

Bucaramanga

2018.

## DEDICATORIA

*“A Dios por ser el sustentador y forjador de mi vida; a mis padres por haberme moldeado la persona que soy, por seguir cada mañana motivando mis esfuerzos y porque hasta el final aportarán a mi vida; a mis maestros por aportar sus conocimientos y granito de arena en mi caminar académico y profesional”*

*Sergio Andres Patiño Sanabria.*

*“A mis padres que con su ejemplo y su esfuerzo me brindaron la oportunidad de alcanzar esta meta, a toda mi familia que siempre creyó en mi y me ha brindado su apoyo, a todos y cada uno de mis amigos, compañeros y profesores con los que se compartió esta gran aventura.”*

*Héctor Armando Meneses Carvajal.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro sincero agradecimiento al director de este trabajo el Maestro JORGE EDUARDO PINTO VALDERRAMA, que con su constante dedicación y atención puso a disposición todo su conocimiento y brindo las herramientas para que este proyecto llegara a feliz término.

Al profesor EDWIN MENDOZA BELTRÁN quien estuvo asesorando desde su ejercicio durante el transcurso de la investigación.

A todos los docentes UIS que aportaron a la formación profesional de lo hasta aquí somos.

## CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>16</b> |
| Referenciación Geográfica.....                                       | 17        |
| <b>1. OBJETIVOS.....</b>   | <b>19</b> |
| Objetivo Principal.....  | 19        |
| Objetivos Específicos.....   | 19        |
| <b>2. JUSTIFICACIÓN .....</b>  | <b>20</b> |
| <b>3. MARCO GEOLÓGICO.....</b>                                       | <b>22</b> |
| <b>4. METODOLOGÍA.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>4.1 Materiales .....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1.1 Estaciones Sismográficas de Colombia.....                      | 39        |
| 4.1.2 Catalogo de sismos.....  | 40        |
| 4.1.3 Mapa geológico.....  | 42        |
| 4.1.4 Mapa de pendientes.....  | 43        |
| 4.1.5 Métodos frecuentes de para análisis.....                       | 44        |
| <b>4.2 Métodos Empleados .....</b>                                   | <b>51</b> |
| 4.2.1 Metodología Determinística: INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW)..... | 51        |
| 4.2.2 Metodología Estocástica: GEOESTADISTICA.....                   | 54        |
| 4.2.3 Metodología: SUPERPOSICIÓN PONDERADA.....                      | 58        |
| <b>5. RESULTADOS .....</b>   | <b>60</b> |
| 5.2.1 Metodología INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW).....                 | 60        |
| 5.2.2 Metodología GEOESTADÍSTICA.....                                | 64        |
| 5.2.3 Metodología SUPERPOSICIÓN PODERADA.....                        | 73        |
| <b>6. ANÁLISIS.....</b>  | <b>80</b> |
| <b>7. CONCLUSIONES .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>8. RECOMENDACIONES .....</b>                                      | <b>87</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>88</b> |
| <b>APÉNDICE.....</b>   | <b>91</b> |

**LISTA DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Distribuciones habitantes de Betúlia. ....   | 21 |
| Tabla 2. Valores de reclasificación para amenaza según magnitud. ....                           | 62 |
| Tabla 3. Área y porcentajes para las categorías de la metodología IDW. ....                     | 63 |
| Tabla 4. Área y porcentajes para las categorías de la metodología Geoestadística. ....          | 73 |
| Tabla 5. Valores de reclasificación de mapa de pendientes. ....                                 | 75 |
| Tabla 6. Valores de Reclasificación mapa geológico. ....  | 76 |
| Tabla 7. Pesos para los Factores Utilizados en la Superposición ponderada ....                  | 77 |
| Tabla 8. Área y porcentajes para las categorías de la metodología Superposición Ponderada. .... | 79 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1.</i> Localización Geográfica municipio de Betúlia, Departamento de Santander, Colombia. Seleccionado en cuadro rojo el área de trabajo. Fuente: esquema de ordenamiento territorial del municipio de Betúlia documento técnico de soporte tomo iii, editada por los autores. ....                            | 17 |
| <i>Figura 2.</i> Mapa Geológico Adaptado de la plancha 120, Fuente: esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betúlia documento técnico de soporte tomo iii, 2016. ....   | 36 |
| <i>Figura 3.</i> Mapa estructural de influencia para la zona de estudio del municipio de Betúlia. Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betúlia documento técnico de soporte tomo iii, 2016. editada por los autores. ....  | 37 |
| <i>Figura 4.</i> Estaciones Sismológicas del Servicio Geológico Colombiano, Tomado de <a href="https://www2.sgc.gov.co/sismos">https://www2.sgc.gov.co/sismos</a> .....  | 39 |
| <i>Figura 5.</i> Catalogo de sismos con epicentro en el Departamento de Betúlia del periodo comprendido entre el 1 de Enero de 2013 a 1 de Diciembre de 2017. Tomado de <a href="https://www2.sgc.gov.co/sismos">https://www2.sgc.gov.co/sismos</a> .....  | 41 |
| <i>Figura 6.</i> Mapa geológico del municipio de Betúlia (área seleccionada para trabajo en cuadro rojo). Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betúlia 2016. editada por los autores. ....   | 42 |
| <i>Figura 7.</i> Mapa de pendientes del municipio de Betúlia (área seleccionada para trabajo en cuadro rojo). Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betúlia 2016. editada por los autores. ....   | 43 |
| <i>Figura 8.</i> Esquema de los métodos determinista y probabilista. Adaptado de: Belén, et al 1999. Pág. 31. ....   | 47 |
| <i>Figura 9.</i> Vecindad para un punto seleccionados mediante metodología IDW. Tomado de: <a href="https://es.scribd.com/document/339172469/How-IDW-Works">https://es.scribd.com/document/339172469/How-IDW-Works</a> . ....  | 52 |
| <i>Figura 10.</i> Diagrama para trabajar metodología IDW. Fuese Adoptada por los Autores desde la teoría. ....   | 54 |
| <i>Figura 11.</i> Diagrama Valores medidos vs coordenadas X. Fuente: <a href="http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm">Http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm</a> ..... | 56 |
| <i>Figura 12.</i> Diagrama para trabajar metodología Geoestadística. Fueste: Diseñada por los autores desde la teoría. ....  | 57 |
| <i>Figura 13.</i> Diagrama para trabajar metodología Superposición. Fueste: D. Al-Dogom , K. Schuckma, R. Al-Ruzouq .....  | 59 |
| <i>Figura 14.</i> Diagrama Procedimental aplicativo para metodología IDW.....  | 60 |
| <i>Figura 15.</i> Mapa de amenaza sísmica interpolado con IDW. ....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 16.</i> Vista 3D exagerada de la superficie IDW y su relación con los puntos de muestreo..   | 62 |
| <i>Figura 17.</i> Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido a partir de la metodología IDW  | 63 |
| <i>Figura 18.</i> Diagrama básico procedimental para metodología Geoestadística.   | 64 |
| <i>Figura 19.</i> Histograma de frecuencia para la variable magnitud.  | 65 |
| <i>Figura 20.</i> Gráfico Normal QQ Plot para la variable magnitud.  | 66 |
| <i>Figura 21.</i> Análisis de tendencia para la variable magnitud.   | 67 |
| <i>Figura 22.</i> Semivariograma clasificado por modelo teórico correspondiente al tipo gaussiano.   | 68 |
| <i>Figura 23.</i> Aplicación de sectores para vecindad de búsqueda.  | 70 |
| <i>Figura 24.</i> Superficie de magnitud de sismos interpolada con Kriging ordinario.  | 71 |
| <i>Figura 25.</i> Superficie de error estándar de predicción.  | 71 |
| <i>Figura 26.</i> Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido a partir de la metodología Geoestadística.  | 72 |
| <i>Figura 27.</i> Diagrama procedimental para metodología de superposición ponderada   | 73 |
| <i>Figura 28.</i> Mapa de Peak Ground Acceleration para la zona de estudio.  | 74 |
| <i>Figura 29.</i> Mapa de distancia a fallas generado para insumo de superposición ponderada.  | 75 |
| <i>Figura 30.</i> Mapa de pendientes para la zona de estudio.  | 76 |
| <i>Figura 31.</i> Mapa Geológico y reclasificación para la zona de estudio.  | 77 |
| <i>Figura 32.</i> Herramienta Weighted Overlay con asignación de datos.  | 78 |
| <i>Figura 33.</i> Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido con la metodología superposición ponderada.   | 79 |
| <i>Figura 34.</i> Calculo del área para la categoría Muy Baja del mapa de zonificación de amenaza de la metodología IDW.   | 81 |
| <i>Figura 35.</i> Diagrama comparativo de la zonificación generada por el EOT de Betúlia 2016 a escala 1:60.000 (izquierda) y la zonificación de amenaza resultado de la investigación del presente artículo a escala 1:25.000 | 82 |
| <i>Figura 36.</i> Mapa de zonificación de amenaza sísmica usando la metodología Superposición. Fuente: Mapa satelital de Google Eartha superpuesto en el mapa de amenaza sísmica, editado por los autores.                     | 83 |

## GLOSARIO

La Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Nacional se utiliza como herramienta descriptiva de los conceptos que involucran todo el tema de la amenaza sísmica. Los conceptos utilizados y definidos aquí están descritos en dicha guía publicada en el año 2015.

- ✓ Amenaza. Es una situación física con el potencial de causar una consecuencia no deseada. Se puede determinar con: (Detonante)\*(Susceptibilidad)\*(Potencial), y puede ser entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento con una intensidad  $i$ , durante un periodo de exposición  $T$ .
- ✓ Espacio. La amenaza es diferente en cada punto, entonces debe haber una distribución espacial de la misma, la cual está dada por la susceptibilidad.
- ✓ Evento. Es el peligro que se manifiesta de diversas formas y que, al definirlo, se debe decir de qué tipo es. Así, el evento define el tipo de amenaza, lo que significa que al evaluar amenaza se debe inclinar por un sistema de clasificación.
- ✓ Frecuencia o recurrencia. Medida de la posibilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo dado. En el cálculo de probabilidad de falla, en la base de datos, se trabaja más frecuencia que con probabilidad.
- ✓ Magnitud de la amenaza. La capacidad de producir daño es función de la magnitud, volumen, dimensiones, velocidad y energía potencial del deslizamiento.
- ✓ Movimiento en masa. Equivale a definiciones tales como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas.

- ✓ Peligro. Evento natural que puede conducir al daño, descrito en términos de vulnerabilidad, y que puede ser existente o potencial. Se debe tener presente que se puede analizar eventos activos o potenciales.
- ✓ Probabilidad anual de ocurrencia. Probabilidad estimada de que un evento de magnitud específica se exceda en un año. La magnitud específica debe estar relacionada con una longitud de afectación a lo largo de un punto específico.
- ✓ Probabilidad de ocurrencia. Distribución temporal de la amenaza asociada con la distribución temporal del evento detonante, capaz de producir deslizamiento o avalancha.
- ✓ Probabilidad ocurrente. Medida numérica del grado de certeza de ocurrencia. Va desde 0, como improbable, hasta 1, como completamente cierto.
- ✓ Probabilidad temporal o espacial. Probabilidad de exposición de un elemento en el área de amenaza o en el momento en que se materialice la amenaza.
- ✓ Riesgo tolerable. Nivel de riesgo con el que la sociedad pueda convivir y entregar un beneficio neto. No es insignificante, por tanto, se debe vigilar y, en lo posible, reducir.
- ✓ Riesgo. Medida de la probabilidad y severidad de un evento adverso a la vida, salud, propiedad o medio ambiente. Es la amenaza por las pérdidas potenciales y sus análisis pueden ser cualitativos y/o cuantitativos. Sus resultados son en probabilidad de pérdidas económicas o humanas por año. La ecuación es una simplificación del problema, porque no tiene en cuenta la interacción entre la vulnerabilidad y la amenaza. La vulnerabilidad es función de la magnitud de la amenaza (volumen, velocidad, área, afectada) y no de la intensidad de la misma (definición probabilística: entre 0 y 1).
- ✓ Susceptibilidad. Mayor o menor posibilidad de que un talud se deslice, sin tener en cuenta el factor tiempo.

- ✓ Tiempo. Asignación de una distribución temporal, debido a que las condiciones del lugar cambian con el tiempo.
- ✓ Vulnerabilidad. Grado de pérdida de elementos en riesgo en área de amenaza. Se expresa como probabilidad de daño: 0 (no daño) hasta 1 (pérdida total). En el área afectada se deben identificar todos los elementos en riesgo, es decir, además de determinar la posibilidad o probabilidad del daño, se debe estimar hasta dónde puede llegar la afectación.

## RESUMEN

**TÍTULO:** Análisis estadístico de los resultados obtenidos por tres metodologías aplicadas, para el conocimiento de la amenaza sísmica en el área piloto del municipio de Betulia, Santander.

**AUTORES:** Sergio Andres Patiño Sanabria, Héctor Armando Meneses Carvajal

**PALABRAS CLAVE.** Amenaza Sísmica, Gestión del Riesgo, Sismo, Zonificación de Amenaza.

**DESCRIPCIÓN:** El siguiente documento se presenta como requisito para obtener el grado de geólogo, y pretende identificar y optimizar el conocimiento de la amenaza sísmica en el municipio de Betulia, que a su vez permitirá lograr la meta de satisfacer la necesidad de avanzar en el conocimiento de la amenaza sísmica a nivel departamental mediante de la réplica y la ejecución de los procedimientos ejecutados y propuestos en el documento, consiguiendo cobertura total en todos los municipios del Departamento.

Para el desarrollo se destaca la implementación del componente geológico, estructural y geodinámico, que son empleados como insumos bibliográficos fundamentales para el desarrollo del procedimiento así como la conceptualización de los factores sísmicos que intervienen en los eventos telúricos. Como el resultado de la implementación de tres metodologías (PGA, IDW, GEOESTADISTICA) se obtienen mapas de zonificación de amenaza, que son generados por medio de sistemas de información geográfica (SIG) específicamente en el programa ARCGIS versión 10.5, y de los cuales derivan procedimientos que permiten realizar conclusiones y recomendaciones en la aplicación de cada una de las metodologías ensayadas con el fin de

determinar la amenaza existente en el municipio piloto y en la propuesta de ejecutar en demás municipios que asemejan características tectónicas.

### **ABSTRACT**

**TITLE:** Statistical analysis of the results obtained by three applied methodologies, for the knowledge of the seismic threat in the pilot area of the municipality of Betulia, Santander.

**AUTHORS:** Sergio Andres Patiño Sanabria, Héctor Armando Meneses Carvajal

**KEYWORDS:** Seismic Threat, Risk Management, Earthquake, Zoning of Threat.

**DESCRIPTION:** The following document develops a research thesis, valid modality as degree work, which aims to provide a series of parameters that allow to identify and optimize the knowledge of the seismic hazard in the municipality of Betulia, which in turn will allow achieving the goal of satisfying the need to advance in the knowledge of the seismic hazard at the departmental level by means of the replication and execution of the procedures executed and proposed in the document, getting full coverage in all the municipalities of the department. For development, is highlighted the implementation of the geological, structural and geodynamic component, which are used as fundamental bibliographic material for the development of the procedure as well as the conceptualization of the seismic factors that intervene in telluric events. As the result of the implementation of three methodologies (PGA, IDW, GEOESTADISTICA) getting hazard zoning maps, which are generated by means of geographic information systems (GIS) specifically in the ARCGIS program version 10.5, and from which derive procedures that allow to make conclusions and recommendations in the application of each one of the tested methodologies with the objective of determining the existing hazard in the pilot municipality and in the proposal to execute in other municipalities that resemble tectonic characteristics.

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de investigación se realiza en el marco de la ampliación del conocimiento en la búsqueda de la amenaza sísmica característica principal y detonante del riesgo y vulnerabilidad de las comunidades. Para realizar el análisis respectivo y la consolidación de la investigación es necesario entender que el conocimiento de la amenaza sísmica que se entiende como la probabilidad de ocurrencia del evento telúrico y que es un factor fundamental a la hora de generar estrategias para la disminución del riesgo de desastres en cualquier lugar del planeta.

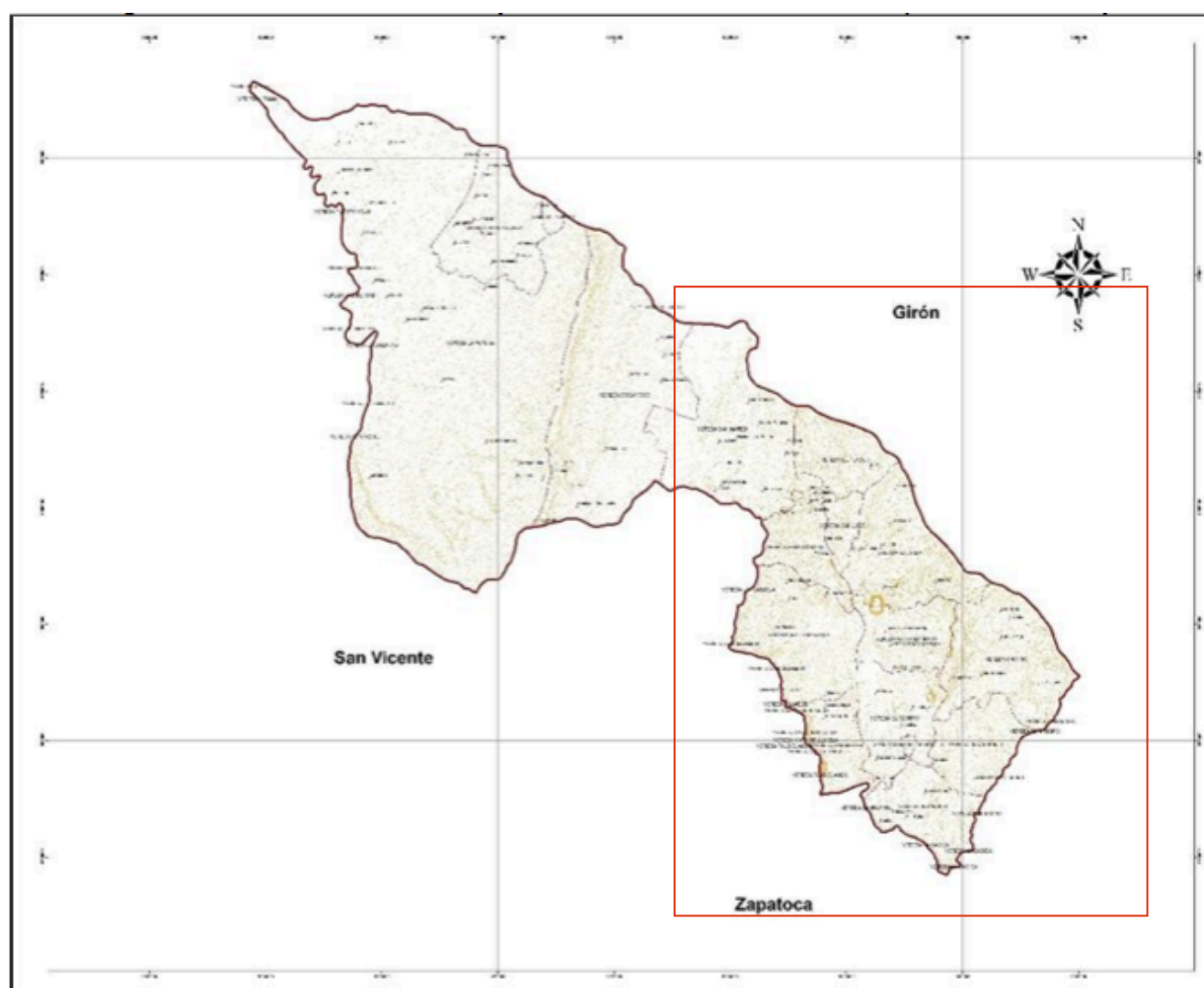
Este proyecto tuvo su origen en el interés de profundizar los conocimientos en amenaza de sismos ayudando con estos a minimizar los impactos en las poblaciones y que derivados de estos estudios los organismos respectivos generen estrategias para prevenir situaciones de riesgo.

Se ejecuta una investigación aplicada con componente descriptivo según el objeto de estudio y que a su vez es no experimental con aplicación de metodologías obtenidas adaptadas a los insumos existentes, que generan como resultado la obtención de conocimiento por medio de mapas de amenaza generados con sistemas de información geográfica.

Se toma el municipio de Betulia como piloto para las pruebas de las metodologías por la cantidad de datos existentes y por la posibilidad de realizar comparaciones de resultados con estudios previos realizados. También, se tienen en cuenta para seleccionar el municipio la importancia del nivel de vulnerabilidad que han presentado las estructuras en los últimos episodios de movimientos telúricos y la asociación en proximidad al nido sísmico de Bucaramanga.

## Referenciación Geográfica

El municipio de Betulia se encuentra ubicado en el centro – occidente del Departamento de Santander, su casco urbano se localiza a unos 90 km de la capital, Bucaramanga, dentro de las coordenadas planas correspondientes a  $X= 1'249.000$  a  $X=1'2863.000$  y  $Y=1'059.500$  a  $Y=1'095.00$  o bien sea  $73,18^\circ$  de longitud oeste y  $6,55^\circ$  de latitud norte.



*Figura 1.* Localización Geográfica municipio de Betulia, Departamento de Santander, Colombia. Seleccionado en cuadro rojo el área de trabajo. Fuente: esquema de ordenamiento territorial del municipio de Betulia documento técnico de soporte tomo iii, editada por los autores.

Localizado al suroccidente de Bucaramanga, los límites de su territorio al norte y nororiente a partir de la ribera del río Sogamoso con el municipio de Girón; al oriente y al sur con Zapatoca con barreras naturales como los cauces de las quebradas El Chato, La Ramera, El Medio, El Ramo y La Máquina; al Sur Occidente con el municipio de San Vicente del Chucurí que son divididos por la quebrada La Putána; y el río Sogamoso; y con el municipio de Barrancabermeja a través del río Sogamoso en su sector noroccidental. La extensión total de este municipio es de 413.3 Km<sup>2</sup>, distribuidos en catorce (14) veredas, que administrativamente se subdividen en 32 centros poblados. (EOT Betulia, 2009).

De acuerdo a la densidad de los datos utilizados para las metodologías ensayadas se realiza la selección de la zona sur del municipio de Betulia (rectángulo rojo, ver figura 1), a la cual hace parte la cabecera municipal y buena parte de centros poblados como la zona de mayor frecuencia de datos y magnitudes sísmicas registradas por las estaciones sismográficas del servicio geológico en el periodo comprendido del 1 de enero de 2013 y 1 de diciembre de 2017.

## 1. OBJETIVOS

### *Objetivo Principal*

Realizar un estudio que permita conocer la amenaza sísmica del Departamento de Santander, a partir del análisis de tres metodologías empleadas para generar mapas de amenaza sísmica mediante un ensayo piloto que tiene como referencia el municipio de Betulia.

### *Objetivos Específicos*

- Mediante análisis de la literatura, seleccionar metodologías que pueden ser utilizadas para evaluar la amenaza sísmica del municipio Betulia, Santander.
- Analizar los resultados encontrados de cada metodología a partir del seguimiento a los procedimientos indicados por cada una de ellas.
- Correlacionar los resultados de las metodologías empleadas y plantear una propuesta sobre los procedimientos a seguir para optimizar el conocimiento de la amenaza sísmica en el municipio de Betulia y a futuro en el Departamento de Santander.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La necesidad actual por conocer la amenaza en el Departamento de Santander ha sido priorizada por los entes gubernamentales, generando el propósito de plantear un proceso que permita obtener el análisis y evaluación de la amenaza por uno de los factores naturales más determinantes como son los sismos; para permitir la optimización de recursos invertidos en la atención de desastres y minimizar la cantidad de vidas perdidas, producto de un eventual desastre ocasionado por movimientos telúricos en el Departamento.

El Departamento tiene la responsabilidad social de cuantificar la amenaza sísmica a partir de criterios técnicos trazables por lo tanto se ha tomado como guía para la metodología general el municipio de Betulia, debido a la densidad de datos existentes y donde el problema ha llevado a realizar estudios previos.

Con el propósito de aportar al continuo mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del Departamento de Santander y principalmente del municipio de Betulia se propone la realización de un estudio enfatizado en el conocimiento de la amenaza sísmica ya que para el municipio según la proyección del censo DANE 2005, en el 2015 estaba conformada por 5.110 habitantes, distribuidos de la siguiente manera 1.114 en la cabecera municipal y 3.996 en los centros poblados y zona rural.

Según información obtenida del Sisbén a septiembre de 2015, se puede decir que en el municipio de Betulia existe un total de 1702 hogares distribuidos el 24.15% en el casco urbano, el 31.02% en los centros poblados y el 44.83% en el área rural.

Tabla 1. *Distribuciones habitantes de Betulia.*

| ZONA            | Nº FAMILIAS | Nº HABITANTES | PORCENTAJE DEL TOTAL |
|-----------------|-------------|---------------|----------------------|
| Casco Urbano    | 411         | 1161          | 24.15 %              |
| Centro Poblados | 528         | 1749          | 31.02 %              |
| Rural           | 763         | 2603          | 44.83 %              |
| <b>Total</b>    | <b>1702</b> | <b>5513</b>   | <b>100%</b>          |

Nota: Adaptado de Sisbén Net (Sept. 2015)

Datos que incentivan a la realización de los análisis metodológicos en cuanto al conocimiento de la amenaza sísmica, para emitir una propuesta que permita y proporcione una preparación suficiente en caso de que la amenaza se convierta en un riesgo y suceda un hecho no controlable pero si de manera preventiva llevando al mínimo los resultados lamentables en el escenario de una catástrofe.

### 3. MARCO GEOLÓGICO

Realizando un análisis a detalle de la plancha 120 para el área de estudio determinada se obtiene que estratigráficamente aparecen en superficie sobre todo el municipio de Betulia 14 formaciones y dos tipos de depósitos, que registran edades Cenozoicas y Mesozoicas; Ubicadas cronológicamente desde el periodo jurásico hasta el periodo cuaternario, y que son definidas y caracterizadas por diversos autores de la siguiente manera:

#### Jurásico

Las rocas con mayor edad se registran desde el jurásico superior y está compuesta por sedimentitas que tienen un espectro de distribución sobre las veredas El placer, Peña morada en su parte más alta, igual que en la parte más alta de San Bernardo, San Rafael, El Centro, La Unión del Norte y la parte baja de las veredas Chimitá, Santa Bárbara, Balzora y San José.

#### ✓ La Formación Girón:

Inicialmente el término “Girón Series” fue acuñado por Hettner (1892) para designar una secuencia de gran espesor aflorante al oeste de Bucaramanga sobre el municipio de Girón, Santander. A la cual se le añadieron estudios adelantados por Trunpy (1943) y por Langenheim (1954) quien finalmente determino la sección tipo sobre la angostura del río Lebrija y la distribuyo en tres miembros: el miembro inferior arenoso, el intermedio lodoso y el miembro superior como arenoso con espesores de 750, 1250 y 1500 metros respectivamente, para un espesor total de 3.500 metros. Entre otros autores que investigaron la Formación Girón resaltan los trabajos hechos por Julivert (1958) y Navas (1963), quienes midieron la sección del Río Lebrija y la clasificaron en siete facies con un espesor de 2690 metros. Pero el estudio más

detallado y completo lo proporcionó Cediel (1968), que descubrió en la sección tipo anterior un total de 4650 metros y la dividió en ocho conjuntos litológicos desde la A la H, que corresponden a las formaciones Girón (conjuntos A-G) y Los Santos (H). Posteriormente Clavijo (1993) propuso el término de la formación Angostura del Río Lebrija, para reemplazar el de la formación Girón del jurásico superior que corresponde a la unidad inferior del grupo Girón de Cediel (1968).

La formación Girón está conformada por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de cuatro centímetros. El espesor de esta unidad varía considerablemente de un sitio a otro, desde unos pocos metros a 4650 metros en el río Lebrija. Presenta un ambiente continental fluvial a lacustre fluviátil. La unidad tiene características estratigráficas de discontinuidad sobre las formaciones Bocas y Jordán e infrayace concordantemente a la formación Tambor. Para Girón se estableció una edad jurásico superior - cretácico inferior (Pons, 1982). En general la formación Girón ha sido correlacionada con la formación La Quinta de edad Jurásico superior y que aflora al occidente de Venezuela (Openheim, 1940). En cuanto a su aprovechamiento minero, estas no presentan gran interés, sin embargo los niveles arcillosos de esta formación son indicadores de ambientes reductores y de baja energía que presentan indicios de Uranio, también se pueden aprovechar en la producción de rajón de piedra y grava. Esta unidad aflora o está presente en el subsuelo en un área extensa de 118.4 km<sup>2</sup> localizada en el noreste del municipio en las veredas San José, Balzora, Santa Bárbara, San Bernardo, San Rafael y en parte de Unión del Sur, Unión del Norte,

Chimitá y Peña Morada. (Modificado de: EOT 2016, municipio de Betulia y Memoria explicativa para el Departamento de Santander 2001.)

### Cretácico

Las rocas aflorantes en el municipio de Betulia de edades cretácicas tienen génesis fluvial de tipo lutitas, sedimentitas, lodolitas y conglomerados que pertenecen Cretácico inferior y otras con procedencia marina como las calizas fosilíferas, lutitas, calizas, lutitas calcáreas, lutitas abigarradas, algunos mantos de carbón, roca fosfórica, areniscas de grano fino, margas entre otras, con registros del Cretácico medio y superior, que tienen un alto porcentaje de aparición en la zona central del municipio de Betulia ocupando las siguientes veredas: Parte baja de Sogamoso, San Mateo, parte baja de Peña Morada, parte baja de San Bernardo y en una franja de la parte oriental del municipio cubriendo las siguientes veredas: Parte alta de la Unión del Norte y Unión del Sur, parte alta de Chimitá y la parte oriental del Centro hacia el cementerio. (Modificado de: EOT 2016, municipio de Betulia).

#### ✓ Formación Los Santos o Tambor.

Descrita por Cediel (1968) y redefinida por Laverde (1985). Está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas cuarzo areniscas gris amarillentas con estratificación cruzada, en capas tabulares de espesores variables. En la localidad tipo el espesor es 218 m. Estas facies han sido interpretadas como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas (Clavijo, 1985; Laverde y Clavijo 1985; Laverde 1985).

El contacto inferior de esa unidad es una continuidad estratigráfica con la formación Girón, mientras el contacto superior es concordante con la suprayacente formación Cumbre. La

formación Los Santos es considerada de edad Berriasiano (Cediel 1968; Etayo y Rodríguez 1985). Litológicamente es comparable con la formación Río Negro de la cuenca Catatumbo-Maracaibo. En cuanto a su aprovechamiento minero, los niveles arcillosos de esta formación sirven para la fabricación de ladrillos, también se pueden aprovechar en la extracción de rajón de piedra, sin embargo la explotación de estos recursos no representa gran interés económico. En el municipio esta unidad se encuentra presente aflorando en una extensión de 30.3 km<sup>2</sup> en dos franjas alargadas presentes, una en las veredas Unión Norte y Unión Sur y otra abarcando parte de San Bernardo, Peña Morada y El Placer. Estas dos extensiones corresponden al 6.39% del área total. (EOT 2016, municipio de Betulia).

✓ Formación de Rosa Blanca.

Descrita originalmente por Wheeler (1929) y estudiada en detalle por Cardozo y Ramírez (1985) en la región de Villa de Leiva (Boyacá) y Gambita (Santander). Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte superior presenta depósitos evaporíticos como yeso y polihalita que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de depositación; el resto de la secuencia se depositó en un medio marino somero en condiciones neríticas. El espesor de esta unidad varía de 150 a 425 metros. Las relaciones estratigráficas de esta unidad con la infrayacente formación Paja son concordantes. La edad comprende el intervalo Valanginiano-Hauteriviano inferior (Etayo, 1968; Etayo Y Rodríguez, 1985).

La explotación de las rocas de esta unidad presenta interés como materia prima para la fabricación de cal (CaO), en la fabricación de cemento, para pisos de mármol negro, como

agregados pétreos y en algunos sectores muy puntuales para la extracción de roca fosfórica y fluorita. Esta formación aflora entre las veredas San Mateo, El Placer, Peña Morada y La Putána (casi sobre el eje del sinclinal Nuevo Mundo), en una zona de 8.4 km<sup>2</sup> de extensión.

✓ Formación Paja.

Data de edades Barremiano-Albiano inferior. Esta unidad está compuesta por lutitas, calizas, areniscas y lodolitas, se encuentra bien expuesta en el cauce de los ríos Lebrija, Sogamoso, Suárez y Fonce, en el extremo sur del Departamento donde está ampliamente distribuida ocupando las áreas de Betulia, Zapatoca, Socorro, San Gil, Confines, Oiba, Suaita, La Paz, Chipatá, Vélez, Jesús María y Albania. Inicialmente descrita por Wheeler (en Morales *et al.*, 1958), su localidad tipo está ubicada en el cerro Rosa Blanca al oriente del puente del río Sogamoso. Esta unidad está constituida por lutitas y shales de color gris oscuro a azulado, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas color gris amarillento, de grano fino y con intercalaciones de shales grises localmente arenosas, calcáreas, fosilíferas, localmente limosos a arenosos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises localmente arenosas fosilíferas. Se estima que su depositación tuvo lugar en un ambiente epicontinental con espesores que varían entre 25 y 635 metros.

El contacto de esta unidad con la suprayacente formación Tablazo es concordante. La edad ha sido determinada del Barremiano inferior al Aptiano inferior.

En cuanto a su aprovechamiento minero no tiene interés, pero este tipo de rocas al contacto con el agua se lixivian dando origen a las remociones en masa. Esta formación se localiza al occidente de la anterior, ocupando una extensión de 5.4 km<sup>2</sup> principalmente en el nororiente de

la vereda San Mateo y en partes menores de Peña Morada y El Placer. (EOT 2016, municipio de Betulia).

✓ Formación Tablazo.

Estudiada y registrada por Wheeler (en Morales *et al.*, 1958) con afloramiento tipo encontrado en el sitio Tablazo, en el cruce del puente del río Sogamoso de la vía Bucaramanga-San Vicente. La secuencia de esta unidad consiste en calizas grises a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas de color gris a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas en capas delgadas. Depositación en ambientes de condiciones neríticas poco profundas muy probablemente y con un espesor que alterna entre 150 y 325 metros. La formación Tablazo se encuentra en contactos concordantes con las infrayacente formación Paja y la suprayacente formación Simití cuya edad es considerada del Aptiano superior - Albiano inferior. En el sitio en que afloran estas rocas en el municipio se ha originado una geomorfología típica de facies de ambientes marinos, niveles de energía bajos que dan lugar a la formación de rocas calcáreas ricas en materia orgánica, masivas de color gris oscuro a negro intercaladas con capas delgadas de lutitas, las cuales generan un paisaje de pendientes fuertes a medias de formas redondeadas, que generan suelos básicos debido a la composición de estas, ricas en materia orgánica y en carbonato de calcio. Las calizas de esta formación presentan algún interés en el campo minero, ya que pueden ser empleadas para la fabricación de cal, cemento o pisos de mármol negro. Esta formación se encuentra presente el sector central de Betulia en la vereda San Mateo. Sus 5.2 km<sup>2</sup> corresponden al 1.25% de la extensión del municipio. (EOT 2016, municipio de Betulia).

### ✓ Formación Simití

Constituida principalmente por lutitas y areniscas con intercalaciones de areniscas calcáreas y calizas, cuyas edades van del Albiano Superior al Cenomaniano. En la región centro-occidental de Santander la unidad está expuesta principalmente en las áreas de Barichara, Socorro, Suaita, San Vicente, Betulia y Puente Nacional. Fue descrita por geólogos de Intercol (en Morales *et al.*, 1958) y su localidad tipo está en la orilla sur de la Ciénaga de Simití, Bolívar. La unidad consta de shales grises a negros, carbonosos levemente calcáreos, con concreciones calcáreas hasta de 3 metros. y con intercalaciones de areniscas y calizas grises localmente arcillosas y fosilíferas, en capas delgadas. Las condiciones paleo-ambientales fueron neríticas de aguas intermedias a profundas con espesores entre 250 y 650 metros.

Los contactos de la formación Simití son concordantes con la infrayacente formación Tablazo y la suprayacente formación La Luna. Su edad se ha establecido como Albiano superior–Cenomaniano. Estas rocas no presentan interés económico, por tanto no son explotadas. La unidad está presente en el sector central de San Mateo en una faja angosta de 5.8 km<sup>2</sup> (EOT 2016, municipio de Betulia).

### ✓ Formación la Luna

Fue descrita por A. Garner (en Julivert *et al.*, 1968) y el nombre procede de la quebrada La Luna, localizada al noroeste de Perijá, Zulia (Venezuela). La unidad está constituida por caliza gris oscura, arcillosa, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas; lutitas grises oscuras con intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro; también capas fosfáticas hacia la parte

superior. En el Valle Medio del Magdalena la formación La Luna se subdivide en tres miembros: el inferior Salada, el intermedio Pujamana y el superior Galembo. Presenta espesores entre 275 y 575 metros y su ambiente de depositación es marino de aguas relativamente poco profundas con poca ventilación en el fondo.

El contacto de la formación La Luna con la Infrayacente formación Simití es concordante. Entre las formaciones la Luna y Umir existe una ligera discontinuidad estratigráfica (Morales *et al.*, 1958). En el Valle Medio del Magdalena se le ha asignado una edad del Turoniano al Santoniano. Económicamente es viable explotar el miembro superior en la producción de roca fosfórica para la producción de abonos. La unidad está presente en la zona central del municipio como una banda angosta de orientación N-S, ocupando 2.8 km<sup>2</sup> (EOT 2016, municipio de Betulia).

#### ✓ Formación Umir

La localidad tipo se encuentra en la quebrada Umir al oriente del cerro del mismo nombre en Santander. Consta de Shales grises negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos; intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas. También es común la presencia de capas explotables de carbón de 0.60 a 5.00 m de espesor. El ambiente de su depositación es nerítico, su espesor se ha calculado entre 1000 y 1400 m. La formación Umir descansa en discontinuidad estratigráfica sobre el miembro Galembo de la formación La Luna. El contacto con la suprayacente formación Lizama es concordante. Los foraminíferos estudiados por varios autores, determinan una edad Campaniano – Maestrichtiano.

La unidad está conformada por lutitas blandas de color gris oscuro a gris verdoso, con capas delgadas limolíticas y mantos de carbón en la parte superior. El interés económico de esta unidad radica en la presencia de mantos de carbón y de posibles acumulaciones de gas e hidrocarburos, dadas las características sedimentológicas, de porosidad y las estructuras que pueden entrapar estos recursos.

La unidad está presente en una extensión de 23 km<sup>2</sup> en las dos márgenes del río Chucurí, suprayacida por el depósito aluvial formado por tal corriente, en el sector occidental de San Mateo y el oriente de la vereda Sogamoso y equivale al 0.05% de la superficie total del municipio de Betulia. (EOT 2016, municipio de Betulia).

### Paleógeno

Estas rocas sedimentarias afloran en las regiones oriental y occidental del Departamento de Santander, donde ocupan grandes extensiones. Se caracterizan por almacenar petróleo y gas y por contener mantos de carbón y arcillas.

#### ✓ Formación Lizama

Fue descrita originalmente por Th. Link (en Morales *et al.*, 1958) y publicada por primera vez por Wheeler (en De Porta *et al.* 1974). Esta unidad aflora al occidente de Santander y su sección de referencia está en la quebrada Lizama, afluente del río Sogamoso.

La unidad se encuentra constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y algunas capas delgadas de carbón. El depósito de estos sedimentos ocurrió en un ambiente bajo condiciones lagunares deltaicas. El

espesor de los estratos alcanza los 1225 metros y esta unidad presenta un contacto normal y transicional con la infrayacente formación Umir. El contacto superior con la formación La Paz, está determinado por una discordancia regional bien marcada. La edad es Paleoceno (Van Der Hammen, 1958).

Esta formación está conformada por lutitas abigarradas, areniscas grises y pardas de grano fino, algunos mantos delgados de carbón en su parte superior, ubicados en la parte oriental de la serranía de La Paz. En cuanto a su aprovechamiento minero, se pueden explotar sus mantos de carbón de la parte superior, para aprovecharlos como combustible de cocina y no intervenir los bosques. Está presente en el extremo occidental de la vereda Sogamoso en una extensión de 26.2 km<sup>2</sup> y su formación abarca el 2.43% de la superficie total de Betulia. (EOT 2016, municipio de Betulia).

✓ Formación la Paz (Tel)

Los autores son los geólogos de la Tropical Oil Company (en Morales et al., 1958) y su sección tipo está en la angostura del río Lebrija, por la vía férrea, abajo de Vanegas. La secuencia estratigráfica está compuesta por areniscas grises conglomeráticas, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises. El depósito de los sedimentos de esta unidad se desarrolló en un ambiente de corrientes trenzadas. El espesor en la sección tipo es de 1000 m, pero generalmente presenta variaciones locales. La formación La Paz descansa discordantemente sobre la formación Lizama. Su contacto superior con la formación Esmeraldas es concordante y transicional.

Conforme a su posición estratigráfica, la edad se considera Eoceno superior. Esta formación está compuesta por arenisca gris clara, conglomerática, masiva; limolita y lutitas de color gris, ubicada en la parte alta y occidental de la serranía de La Paz.

El aprovechamiento económico de esta unidad no es viable ya que ninguno de los minerales ahí presentes representa un interés económico estratégico. Esta formación está presente en una zona amplia que abarca 83.9 km<sup>2</sup> gran parte de ellos correspondientes a la vereda la Putána y una parte minúscula perteneciente a la vereda Sogamoso. La formación La Paz corresponde al 19.84% del suelo o subsuelo de Betulia. (EOT 2016, municipio de Betulia).

✓ Formación Esmeraldas

Término utilizado por primera vez por los geólogos de la Gulf Oil Company (Morales et al., 1958) y su sección tipo está ubicada cerca del caserío Esmeraldas junto al río Sogamoso. Esta unidad se compone de areniscas grises y verdosas, de grano fino, Intercalaciones de limolitas y lutitas moteadas de rojo, púrpura y carmelita; contiene algunas capas delgadas de carbón. El ambiente deposicional fue bajo condiciones lagunares deltaicas. El espesor se ha calculado en unos 1200 metros. El contacto inferior con la formación La Paz es concordante, mientras el contacto superior está determinado por una posible discordancia con la formación Mugrosa. La edad es Eoceno inferior-medio.

Esta formación es conformada por arenisca gris clara en capas delgadas, limolita y lutitas de color gris, con algunos mantos delgados de carbón lignito; ubicadas en el piedemonte de la serranía de La Paz. Esta litología genera suelos ácidos debido a la alta concentración de silicatos. Su aprovechamiento minero no es viable ya que ninguno de los minerales presentes es de interés

económico o estratégico. Aflora en la parte central de la vereda La Putána en una franja alargada que va desde la quebrada La Putána hasta el río Sogamoso, abarcando 28.7 km<sup>2</sup> que equivalen a 6.25% del municipio. (EOT 2016, municipio de Betulia).

✓ Formación Mugrosa.

El nombre fue introducido por A. K. Gill (en Morales *et al* 1958) y corresponde a la parte inferior del grupo Chuspas; su selección tipo se encuentra en la quebrada Mugrosa.

La unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas areniscas conglomeráticas, la parte media consta de shales moteados con algunas intercalaciones de arenisca. Hacia la parte superior se presentan lodolitas moteadas, fosilíferas. Es una de las unidades más productivas de petróleo en la Concesión de Mares. El ambiente de depositación se considera como continental fluvial. El espesor varía entre 500 y 800 metros.

El contacto inferior de la formación Mugrosa es aparentemente discordante con la formación Esmeraldas, en tanto que el superior con la formación Colorado es concordante. Su edad es considerada del Eoceno superior-Oligoceno inferior. Esta formación está compuesta por arcillolitas blandas abigarradas y areniscas de grano fino medio, ubicadas en el sector occidental de la serranía de La Paz y presenta un potencial alto para la explotación de petróleo, de agregados pétreos (materiales de construcción) y de arcillas para la fabricación de ladrillo.

La formación está presente en el extremo occidental del municipio en la vereda La Putána. También aparece localizada en superficie entre las formaciones Esmeraldas y Mugrosa,

perpendicular al eje del Sinclinal de Nuevo Mundo. Ocupa una extensión de 40.1 km<sup>2</sup> que equivale a 9.09% del área total del municipio. (EOT 2016, municipio de Betulia).

### Neógeno

#### ✓ Formación Colorado

Unidad compuesta principalmente por lutitas con intercalaciones de areniscas con edades de Oligoceno superior-Mioceno inferior, que se encuentran constituyendo los flancos de los principales anticlinales y sinclinales presentes en la región occidental de Santander.

El autor de la descripción es A.K. Gill (en Morales et al, 1958) y tiene su sección tipo en el río Colorado en área de la concesión de Mares. Esta unidad corresponde a la parte superior del grupo Chuspas y en su parte inferior consiste predominantemente de arcillolitas pardo rojizas con intercalaciones de areniscas de grano grueso a conglomeráticas, en capas de espesor variable. La parte superior se compone de arcillolitas grises oscuras a negras, carbonosas, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas de grano medio en capas delgadas. En el campo La Cira-Infantas de la Concesión de Mares, es una de las unidades más productivas de petróleo. Se considera que los sedimentos de esta unidad se depositaron bajo condiciones fluviales. El espesor es variable entre 1200 y 2500 metros. La formación Colorado descansa concordantemente sobre la formación Mugrosa y su contacto superior con el grupo Real es discordante. La edad es considerada como Oligoceno superior a Mioceno inferior.

Esta formación está conformada por arcillolita parda, rojiza, arenisca de grano grueso a conglomerático, ubicada en el sector occidental de la serranía de La paz, esta litología genera suelos ácidos debido a la alta concentración de silicatos.

Estas rocas presentan potencial interés económico para la explotación de petróleo, de agregados pétreos (materiales de construcción) y de arcillas para la fabricación de ladrillo. Colorado se localiza en el extremo norte de Betulia en la vereda La Putána en una superficie de 4 km<sup>2</sup> (EOT 2016, municipio de Betulia).

### Cuaternario

- ✓ Depósitos coluviales y aluviales.

En el municipio de Betulia, los depósitos cuaternarios son muy variados en su origen y se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los valles de los ríos Sogamoso y Chucurí y las quebradas la Putána y Zapatoca. La unidad está conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluviones, derrubios, glaciares y fluvio-glaciares, que son considerados del Holoceno. Estos depósitos están conformados por material detrítico de origen ígneo y metamórfico, de formaciones que no afloran en el municipio pero si en sectores vecinos, y sedimentarios que han sido transportados por ríos y quebradas. Los mismos se encuentran ubicados en la ribera del río Sogamoso en la vereda la Putána, en la parte noroccidental del municipio. Estas unidades constituyen un importante recurso para la explotación de agregados pétreos, por esto la empresa Esgamo extrae dicho material en el sector de La Playa.

Un segundo depósito cuaternario en importancia está ubicado en las riberas de las quebradas la Putána y Zapatoca. La unidad está presente en la vereda la Putána, en el río Sogamoso y la quebrada la Putána, en la vereda Sogamoso y San Mateo en el río Chucurí, en las veredas Unión del Sur, Unión del Norte y Chimitá, en la quebrada Zapatoca. Estos depósitos recientes ocupan una extensión de 31.1 km<sup>2</sup>(EOT 2016, municipio de Betulia).

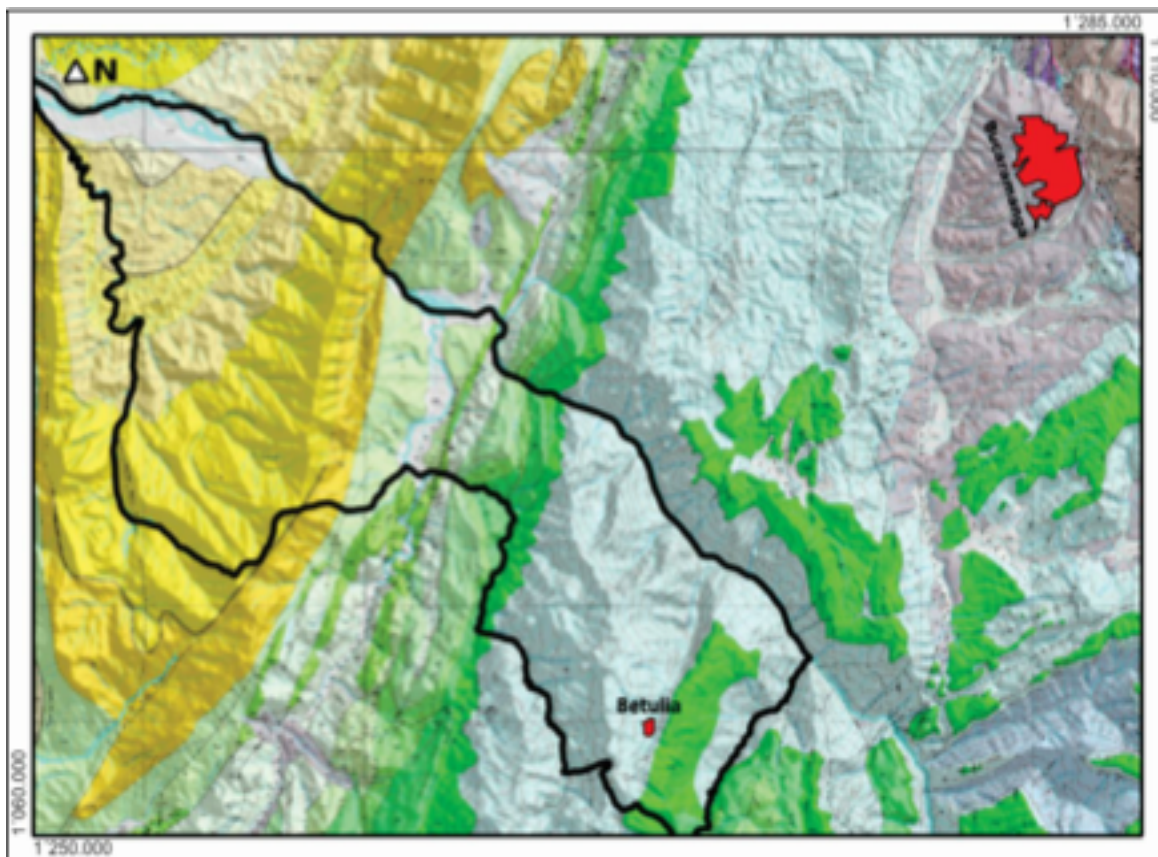
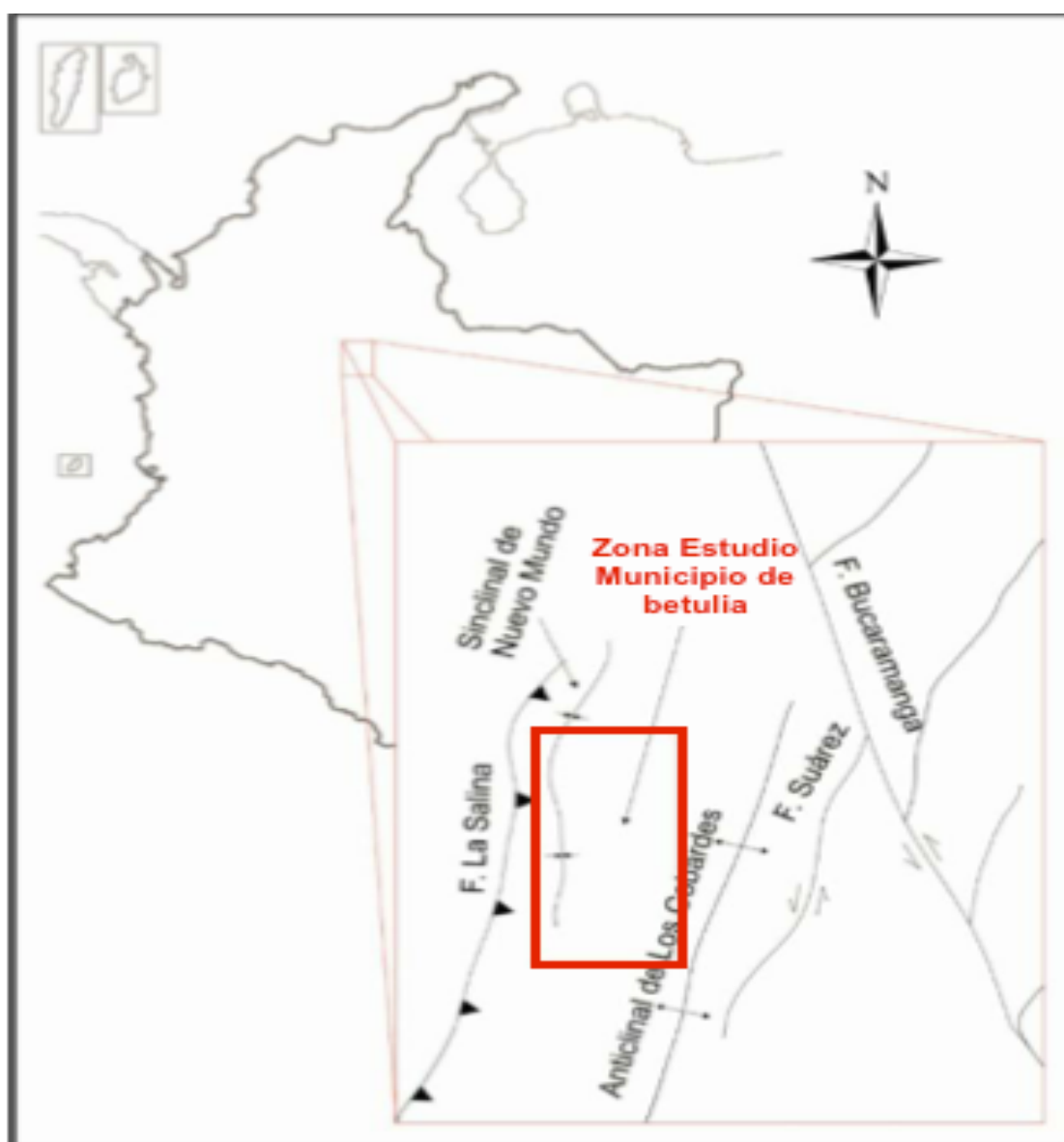


Figura 2. Mapa Geológico Adaptado de la plancha 120, Fuente: esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betulia documento técnico de soporte tomo iii, 2016.

De la misma manera, **ESTRUCTURALMENTE** “El municipio de Betulia se localiza en la región estructural central del Departamento de Santander, la zona de estudio se encuentra enmarcada dentro del Anticlinal de los Cobardes, estructura que está muy fracturada y replegada. Las principales estructuras que se encuentran en el área de estudio son fallas en sentido NE – SW (Falla de Betulia, Falla de Zapatoca) y lineamientos transversales en sentido NW – SE, que se truncan contra las estructuras longitudinales”. (EOT Betulia, 2016.)

En general la zona de estudio, se encuentra dominada por la composición de distintos basculamientos de bloques causado por la acción de fallas paralelas al eje del Anticlinal de los Cobardes, que se comportan localmente como fallas normales enmarcadas en una tectónica

compresiva., que origina el levantamiento general de la cadena montañosa ( Anticlinal de los Cobardes) y la reactivación de antiguas fracturas (NE – SW) y (NW – SE) que ocasionan la tectónica de bloques dentro de la zona (Julivert., 1958).



*Figura 3.* Mapa estructural de influencia para la zona de estudio del municipio de Betulia. Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betulia documento técnico de soporte tomo iii, 2016. editada por los autores.

#### 4. METODOLOGÍA

Se realizó un diagnóstico de la posición actual de los territorios en cuanto a la gestión de riesgo y toda la normatividad que envuelve a cada actor responsable de contribuir con el bienestar integral de los habitantes y su ecosistema, resaltando y enfocando la amenaza sísmica como un factor de riesgo.

Se trajo a estudio análisis ya realizados y documentos existentes de amenaza sísmica existentes a partir de una exhaustiva búsqueda de material sobre conocimiento de la amenaza sísmica en diferentes escalas que pudiese ser aplicado al Departamento de Santander, empleando al municipio de Betulia como piloto y que a su vez que contuvieran importantes descripciones técnicas en donde se resalta el factor de infraestructura y población que están expuestos a ser partícipes de un evento telúrico.

Seguidamente, se clasificó la importancia de la preparación para afrontar la amenaza sísmica desde el punto de partida del conocimiento y plantear desde ésta, una mitigación correctiva y prospectiva al tiempo de tener optimización en los recursos económicos y presupuestales.

Finalmente se plasma en este documento el resultado del proyecto; un registro de los procedimientos adecuados que se deben emplear para realizar el análisis partiendo de modelos probabilísticos, estocásticos, índices cuantitativos, indicadores cualitativos, determinísticos que son empleados para evaluar la amenaza sísmica.

## 4.1 Materiales

Se realizó una compilación de los diferentes insumos que se emplearon para la ejecución, resultados, análisis y conclusiones de cada metodología ensayada.

### 4.1.1 Estaciones Sismográficas de Colombia

Los datos obtenidos de sismos en el Servicio Geológico Colombiano y que sirvieron de insumo fundamental para la investigación se toman a través de unas 52 estaciones sismográficas (Figura 4, triángulos negros) de las cuales 2 se ubican en el Departamento de Santander. También Colombia cuenta con 31 estaciones sismológicas portátiles que requieren que el personal haga trabajo en campo así como redes de acelerógrafos fijas, portátiles e híbridas .

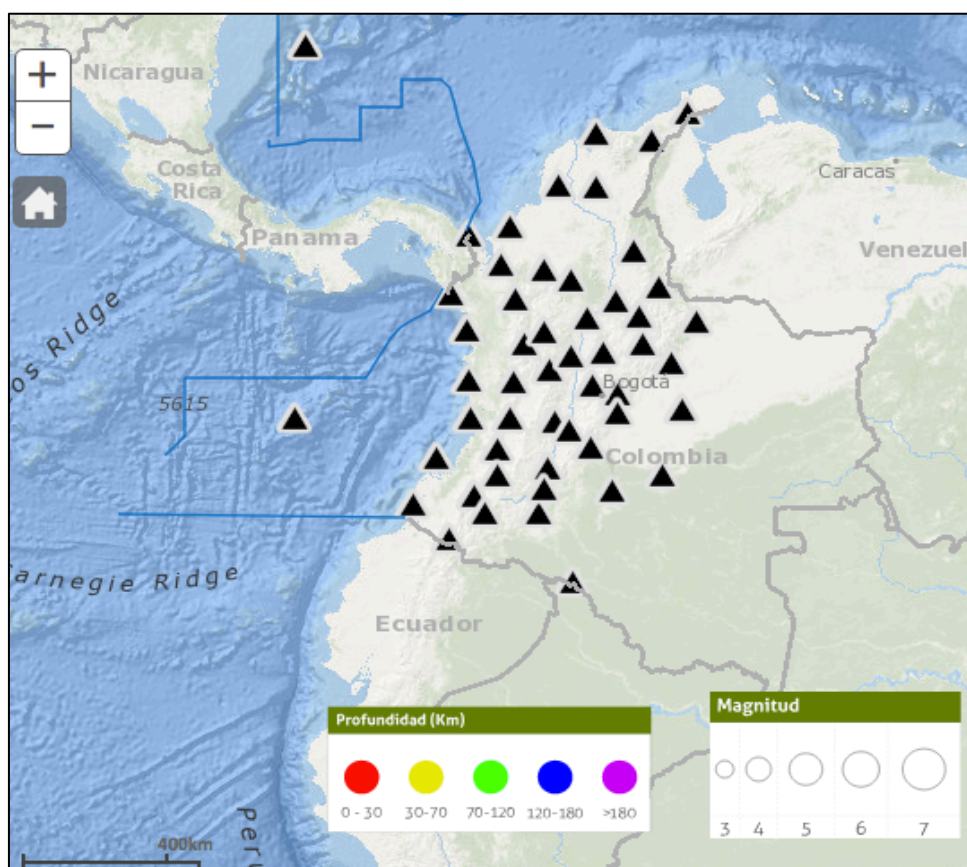


Figura 4. Estaciones Sismológicas del Servicio Geológico Colombiano, Tomado de <https://www2.sgc.gov.co/sismos>

#### **4.1.2 Catalogo de sismos**

A través de la red sismológica manejada por el Servicio Geológico Colombiano se obtiene un catalogo de sismos donde se registran los 508 de los movimientos ocurridos entre el periodo de tiempo comprendido desde el 1 de enero de 2013 al 1 de diciembre de 2017, en donde se observa (Ver figura 5) que están localizados geográficamente de acuerdo a su epicentro, clasificados por medio de una leyenda con variable radio de una circulo de acuerdo a su magnitud registrada y clasificados por colores de acuerdo a su profundidad.

De acuerdo con la tabla anexa (ver anexo 1) se identifican sismos de magnitudes desde 0.7 en escala de Richter hasta magnitudes de 3.5 en la misma escala; con profundidades predominantemente de 70 km a 180 km, pero también con datos menos frecuentes de 0 a 70 km de profundidad y casi nulos por encima de los 180 km de profundidad.

Estos datos sísmicos manejados son el insumo fundamental para el ensayo de las tres metodologías aplicadas en este proyecto y juegan un papel determinante al momento de obtener el resultado final de los mapas de zonificación de amenaza.

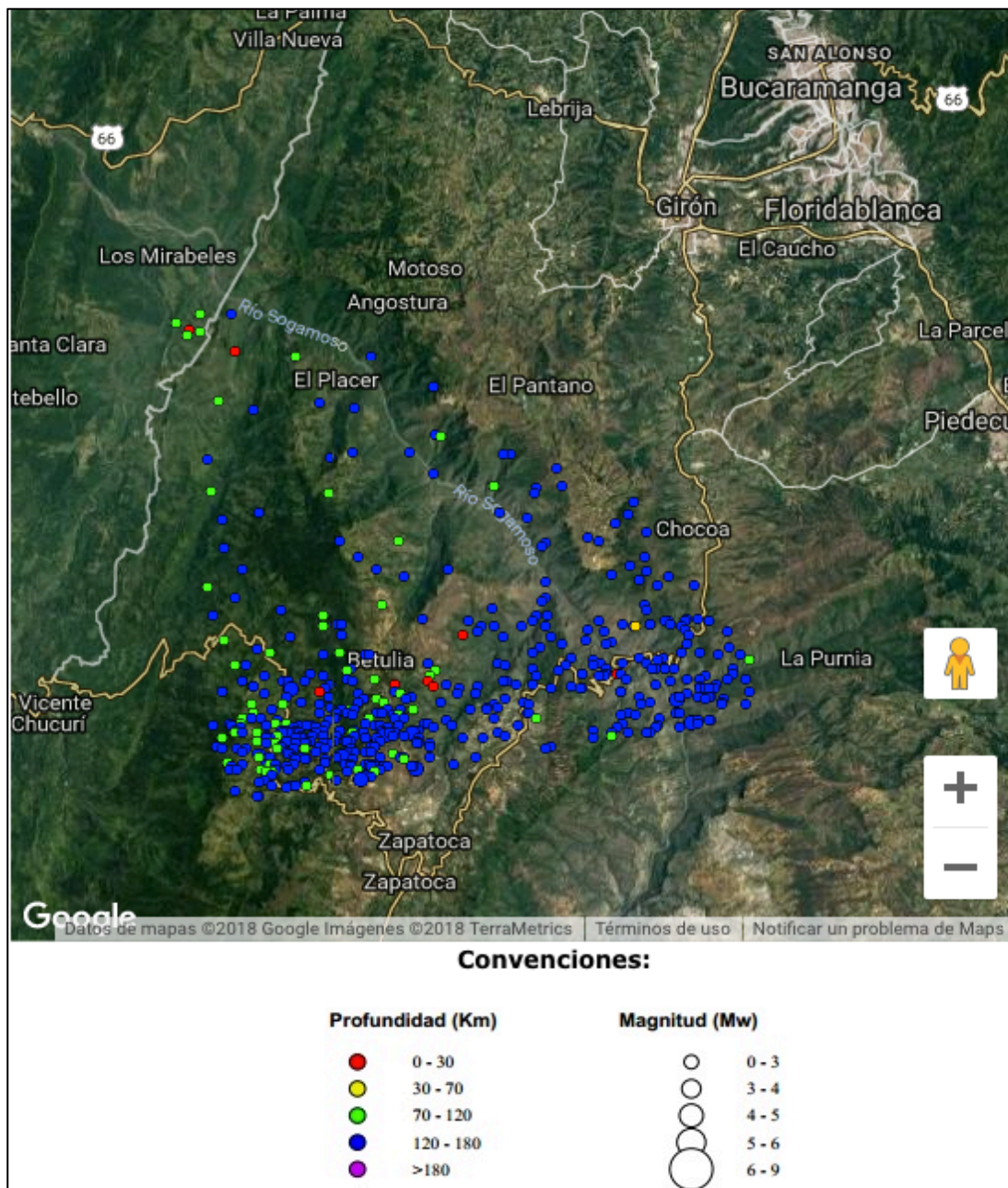


Figura 5. Catalogo de sismos con epicentro en el Departamento de Betulia del periodo comprendido entre el 1 de Enero de 2013 a 1 de Diciembre de 2017. Tomado de <https://www2.sgc.gov.co/sismos>

### 4.1.3 Mapa geológico

Para realizar el procesamiento de la zonificación de amenaza sísmica se requirió la información de la geología del área trabajada tanto de las formaciones litológicas como de los sistemas estructurales. El área que fue delimitada del municipio de acuerdo a la concentración de los datos existentes sobre la zona sur del municipio de Betulia (ver figura 6).

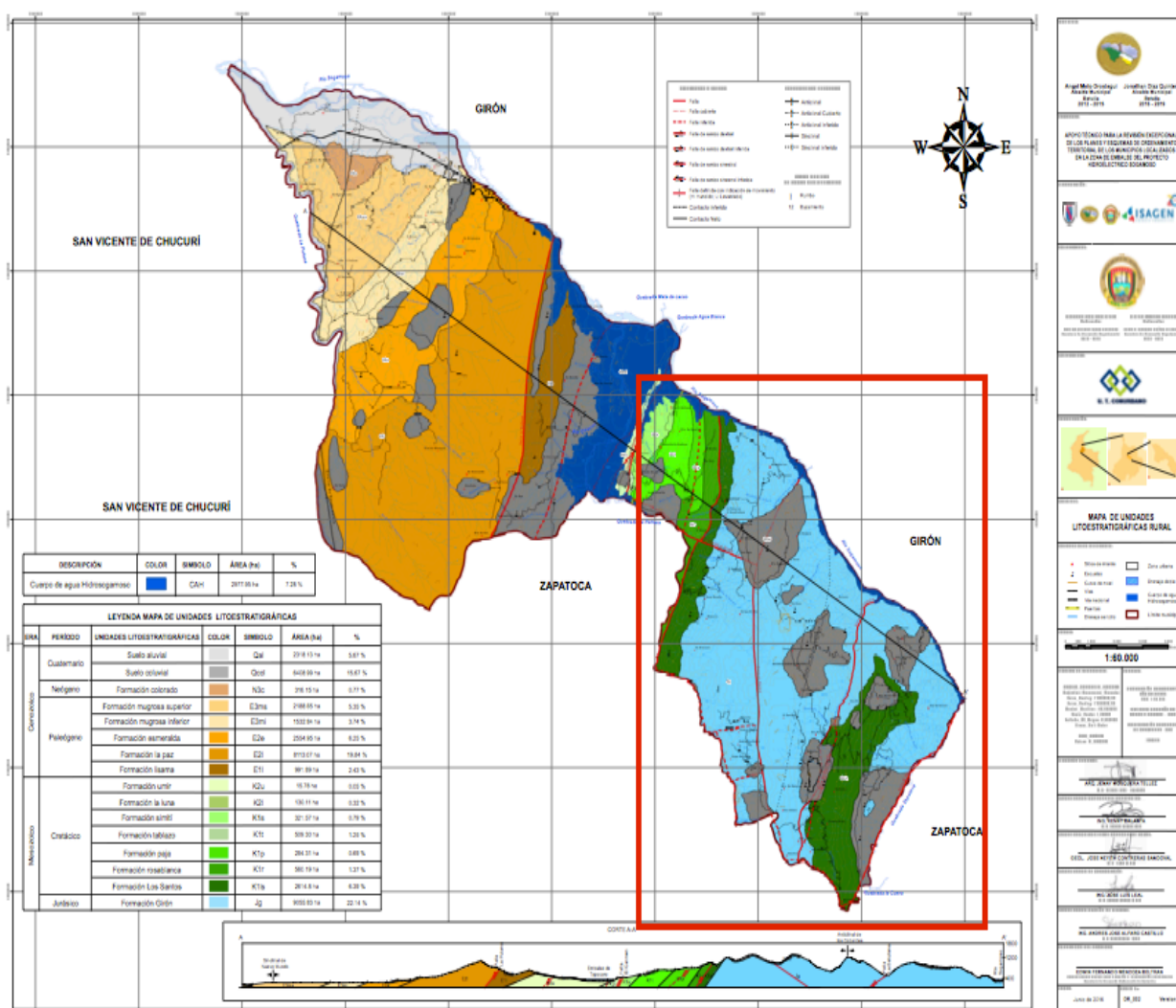


Figura 6. Mapa geológico del municipio de Betulia (área seleccionada para trabajo en cuadro rojo). Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betulia 2016, editada por los autores.

#### 4.1.4 Mapa de pendientes.

Como herramienta para ejecutar las metodologías descritas se utiliza un mapa de pendientes que es adaptado a la necesidad del área trabajada. En el mapa se indica que la zona sur presenta tendencia a tener pendientes empinadas, muy empinadas, escarpadas y fuertemente escarpadas.

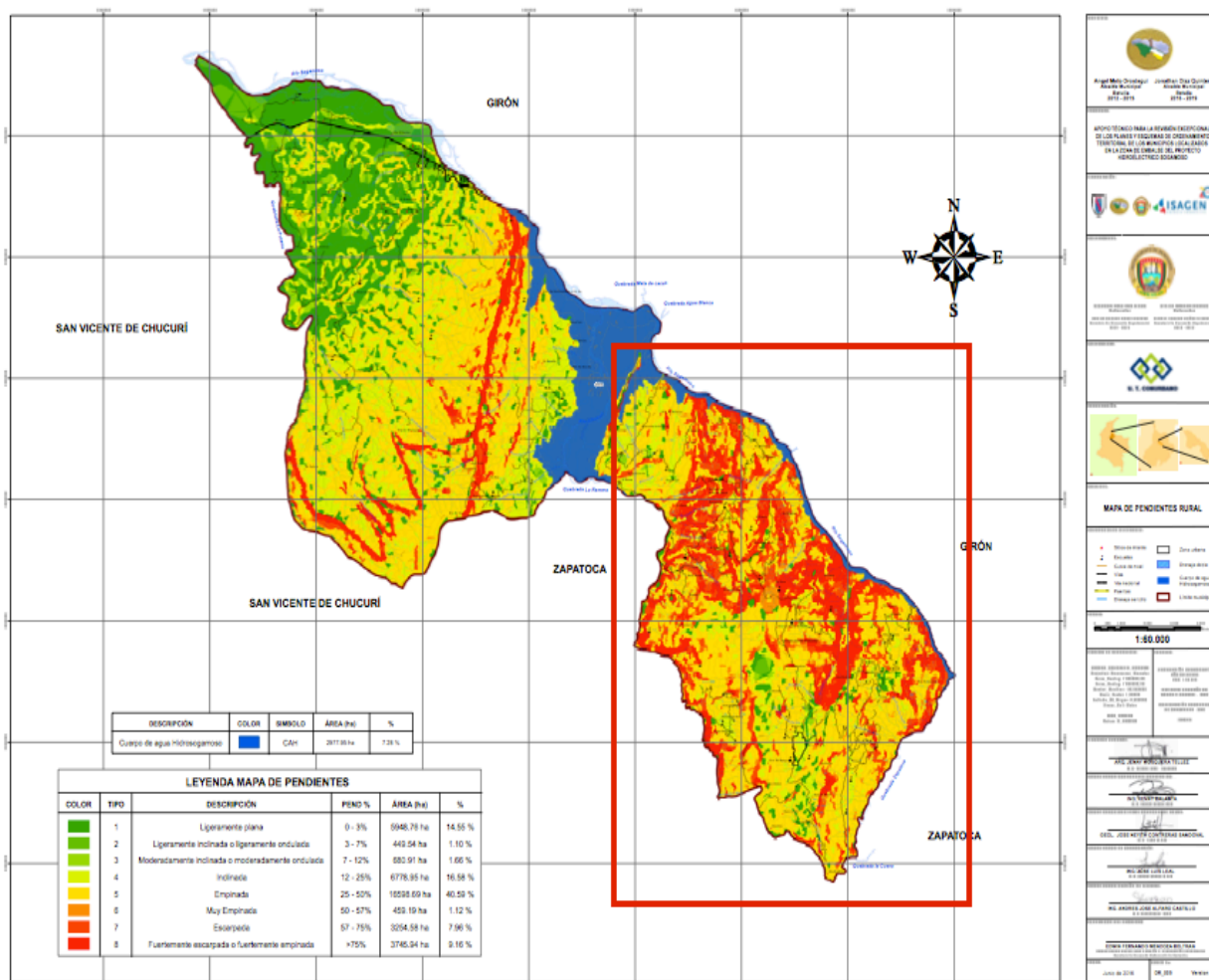


Figura 7. Mapa de pendientes del municipio de Betulia (área seleccionada para trabajo en cuadro rojo). Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Betulia 2016. editada por los autores.

#### 4.1.5 Métodos frecuentes de para análisis

A lo largo del tiempo el desarrollo de alternativas para el conocimiento de la amenaza sísmica ha presentado avances significativos, “desde que se presentaron los primeros estudios de este tipo en la Unión Soviética (Gorshkov, 1941) y en Estados Unidos (Richter, 1959), y pasaron de ser una especificación muy elemental de la diferencia entre zonas con distinta actividad sísmica a calcular el nivel de intensidad de movimiento del suelo esperado en un lugar dado durante un periodo de tiempo determinado. El desarrollo a la par de la ingeniería y la evolución de recursos antisísmicos han ido de la mano”. (Muñoz, 1989).

Para evaluar la amenaza sísmica los métodos más empleados están clasificados como probabilísticos y determinísticos. Según Zamudio en el año 2003 describe que el método determinístico “se basa en el principio que la sismicidad de una región será idéntica a la ocurrida en el pasado” y el método probabilístico es donde la “actividad sísmica está gobernada por leyes estadísticas que emplea funciones probabilísticas para determinar la ocurrencia de los sismos.”

Así mismo, Belén *et al* en 1999 señala que “los modelos deterministas fueron los primeros desarrollados, y tienen por objetivo obtener valores de aceleración, sin proporcionar información sobre los valores de retorno... no analizan las incertidumbres introducidas en el proceso del cálculo, ni contienen criterios claros que permitan asegurar que el sismo obtenido sea el máximo esperable”. Por otra parte, ilustra que los métodos probabilísticos “comenzaron a desarrollarse a finales de los 60, teniendo ya por objetivo estimar valores de aceleración con una probabilidad asociada, lo que permite definir valores de diseño para un determinado periodo de retorno”.

#### ***4.1.5.1 Probabilístico.***

Este método calcula la probabilidad de ocurrencia de distintos niveles de intensidad en relación a la intensidad del movimiento del suelo producida en un lugar determinado por un periodo de tiempo establecido. Para proceder con este método se debe en primer lugar definir las fuentes sismogénicas, deducir las leyes estadísticas que rigen la sismicidad de cada fuente, determinar una función de atenuación del movimiento del suelo y calcular finalmente la probabilidad de superar cierto nivel de intensidad. Los métodos probabilísticos no obtienen únicamente el valor máximo de intensidad, sino que obtiene la distribución máxima de probabilidades. Dentro del método probabilista, Corneli presentó en 1968 un trabajo que ha constituido el punto de partida de muchos trabajos posteriores. Los valores de riesgo obtenidos por estos métodos se dan, comúnmente, en probabilidades anuales o en periodos de retorno, es decir, se obtiene la probabilidad anual o el período de retorno de un cierto nivel de intensidad de movimiento del suelo. El periodo de retorno fue definido por Gumbel como el inverso de la probabilidad anual. (Modificado de: Muñoz, 1989).

#### ***4.1.5.2 Determinístico.***

El método determinístico ofrece una sencillez para ser empleado, pero puede manifestar problemas al desconocer la probabilidad que se asocia al máximo de movimiento, así como la caracterización de fuentes producto del mayor sismo sin incluir la ocurrencia (López & Espinosa, 1978). De manera general, Belén et al (1999), define el cálculo de este método a partir de 4 pasos que son mencionados a continuación:

1. Definición del área de influencia en el emplazamiento e identificación de las fuentes sísmicas o estructuras de fallas englobadas en ella. Si la sismicidad se puede considerar homogénea en toda el área, se define una única fuente sísmica de influencia global, y el método entonces se denomina no zonificado. Si se identifican zonas con potencial sísmico diferente, se entiende que el método es zonificado.
2. Estimación de los máximos terremotos ocurridos en el área de influencia o en cada una de las zonas fuente. Determinación, si ha lugar, de los sismos característicos y definición del máximo sismo potencial que se puede generar, previsiblemente, en cada zona o estructura delimitada.
3. Estimación de la acción sísmica en el emplazamiento, causada por los máximos sismos potenciales de cada zona o de toda el área. Por la hipótesis asumida de que la sismicidad es aleatoria en cada zona, el sismo máximo podría tener lugar en cualquier parte de la misma. Por ello, siguiendo un criterio conservador, dicho sismo se sitúa en el punto de la zona más cercano al lugar donde se realiza la predicción. La aplicación de leyes de atenuación con la distancia proporciona entonces valores de la intensidad del movimiento en el emplazamiento, como consecuencia de la actividad de cada zona definida.
4. Determinación de la peligrosidad en el emplazamiento, tomando el máximo valor de intensidad del movimiento generado por las diferentes zonas, con lo que la peligrosidad queda caracterizada por el límite superior del movimiento en el punto.

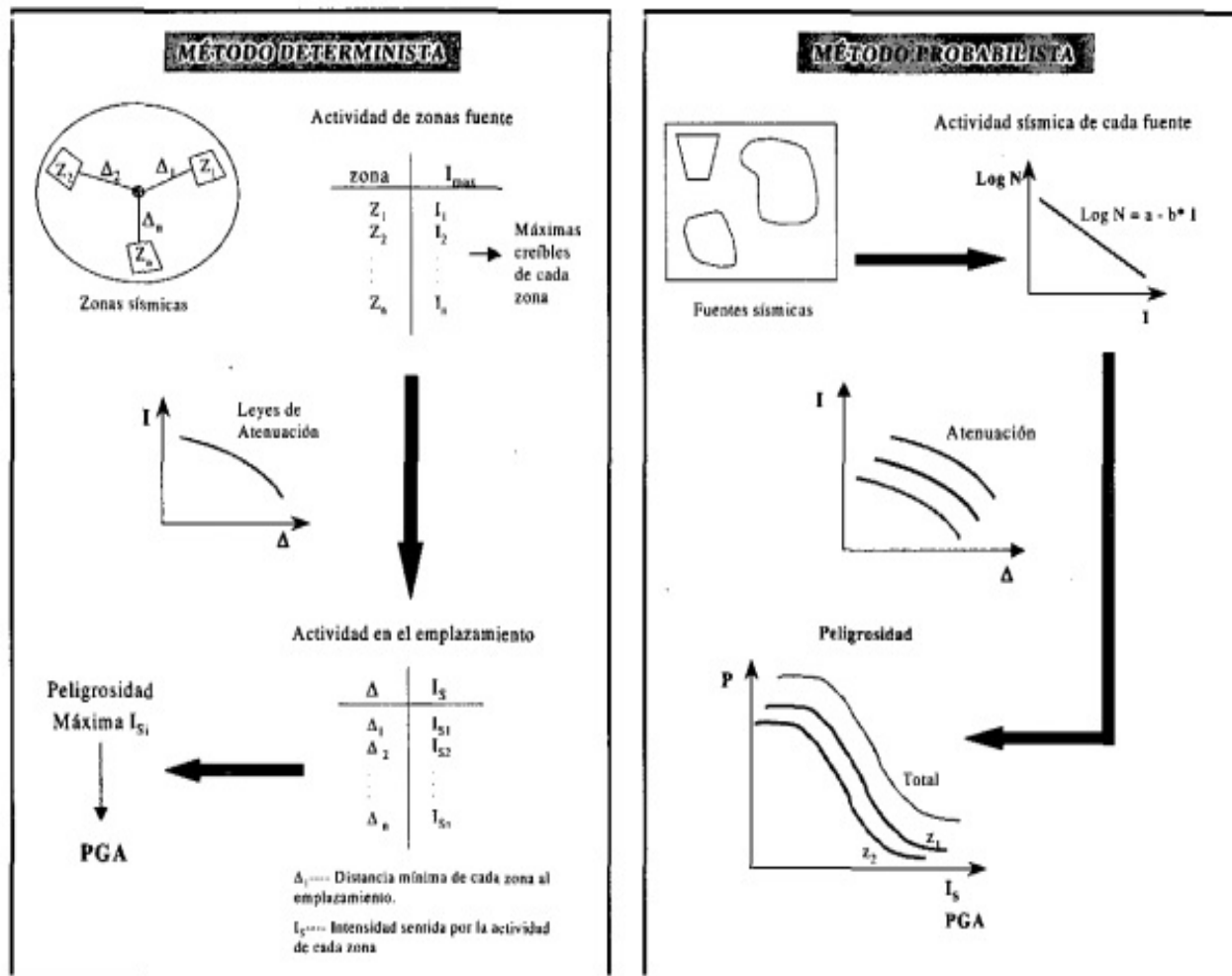


Figura 8. Esquema de los métodos determinista y probabilista. Adaptado de: Belén, et al 1999. Pág. 31.

#### 4.1.5.3 Método de valores extremos

Este método fue descrito por Muñoz 1989 en el capítulo titulado conceptos básicos en riesgo sísmico de la siguiente manera:

“Los métodos probabilistas se basan en leyes estadísticas obtenidas a partir de la información contenida en los catálogos sísmicos, pero estos son incompletos para recopilar todos los terremotos contenidos y excluyen los pequeños y medianos movimientos más antiguos. La

formulación para remediar ese inconveniente ha sido el planteamiento que hizo Gumbel en 1958, un método llamado valores extremos que consiste en dividir la muestra original en  $N$  intervalos de tiempo y tomar el máximo terremoto de cada intervalo; se pasa así de la muestra original a una muestra de  $u$  valores extremos, que si se puede considerar completa, ya que es lógico que en los catálogos sísmicos se recojan los terremotos grandes ocurridos en el pasado.

La función de distribución de la probabilidad para los valores extremos se ajusta, según Gumbel, a tres distribuciones asintóticas. En la primera, tipo I, la variable no está limitada; en la segunda, tipo II, la variable tiene un límite inferior y en la tercera tipo III la variable tiene un límite superior. La distribución con más sentido físico para ajustar a la ocurrencia de terremotos es la tercera, ya que el tamaño de los terremotos tiene un límite que viene dado por las condiciones elásticas del terreno.

Autores como Knopoff y Kagan, 1977 concluyeron que los métodos que utilizan todos los datos proporcionan mejores estimaciones de los parámetros sísmicos. Además, con este método se puede perder información sobre terremotos de magnitud o intensidad máxima moderada, es decir, sobre las probabilidades altas, o daños menores, que pueden ser de interés en el diseño de ciertas estructuras.”

#### ***4.1.5.4 Método de estimación Bayesiana.***

“Debido a diversos factores, como poca resolución en la localización de los sismos y en la asignación de tamaño, longitud de muestra pequeña frente a los períodos de retorno deseado, etc., existen incertidumbres en los parámetros sísmicos. Para tener en cuenta estas incertidumbres, algunos autores proponen aplicar el teorema de Bayes o teorema de las probabilidades de hipótesis, es decir, considerar los parámetros sísmicos no como constantes de

valor desconocido sino como variables aleatorias. Las ventajas de la aplicación del teorema de Bayes a la estimación de la peligrosidad sísmica han sido discutidos por Esteva (1970, 1976) y resumidas por Campbell (1982) en dos puntos: el primero es que además de la incertidumbre probabilística asociada con la aleatoriedad inherente a la ocurrencia de terremotos, se pueden incorporar incertidumbres estadísticas asociadas con la estimación de los parámetros usados para cuantificar la sismicidad; de otra manera se suministra un medio riguroso de combinar información previa sobre sismicidad, bien sea de valoración geológica o estadística, con observaciones históricas de ocurrencia de terremotos. Esta información puede ser utilizada como complemento a los datos de sismicidad, cuando éstos son incompletos. También permite la incorporación de nueva información sobre la ocurrencia de terremotos a medida que se va obteniendo. Aunque ha sido utilizada por algunos autores, su aplicación en los estudios de riesgo sísmico, es muy limitada.” (Muñoz, 1989).

#### **4.1.5.5 Otros**

Un procedimiento diferente para encontrar la amenaza sísmica fue propuesto Woo (1996), quien planteo un método probabilista caracterizando cada punto del área de influencia por una función que da la razón media de actividad  $X(M_x)$  función que muestra número anual de eventos de magnitud  $M$ , que se esperan en la localización  $x$ ; considerando a cada terremoto como un auto modelo de una secuencia de otros terremotos futuros y que deja de un lado el concepto de zona frecuente o zona fuerte (Kagan y Knopoff, 1980).

Otro de los métodos usados son los métodos paramétricos, cuyo fundamento matemático de estos métodos fue analizado por Cornell (1968) que también es conocido como Método de Línea Fuente. Se resuelve esencialmente a partir de la adopción de un modelo de zonas sismogénicas, y en el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia; adicionando la

contribución de todas las fuentes para obtener la función de probabilidad que representa la amenaza en el sitio. En primera medida se hace la delimitación de zonas sismogénicas en el área de influencia, luego se determina un modelo de recurrencia en cada fuente sismogénica, se establecen seguidamente las intensidades o magnitudes máximas y mínimas, que establecen los límites de validez del modelo y se procede a encontrar la estimación de leyes de atenuación con la distancia aplicables a las diferentes zonas, en términos del parámetro empleado para evaluar la amenaza (generalmente aceleración máxima). Y se determina la amenaza total, que surge de sumar todas las probabilidades obtenidas por acción de todas las zonas que influyen en el sitio a evaluar, representada por la siguiente ecuación que es la distribución temporal de Poisson:  $H = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-\alpha_i})$ ; Donde  $\alpha$  la tasa anual de sismos ocurridos en cualquier zona que den lugar a una intensidad del movimiento superior a la de referencia en el sitio estudiado, y  $n$  el número de zonas. (Modificado de Cornell, 1968).

También Frankel en 1995, desarrolló un planteamiento para encontrar la amenaza con fundamento base en la estimación de tasas de actividad sísmica en cada celda estimada de una cierta superficie, generalizando las técnicas y facilitando la determinación de los resultados.

Mediante el paso del tiempo, con mucha mayor precisión se han compilado todos los eventos que se pudieron cubrir mediante herramientas de medición y que como resultado, el servicio geológico de los Estados Unidos ha entregado para el último periodo de la humanidad una estadística clara de los sucesos a nivel global.

Para el desarrollo de trabajo de investigación se emplea el sistema de información geográfica ArcGis versión 10.5 de donde se emplean datos y elementos a procesar para el modelamiento y la obtención de los mapas de amenaza sísmica sobre el municipio de Betulia.

Se emplean los datos del servicio geológico en relación a los datos de magnitud, intensidad y localización de los sismos ocurridos en el municipio de Betulia, Departamento de Santander en el periodo comprendido entre el mes de Enero del año 2013 y el mes de Diciembre de 2017, así como los datos de mapas estructurales, geológicos y datos obtenidos en algunos estudios realizados para el municipio como los EOT más recientes que son referenciados en la recopilación bibliográfica.

#### ***4.2 Métodos Empleados***

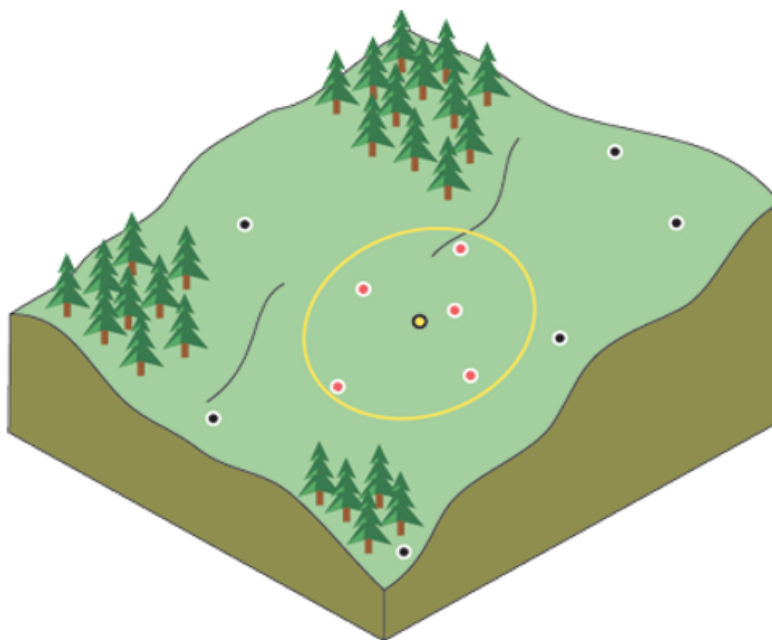
Para obtener mapas de zonificación para amenaza sísmica, se utilizó el ensayo de 3 metodologías descritas a continuación, resaltando el tipo, características y respectivo procedimiento.

##### **4.2.1 Metodología Determinística: INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW)**

La herramienta IDW (Inverse Distance Weighted) es una metodología determinística donde utiliza un método de interpolación que calcula los valores de las celdas promediando los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca esté un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de promediación. El método de interpolación IDW es empleado en la ponderación en función inversa de la distancia (Paredes Hernández, Salinas Castillo, Martínez Becerra, & Jiménez Hernández, 2013),

Esta metodología realiza una interpolación de la magnitud de los sismos. donde de manera general se busca atribuir valores a puntos no probados a partir de puntos probados y relacionados inversamente con la distancia. (Bartier and Keller, 1996).

La interpolación de distancia ponderada inversa (IDW) determina los valores de celda mediante una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra donde el peso es una función de la distancia inversa y la superficie que se está interpolando debe ser la de una variable dependiente de la ubicación (Ver figura 9).



*Figura 9.. Vecindad para un punto seleccionados mediante metodología IDW. Tomado de: <https://es.scribd.com/document/339172469/How-IDW-Works>.*

Este método IDW se disponible en la mayoría de los programas de SIG (Sistemas de Información Geográfica) y es un método de interpolación no paramétrico, que no modela supuestos y probabilidades en la distribución de datos y no debe cumplir con el requisito de estacionariedad estadística. El método IDW tiene un comportamiento similar al Kriging Ordinario, pero es mucho más sencillo en términos de cálculo. Este método usa un criterio simple basado en la distancia que esta moldeado matemáticamente según Brejchaa, Stankováb, & Cernota (2016) por la siguiente formula:

$$u^*(x_0y_0z_0) = \sum_{i=1}^k w_i x u(x_i y_i z_i)$$

Donde  $u^*(x_0y_0z_0)$  es la estimación y  $u(x_i y_i z_i)$  un valor conocido de la cantidad de  $u$  en un punto determinado o superficie elemental y  $w_i$  el peso. Esta formula es trabajada por el SIG y procesada mediante los datos ingresados.

De este método se puede concluir que trabaja con el comportamiento de la variable que se está mapeando en relación a la disminución en influencia con la distancia desde su ubicación muestreada.

Por ejemplo, estos métodos son utilizados en casos sencillos del mercado, donde a través de una interpolación de una superficie de poder de compra del consumidor se determina un análisis de un sitio de venta minorista, el poder de compra de una ubicación más distante tendrá menos influencia porque las personas tienen más probabilidades de comprar en lugares más próximos de su residencia. También ha sido utilizado para calcular evaporación de fuentes hídricas, contaminaciones atmosféricas, niveles de ruido, polución de vehículos, agronomía, entre otros.

Para nuestro proyecto de investigación ejecutamos el siguiente diagrama que fue moldeado desde la literatura:

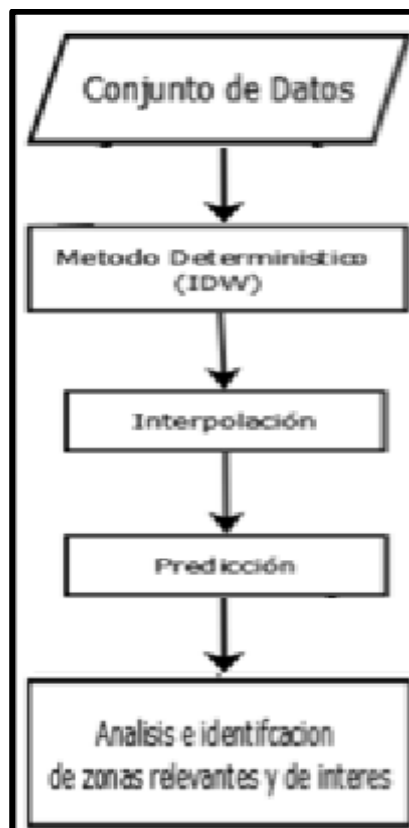


Figura 10. Diagrama para trabajar metodología IDW. Fuese Adoptada por los Autores desde la teoría.

#### 4.2.2 Metodología Estocástica: GEOESTADISTICA

La geoestadística es un conjunto de técnicas para el análisis y predicción de valores distribuidos en el espacio y/o en el tiempo, dichos valores se asumen correlacionados entre sí.

Actualmente, la Geoestadística es un conjunto de técnicas usadas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo. Un análisis geoestadístico está compuesto por tres etapas:

1. El análisis exploratorio de los datos: Está basado en técnicas estadísticas convencionales que permiten obtener todo un conjunto de información, desconocida a priori sobre la muestra bajo

estudio, lo que es imprescindible para realizar correctamente cualquier análisis estadístico y en particular un análisis geoestadístico.

2. El análisis estructural: Es el proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial

3. Las predicciones (kriging o simulaciones): Una vez realizado el análisis estructural, la predicción de valores en puntos no muestrales se puede hacer aplicando la técnica de interpolación "kriging" o simulándolos a través de "simulaciones condicionales".

Según Méndez Venegas & Díaz Viera (2013) el análisis exploratorio de datos para un análisis geoestadístico, requiere que el conjunto de datos cumplan lo siguiente: a) La muestra de datos se distribuye normalmente o al menos es simétrica. b) La muestra de datos no debe mostrar una tendencia significativa. c) No debe existir distribución de ningún atípico espacial.

Al corroborar los datos y determinar sus características se procede a interpolar con el método de Kriging que es uno de los métodos más usados en los procesos de interpolación. Este método asigna un valor a espacial de los datos mediante el uso de semivariogramas para realizar una predicción de la variable de estudio mediante el uso de estadística. En los métodos de kriging se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen un peso mayor sobre la interpolación al momento de hacer la predicción. Este peso disminuye conforme aumenta la distancia entre el punto conocido y el punto interpolado.

El método Kriging trabaja mediante la fórmula:  $Z(s) = \mu + \varepsilon(s)$ . De donde gráficamente se puede analizar los valores de la ecuación como se muestra en la figura 11.

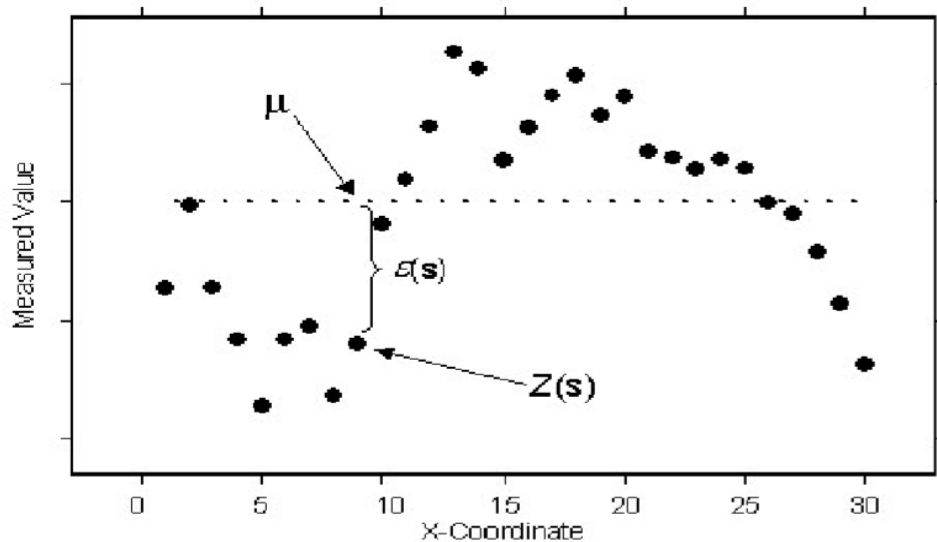


Figura 11. Diagrama Valores medidos vs coordenadas X. Fuente: [Http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm](http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm)

Por lo tanto, el kriging ordinario se puede utilizar para datos que parecen tener una tendencia. No hay forma de decidir, basándose solo en los datos, si el patrón observado es el resultado de la autocorrelación, entre los errores  $\varepsilon(s)$  con  $\mu$  constante, o tendencia, con  $\mu(s)$  cambiando con  $s$ . El kriging ordinario puede usar semivariogramas o covarianzas (que son las formas matemáticas que se usan para expresar autocorrelación), usar transformaciones y eliminar tendencias, y permitir el error de medición.

El calculo que realiza el software del semivariograma se realiza mediante la formula dada a continuación permite encontrar cual es la variabilidad en cada punto.

$$\hat{\gamma}(\underline{h}) = \frac{1}{2N(\underline{h})} \sum_{i=1}^{N(\underline{h})} [Z(\underline{X}_i + \underline{h}) - Z(\underline{X}_i)]^2$$

De acuerdo con Trangmar, Yost, & Uehara (1985) la estimación de probabilidad obtenida mediante kriging, es mucho más robusta que la obtenida mediante métodos determinísticos dentro de los que se destaca el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW).

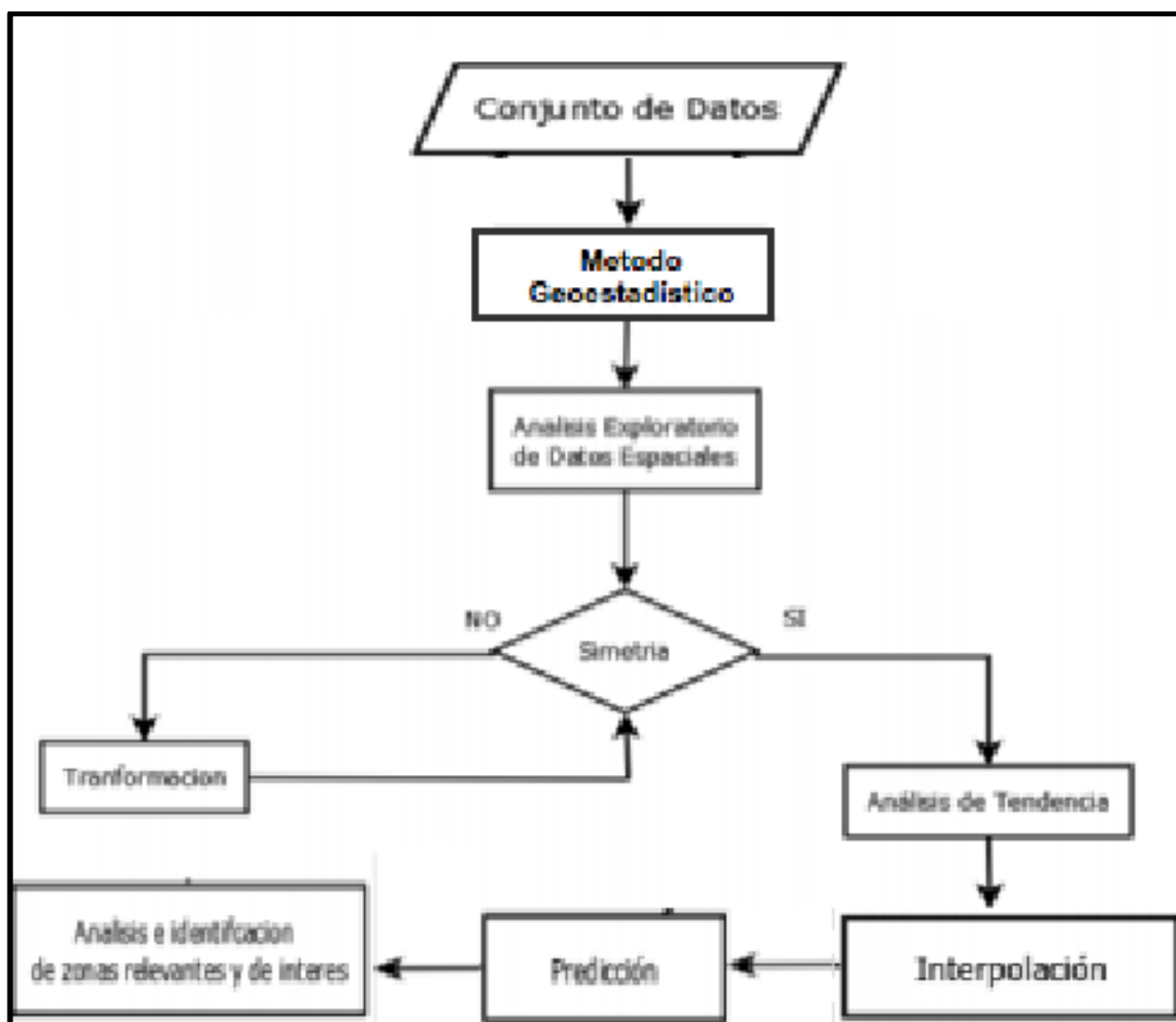


Figura 12. Diagrama para trabajar metodología Geoestadística. Fuente: Diseñada por los autores desde la teoría.

### **4.2.3 Metodología: SUPERPOSICIÓN PONDERADA.**

En esta metodología además de la variable magnitud se tienen en cuenta otros factores como PGA, distancia a fallas, pendientes y geología. Inicialmente se procede a crear cada uno de estos mapas para luego hacer la superposición ponderada junto al mapa de magnitud.

Como en todo análisis de superposición, en el análisis de superposición ponderada, debe definir el problema a partir de dividir el modelo en submodelos e identificar las capas de entrada.

Cuando las capas de criterios de entrada están en sistemas de numeración distintos con rangos diferentes, cada celda de cada criterio se debe reclasificar con una escala de preferencia, para combinarlas en un único análisis. Una preferencia asignada en la escala común implica la preferencia del fenómeno para el criterio. Los valores de preferencia no sólo deben asignarse en relación a los otros valores dentro de la capa sino que también deben tener el mismo significado entre las capas. Los criterios del análisis de superposición ponderada tal vez no tengan la misma importancia. Puede darle más peso a los criterios importantes que a los otros criterios

La herramienta Superposición ponderada permite implementar varios pasos del proceso del análisis de superposición general dentro de una única herramienta y combina los siguientes pasos:

- Reclasifica los valores en los rásteres de entrada en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo, o algo similar a una escala unificadora.
- Multiplica los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia de los rásteres.
- Suma los valores de celda resultantes para producir el ráster de salida

La herramienta sólo acepta rásteres enteros como entrada, como un ráster de uso del suelo o tipos de suelo. Los rásteres continuos (punto flotante) se deben reclasificar a enteros antes de poder utilizarlos.

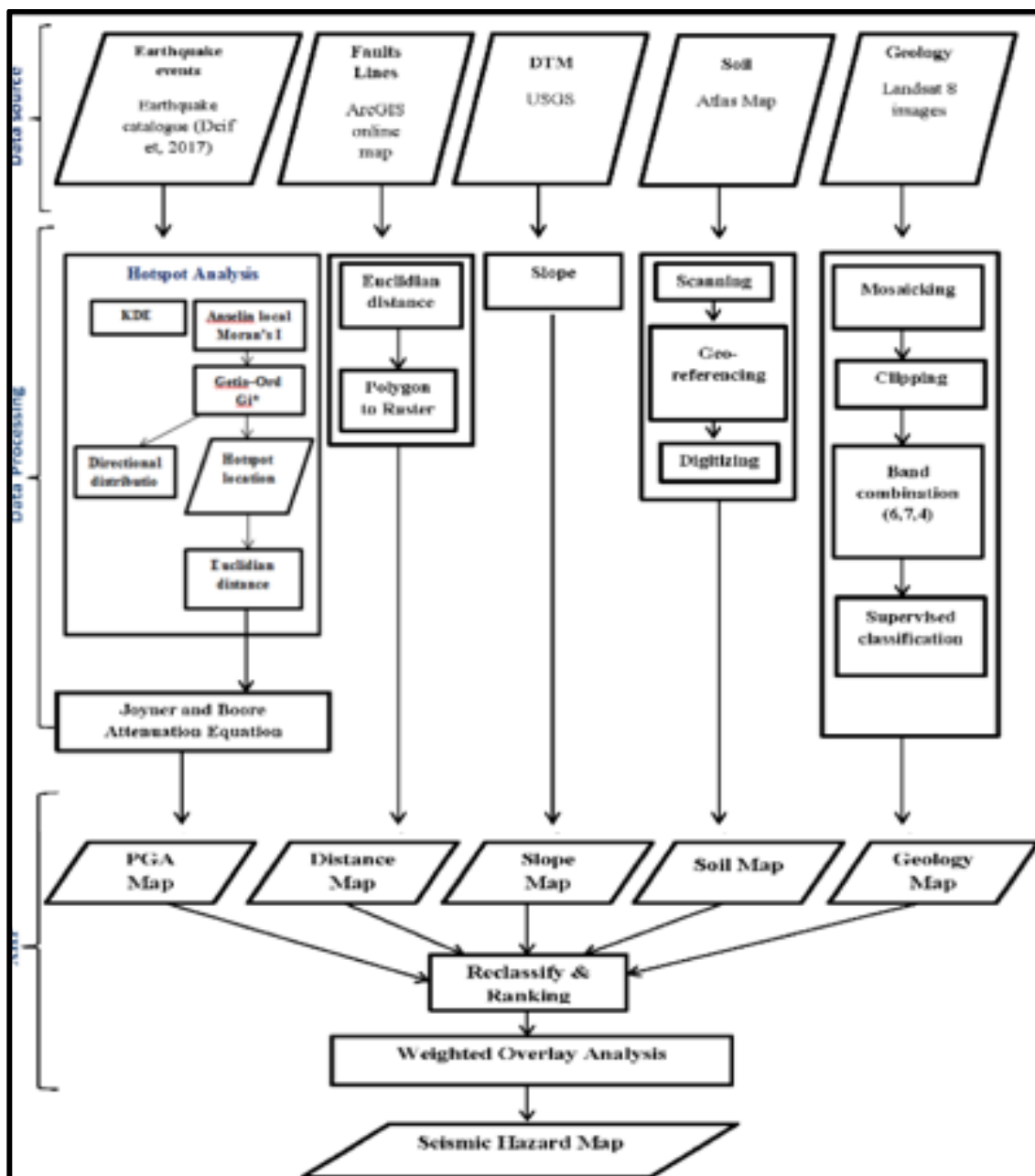


Figura 13. Diagrama para trabajar metodología Superposición. Fuente: D. Al-Dogom , K. Schuckma, R. Al-Ruzouq

## 5. RESULTADOS

### 5.2.1 Metodología INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW)

Con esta metodología se realizó una interpolación determinística de los datos de magnitud de los 508 sismos localizados sobre el área sur del municipio. Se empleó el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW), donde de manera general se busca atribuir valores a puntos no probados a partir de puntos probados y relacionados inversamente con la distancia. Estos puntos probados para la investigación se toman como las magnitudes de los sismos en las posiciones geográficas donde se generaron.

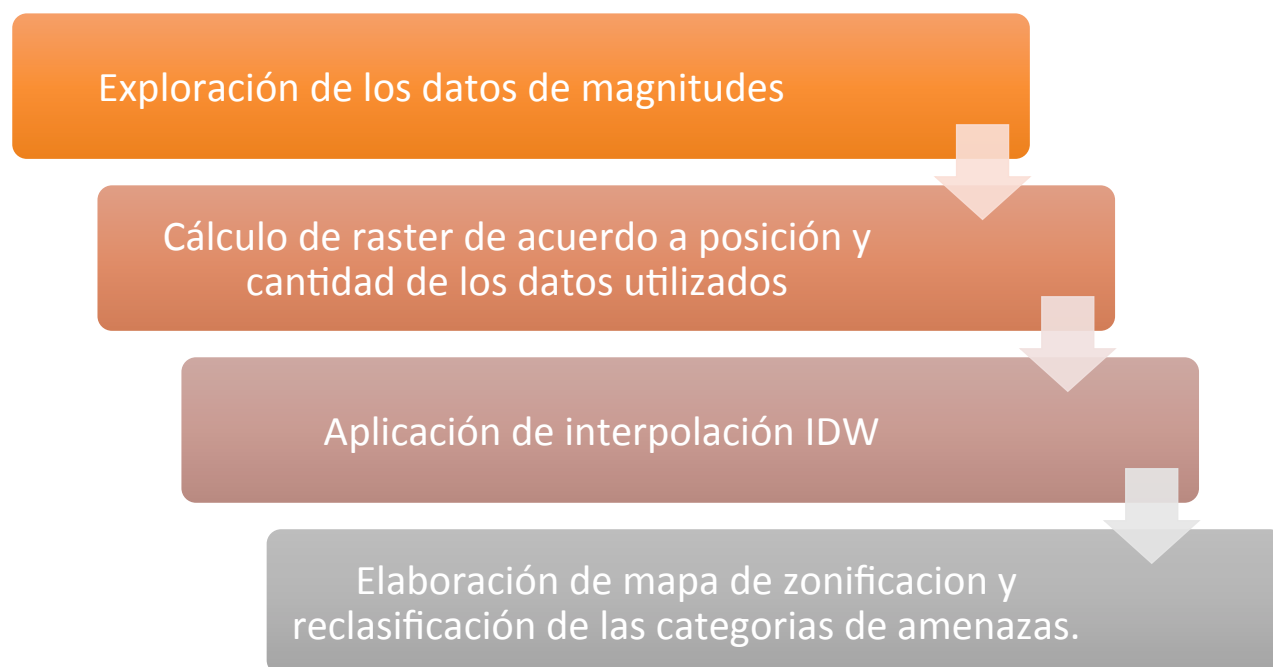


Figura 14. Diagrama Procedimental aplicativo para metodología IDW.

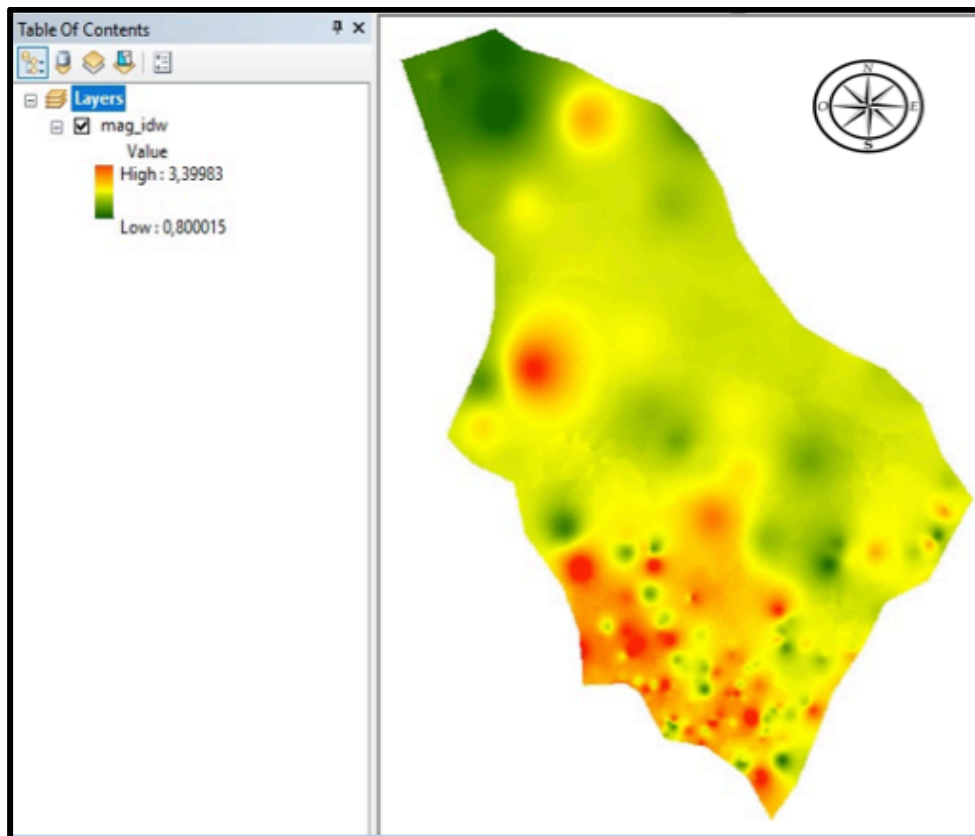


Figura 15. Mapa de amenaza sísmica interpolado con IDW.

La interpolación IDW implica que el raster de la superficie resultante de los datos introducidos en el programa SIG pase exactamente por los puntos muestreados, por ello se observa que hay unas zonas en donde se presentan círculos rojos y verdes muy marcados. Los círculos rojos representan zonas donde la magnitud de los sismos es muy alta y los verdes donde es muy baja. Por lo tanto, esta superficie va a tener picos y huecos en donde están estos círculos.

El método IDW tiene la falencia en su comportamiento drástico porque no suaviza la superficie y puede generar huecos de acuerdo a las distancias sin puntos de información (Ver figura 16).

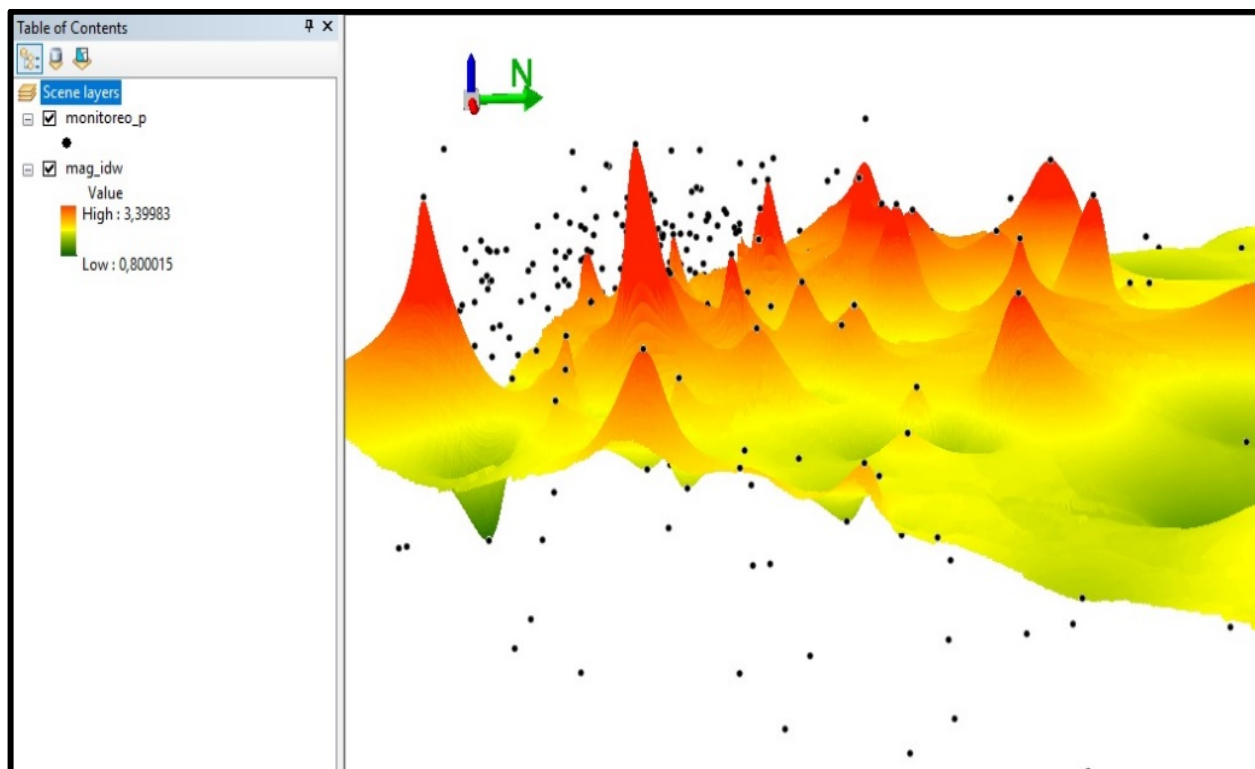


Figura 16. Vista 3D exagerada de la superficie IDW y su relación con los puntos de muestreo..

Al reclasificar este mapa obtenido con IDW según cinco partes iguales se obtiene el primer mapa de zonificación de amenaza sísmica para el área de estudio. Cada clasificación de la amenaza en esta metodología se realiza de acuerdo a la magnitud de los sismos de la siguiente forma:

Tabla 2. Valores de reclasificación para amenaza según magnitud.

| MAGNITUD DE SISMO (Richter) | CLASIFICACIÓN ASIGNADA DE AMENZA |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 0.7-1.3                     | MUY BAJA                         |
| 1.4-1.9                     | BAJA                             |
| 2.0-2.5                     | MEDIA                            |
| 2.6-3.0                     | ALTA                             |
| 3.1-3.5                     | MUY ALTA                         |

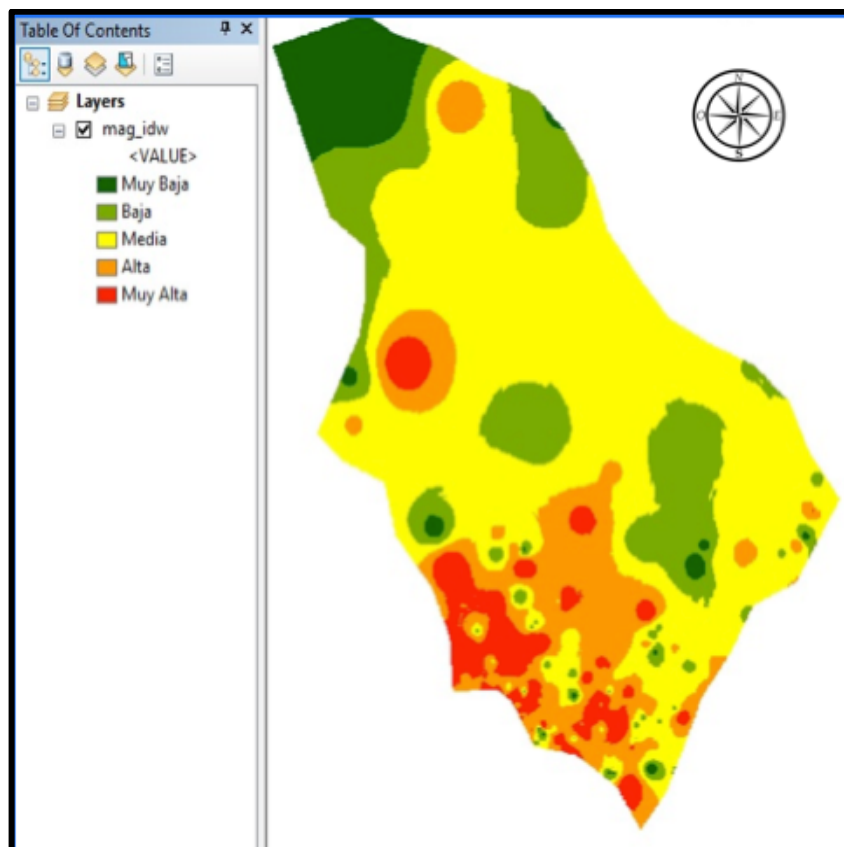


Figura 17. Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido a partir de la metodología IDW

El mapa de zonificación muestra que a partir del método de IDW el tipo de amenaza que predomina en la zona sur del municipio de Betulia es la amenaza media y el casco urbano se posiciona con amenaza media-alta.

Tabla 3. Área y porcentajes para las categorías de la metodología IDW.

| METODOLOGÍA 1 (IDW)  |                         |            |                  |
|----------------------|-------------------------|------------|------------------|
| Categoría de Amenaza | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje | Rango Magnitud ® |
| Muy Alta             | 10.623655               | 6.24 %     | 0.7-1.3          |
| Alta                 | 26.014861               | 15.28%     | 1.4-1.9          |
| Media                | 91.146035               | 53.54%     | 2.0-2.5          |
| Baja                 | 30.572048               | 17.96%     | 2.6-3.0          |
| Muy Baja             | 11.868717               | 6.97%      | 3.1-3.5          |

### 5.2.2 Metodología GEOESTADÍSTICA

En esta metodología se hace una interpolación geoestadística de la magnitud de los sismos. Este método está clasificado como estocástico ya que se hace uso de la probabilidad para poder realizar las estimaciones usando Kriging. Para ello se siguen los pasos que se toman del procedimiento metodológico teórico (ver figura 18) y se procesan mediante el programa SIG, cada uno de los pasos descritos a continuación permiten obtener un resultado final de mapa de zonificación de amenaza, utilizando magnitudes y localización de los sismos pero teniendo a favor una aparición de margen de datos de margen de error.

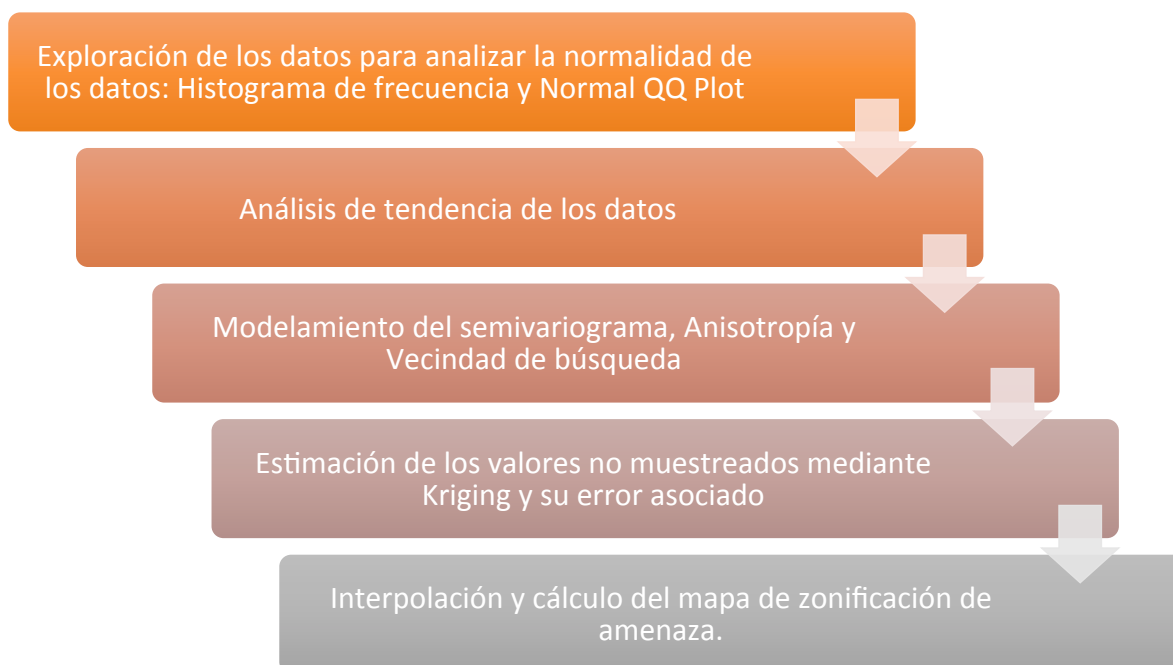


Figura 18. Diagrama básico procedimental para metodología Geoestadística.

Este método en relación al método IDW tiene a favor la suavización de los datos utilizando probabilidades y entregando información de márgenes de error de los resultados, así como una

mayor precisión por la cantidad de datos generados e incluidos en el modelamiento de la zonificación

### Exploración de los datos

Inicialmente se hace un histograma de frecuencia para la variable magnitud, en donde se muestran sus datos estadísticos como media, desviación estándar, asimetría, curtosis, entre otros. Para realizar el modelamiento se requiere que el data tenga una distribución de frecuencia normal; al realizar esta exploración de datos se busca determinar la normalidad de los datos, (ver figura 19) y se observa que esta distribución de frecuencia corresponde con una distribución normal y esta sesgada hacia la derecha.

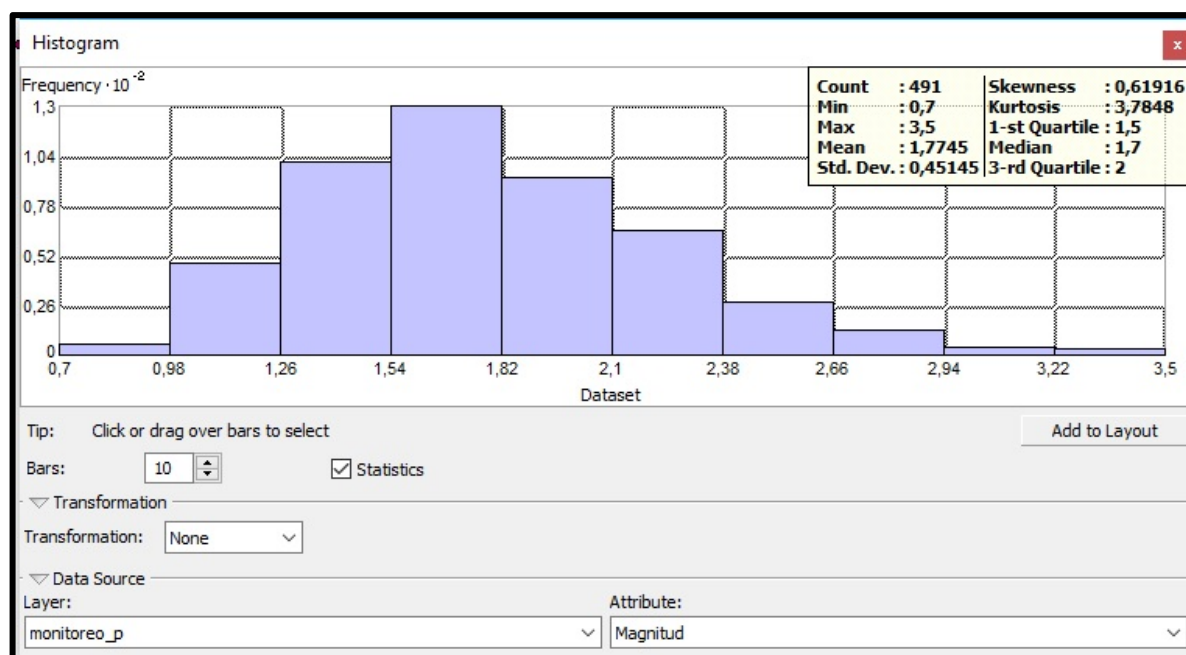


Figura 19. Histograma de frecuencia para la variable magnitud.

Se procede a hacer el gráfico Normal QQ Plot (figura 29) el cual funciona graficando cuantil por cuantil vs los datos de magnitud para seguir verificando la normalidad de los datos. Se observa

que los puntos de la gráfica se ubican cerca de la línea recta indicando un comportamiento que corresponde con una distribución normal de frecuencia.

En este caso no se utilizan formulas de transformación porque los datos no están dispersos sino siguen la tendencia normal corroboradas anteriormente

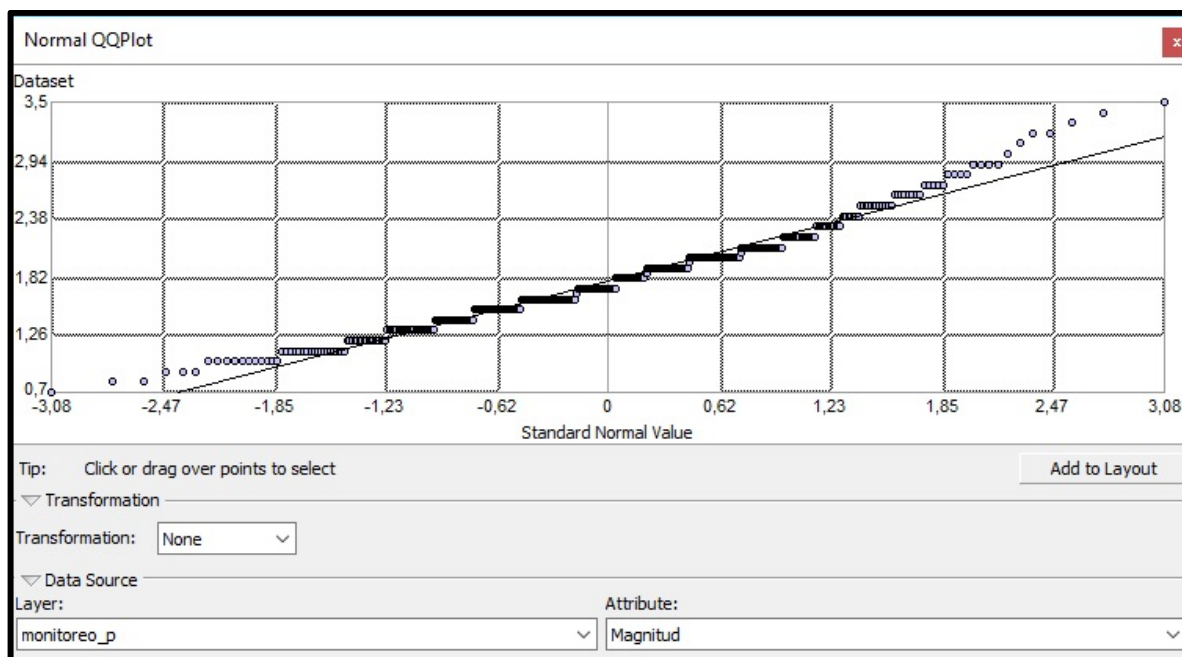


Figura 20. Gráfico Normal QQ Plot para la variable magnitud.

### **Análisis de tendencias de los datos**

Se realiza el análisis de tendencia mediante la herramienta Geoestatistical Analyst – Trend Analysis del SIG sobre el monitoreo proyectado trabajado en metros, utilizando la variable magnitud en los planos XZ y YZ y generando un modelo en 3 dimensiones (ver figura 21). Como resultado se observa que los datos no presentan tendencia, por lo tanto, se determina que no se usa kriging universal para la estimación de los puntos no muestreados, pues no se puede modelar la a través de una formula unificada la tendencia de los datos y que es requerida por la formula del Kriging Universal.

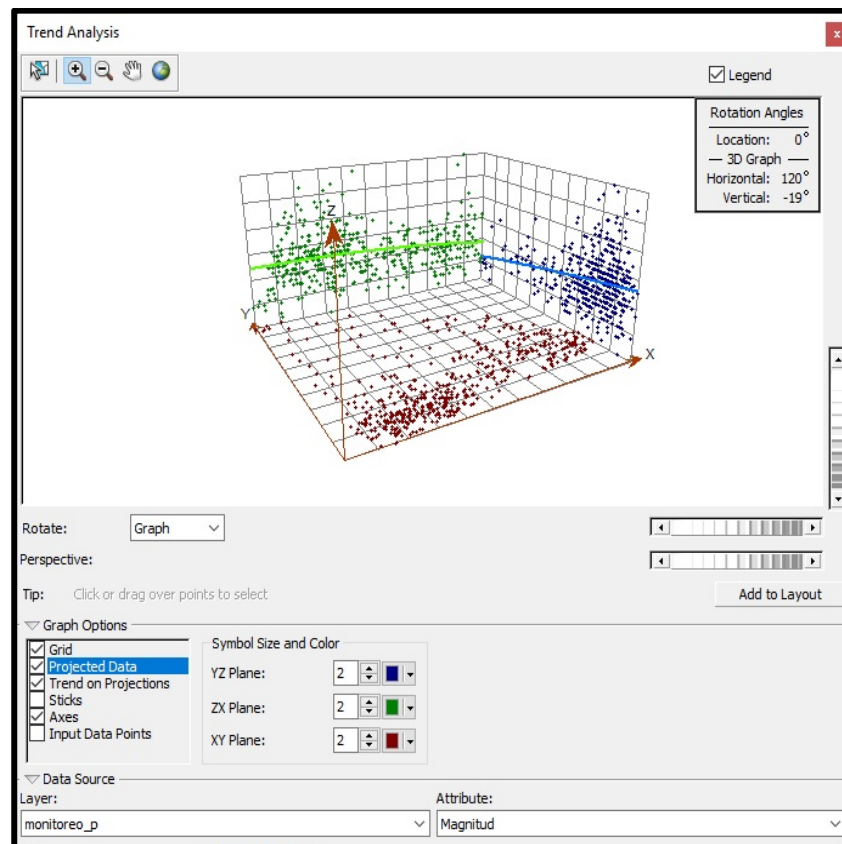


Figura 21. Análisis de tendencia para la variable magnitud.

## Modelamiento del semivariograma

En el análisis geoestadístico es trascendental determinar la configuración espacial para esto se halla el semivariograma que es una grafica que muestra el resultado de la formula teórica aplicada sobre la distancia de los pares de puntos de diferentes magnitudes mostrando la variabilidad de los puntos y que busca modelar la auto correlación espacial, agrupando puntos de distancias con rangos similares de acuerdo a la tolerancia de la distancia entre la nube de puntos de datos empleados. El semivariograma grafica la relación entre la varianza y la distancia.

Al modelar el semivariograma se observa que el mejor ajuste lo da el modelo teórico gaussiano, con datos del modelo teórico (línea azul), la agrupación de datos (puntos rojos) y el valor promedio (signos de cruz azul).

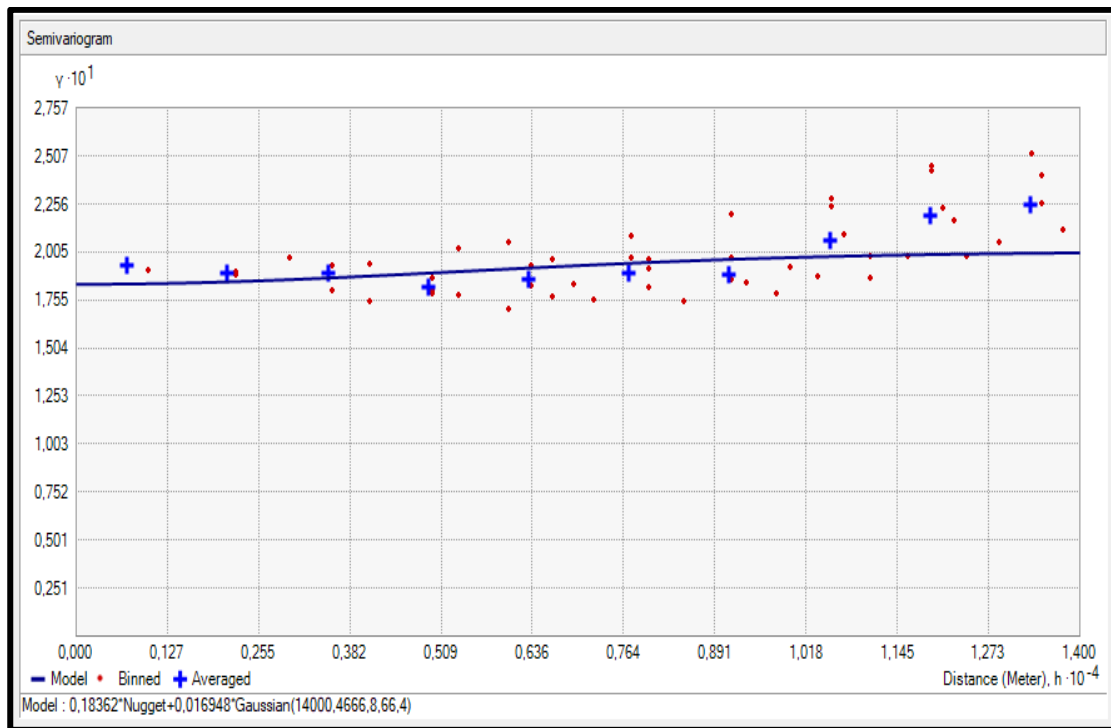


Figura 22. Semivariograma clasificado por modelo teórico correspondiente al tipo gaussiano.

Los parámetros de este modelo semivariograma son:

- Tipo: Gaussiano (teórico)
- Rango mayor: 14000 (m)
- Anisotropía: Sí
- Rango menor: 4666,841 (m)
- Sill parcial: 0,01694839
- Nugget: 0,1836166

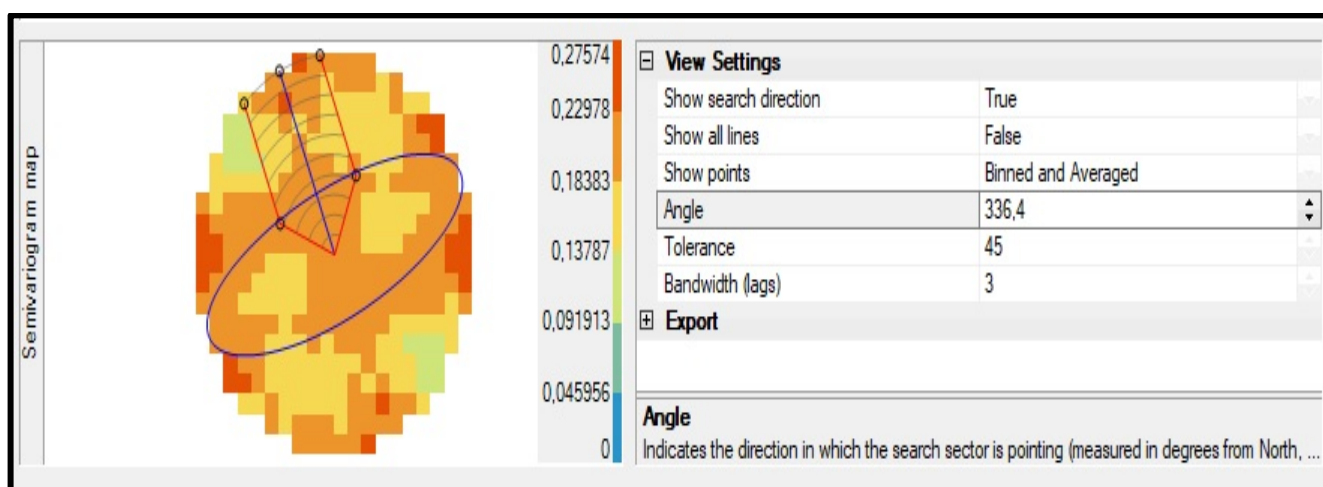
El rango está calculado por el SIG por medio de un algoritmo matemático (una ventaja del software) y es la distancia en eje X de crecimiento hasta encontrar la estabilización en una recta

horizontal. El rango mayor y menor se obtiene también de acuerdo a la elipse de anisotropía y la dirección específica mostrada de acuerdo a la agrupación de los pares. Siendo el rango menor el radio de el eje menor de la elipse de anisotropía y el rango mayor el valor del radio del eje máximo de la elipse y representa las distancias máximas en tolerancia para unir los pares.

El Sill total es el valor en (Y) que esta dividido en el Sill parcial que va desde el inicio de la curva modelada hasta la estabilización en el eje Y y el Nugget que es la distancia desde el 0 hasta el inicio de la curva en el mismo eje de la elipse de anisotropía

### Anisotropía

En el mapa variográfico se observa que hay mayor variabilidad en una dirección indicando anisotropía (variable con la dirección) . Se dibuja entonces una elipse de anisotropía cuya dirección es  $66,44^\circ$  respecto al eje vertical del mapa variográfico. En dirección NW y SE según el grafico se halló que existe una variabilidad de datos considerables demarcada por la presencia de colores y dispersión en el tamaño del área de los mismos, y en la elipse de anisotropía de la figura 23 la dirección NE- SE presenta baja variabilidad,



## Vecindad de búsqueda

Se procede a configurar la vecindad de búsqueda adoptando la geometría de la elipse de anisotropía y usando cuatro sectores.

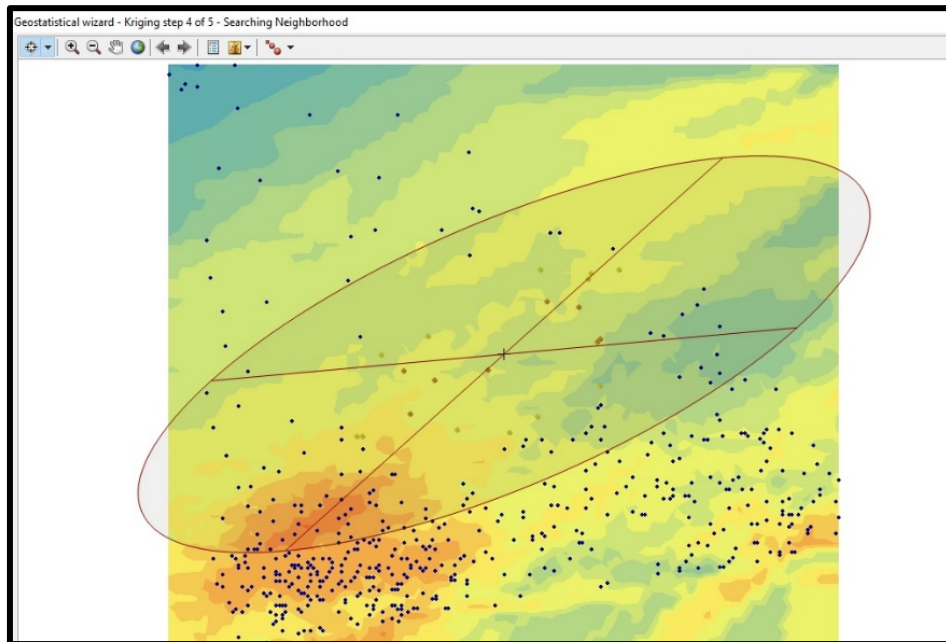


Figura 23. Aplicación de sectores para vecindad de búsqueda.

## Estimación usando Kriging ordinario y Error estándar de predicción

Se precede a usar la formula del interpolador de Kriging ordinario para estimar los puntos no muestreados de la zona de estudio, los cuales tienen asociado un error estándar de predicción que se me aproxima mas a la realidad.

La formula descrita en la parte Materiales (Ver pagina 56), emplea el valor de las sumatorias de las magnitudes medidas de los sismos, por el peso del valor medido en la posición para determinar la incertidumbre o margen de error.

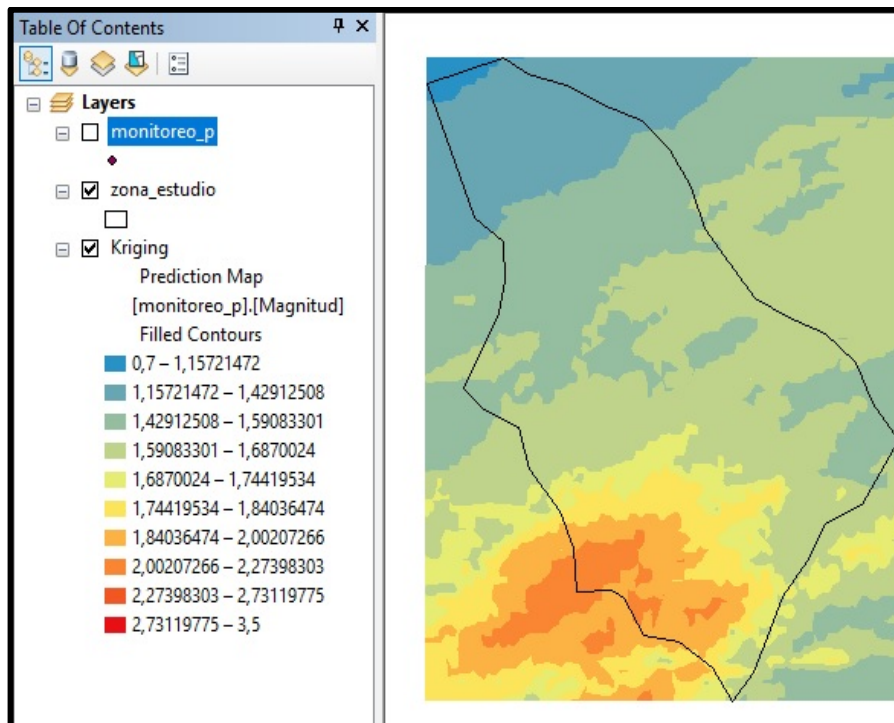


Figura 24. Superficie de magnitud de sismos interpolada con Kriging ordinario.

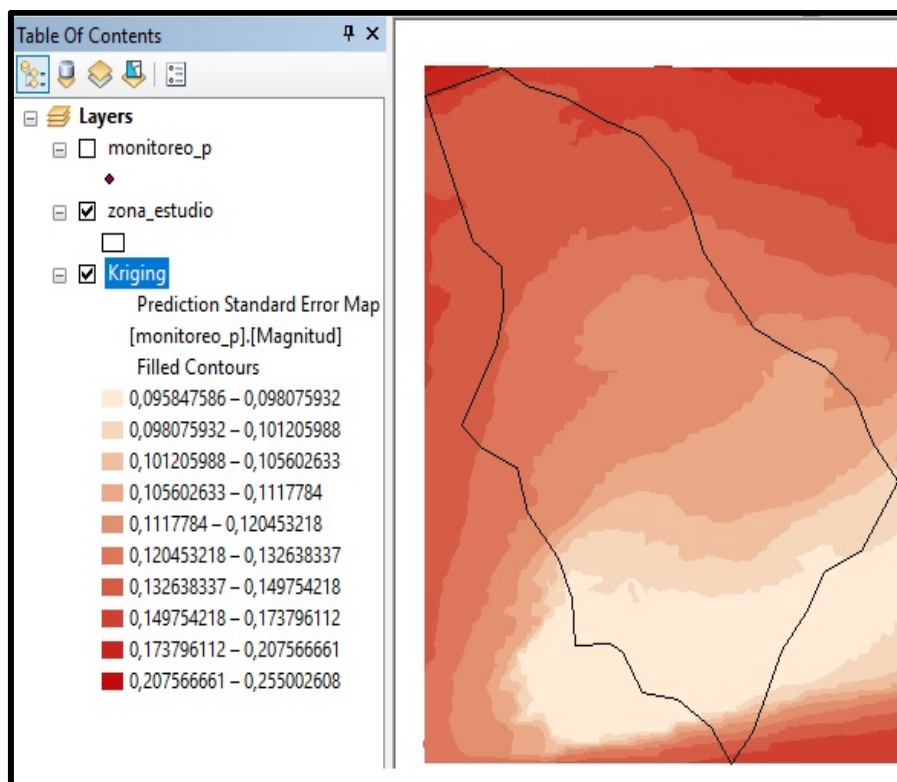


Figura 25. Superficie de error estándar de predicción.

Del gráfico anterior, la superficie se determina que la zona con menos error en el modelamiento de los datos se encuentra en colores claros y las superficies con mayor cantidad de error están resaltadas en colores rojos, esta estimación de errores depende directamente de la cantidad de datos existentes en la muestra, debido a que en el sector mas sur del municipio la recurrencia de los datos sísmicos en cantidad es más abundante.

### Mapa de zonificación de la amenaza sísmica a partir de geoestadística

Al tener la superficie interpolada con geoestadística se procede a reclasificarla para de esta manera obtener el mapa de zonificación de amenaza sísmica. La reclasificación usa los mismos valores de la metodología IDW.

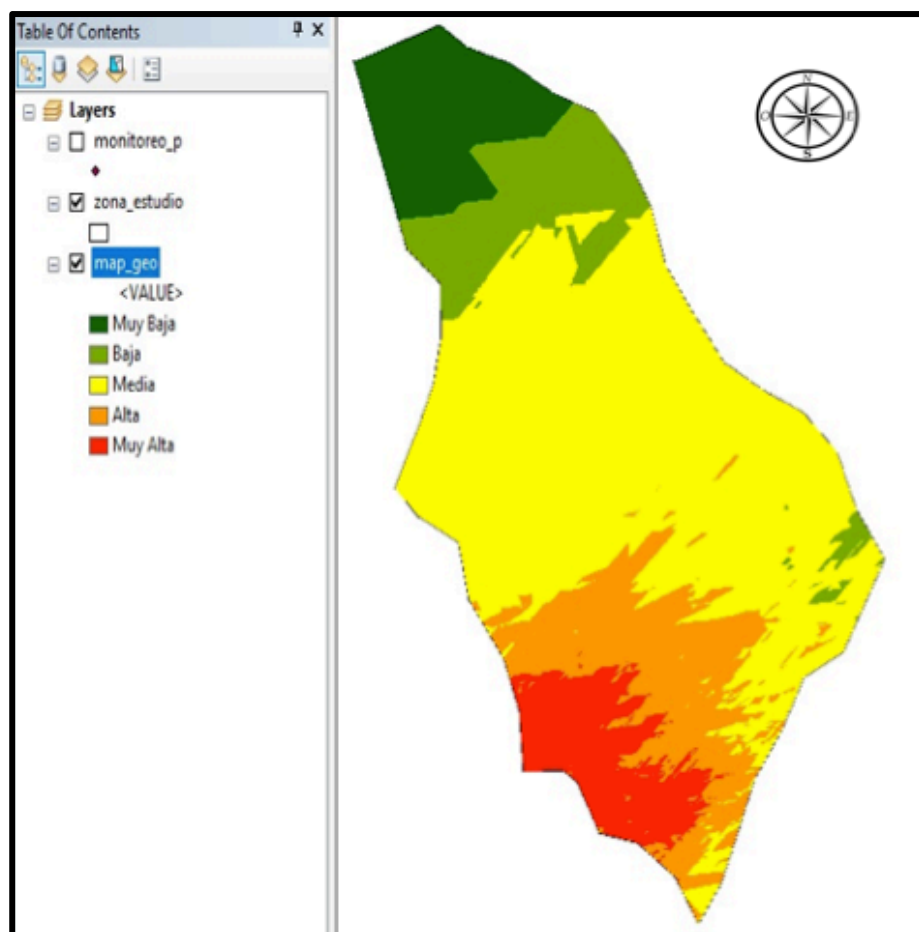


Figura 26. Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido a partir de la metodología Geoestadística.

De esta metodología se mantiene la tendencia de la amenaza media en un poco mas de la mitad del área de estudio pero con un modelo mas acercado a la realidad que permite identificar ciertas zonas con tendencias marcadas de amenaza.

Tabla 4. Área y porcentajes para las categorías de la metodología Geoestadística.

| METODOLOGÍA 2 (GEOESTADÍSTICA) |                         |            |                  |
|--------------------------------|-------------------------|------------|------------------|
| Categoría de Amenaza           | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje | Rango Magnitud ® |
| Muy Alta                       | 14.299578               | 8.4%       | 0.7-1.3          |
| Alta                           | 27.674958               | 16.26%     | 1.4-1.9          |
| Media                          | 94.543841               | 55.54%     | 2.0-2.5          |
| Baja                           | 16.526429               | 9.71%      | 2.6-3.0          |
| Muy Baja                       | 17.180419               | 10.09%     | 3.1-3.5          |

### 5.2.3 Metodología SUPERPOSICIÓN PODERADA

En esta metodología además de la variable magnitud se tienen en cuenta otros factores como valor de PGA (aceleración), distancia a fallas, pendientes y geología. Inicialmente se procede a crear cada uno de estos mapas para luego hacer la superposición ponderada junto al mapa de magnitud, esta metodología es la más completa y detallada de las utilizadas.

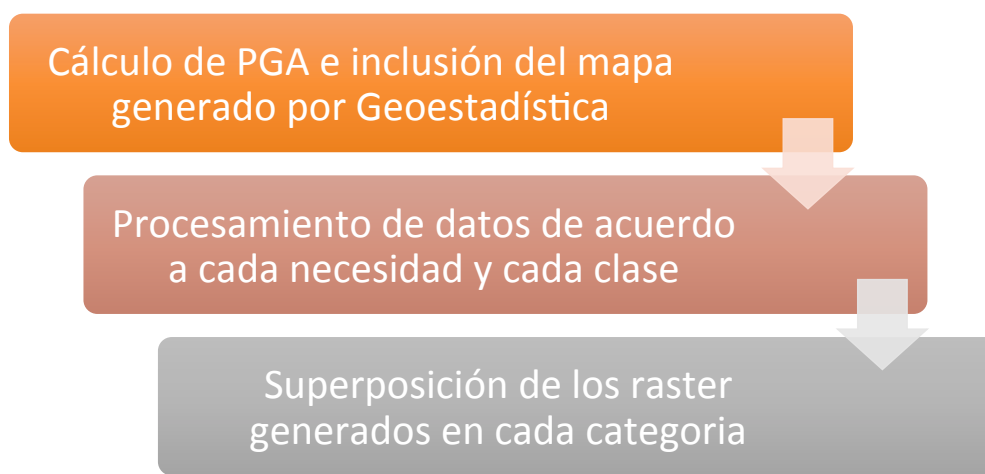
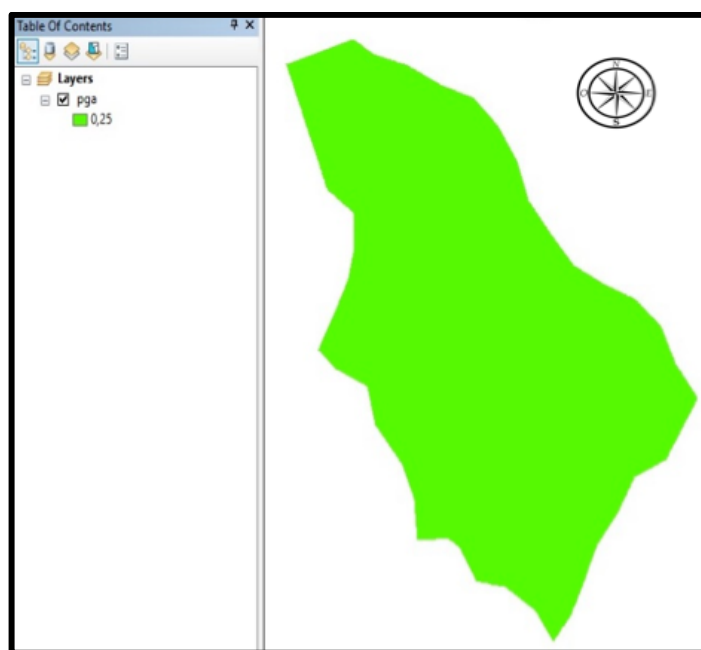


Figura 27. Diagrama procedimental para metodología de superposición ponderada .

A continuación se describen los resultados de cada insumo ingresado para realizar la ponderación de la cual obtenemos el mapa de zonificación de la amenaza.

### **Peak Ground Acceleration (PGA)**

Para la zona de estudio se usa un PGA: 0.25G, el cuál será constante en todos los puntos. Este valor de aceleración se toma del estudio entregado por el esquema de ordenamiento territorial 2016 realizado en el municipio, con escala 1:60.000. La limitante dada para este factor se da por una escases en los datos a nivel detallado y por tener un área localizada.



*Figura 28.* Mapa de Peak Ground Acceleration para la zona de estudio.

### **Distancia a fallas**

Los efectos de los terremotos disminuyen a medida que la distancia al epicentro incrementa, usando la herramienta Euclidean Distance y Reclassify de ArcGIS se obtiene el mapa de distancia a fallas, de acuerdo a la teoría se reclasifica la distancia nuevamente en 9 clases y se genera como resultado el mapa de distancia a falla donde los colores azules son los mas distantes

y los colores marrones son los más próximos a las fallas lo que a priori determina una relación directamente proporcional de las fallas con los movimientos telúricos.

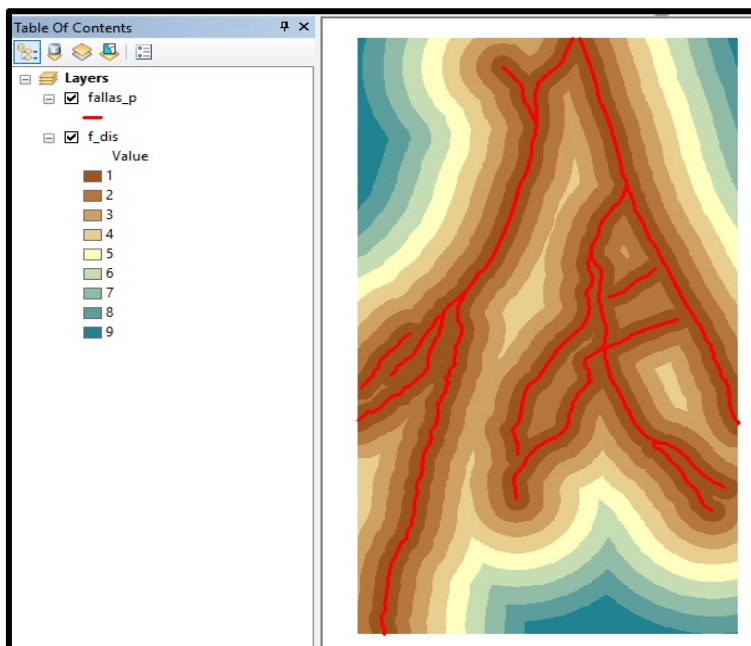


Figura 29. Mapa de distancia a fallas generado para insumo de superposición ponderada.

### Mapa de Pendientes

El mapa de pendientes se trabajó en grados y luego posteriormente se reclasificó en 9 categorías de acuerdo a la inclinación de la pendiente como lo indica la tabla x. Este mapa de pendientes sería un insumo fundamental en el caso de querer calcular la amenaza y el riesgo sísmico.

Tabla 5. Valores de reclasificación de mapa de pendientes.

| INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE (°) | 0-5 | 6-10 | 11-15 | 16-20 | 21-25 | 26-30 | 31-35 | 36-40 | 41-45 |
|---------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VALOR RECALCULADO               | 1   | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |

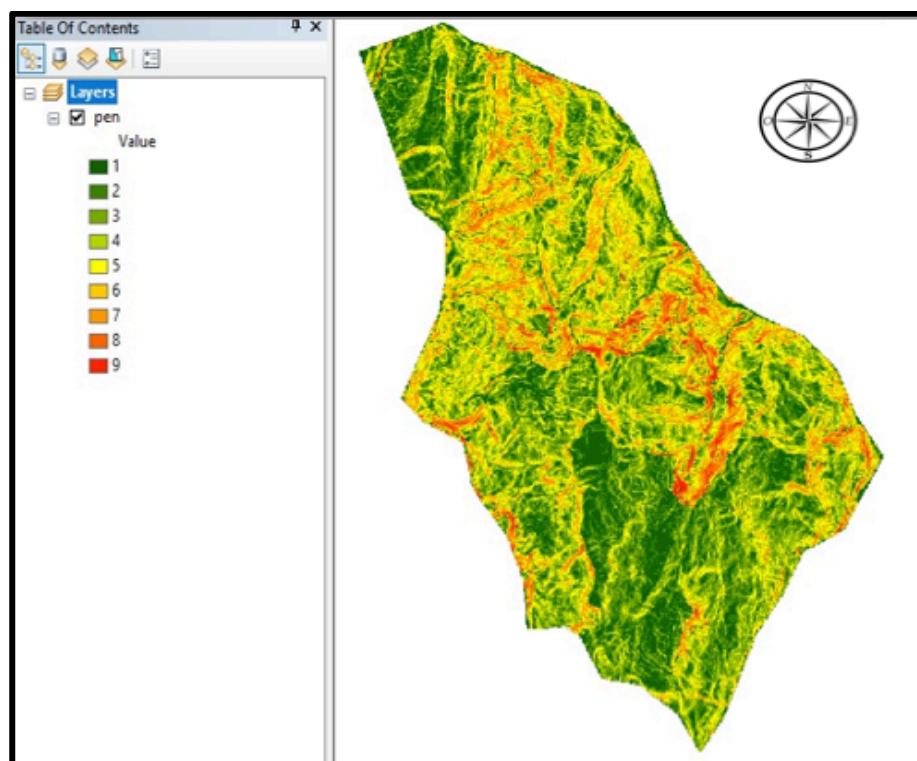


Figura 30. Mapa de pendientes para la zona de estudio.

### Raster de Geología

El mapa de clasificación geológica se realizó de acuerdo al mapa geológico mencionado en los insumos, se determina para cada área y se asignan pesos específicos de acuerdo a la teoría; estos pesos dependen de la composición litológica de la unidad (Presenta la formación Girón, Simiti, Umir, Los santos, Rosablanca, Tablazo, Paja y Qal). Una vez realizada esta asignación de valores se hace una reclasificación y obtenemos como resultado del insumo el mapa de la derecha de la figura 31. El ranking de clasificación por literatura es de la siguiente manera:

Tabla 6. *Valores de Reclasificación mapa geológico.*

| LITOLÓGÍA      | Ígneas | Metamórficas | Calizas | Areniscas | Depositos |
|----------------|--------|--------------|---------|-----------|-----------|
| VALOR ASIGNADO | 1      | 3            | 5       | 7         | 9         |

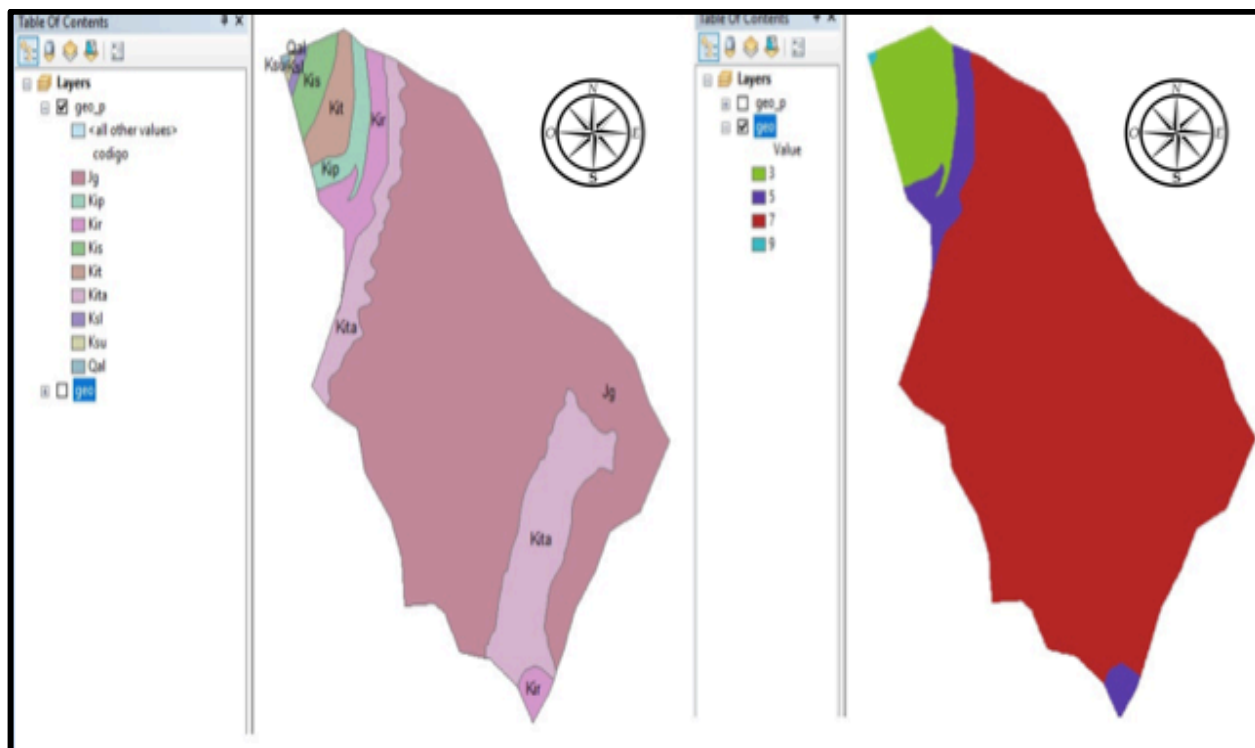


Figura 31. Mapa Geológico y reclasificación para la zona de estudio.

### Superposición ponderada de los mapas

Se procede a hacer la superposición ponderada de los anteriores mapas usando los pesos que se muestran en la tabla 7., estos pesos se asignan de acuerdo al peso y criterio asignado en la generación de la amenaza.

Tabla 7. Pesos para los Factores Utilizados en la Superposición ponderada

| FACTOR | Magnitud | PGA | Distancia a fallas | Geología | Pendientes |
|--------|----------|-----|--------------------|----------|------------|
| PESO % | 70       | 10  | 10                 | 7        | 3          |

Estos pesos asignados se introducen a partir de la herramienta Weighted Overlay como se muestra en la figura 33.

Weighted Overlay

Weighted overlay table

| Raster      | % Influence | Field  | Scale Value |
|-------------|-------------|--------|-------------|
| ⌵ mag_geo_r | 70          | VALUE  | ↶           |
|             |             | 1      | 1           |
|             |             | 2      | 2           |
|             |             | 3      | 3           |
|             |             | 4      | 4           |
|             |             | 5      | 5           |
|             |             | 6      | 6           |
|             |             | 7      | 7           |
|             |             | 8      | 8           |
|             |             | 9      | 9           |
|             |             | NODATA | NODATA      |
| ⌵ f_dis     | 10          | VALUE  | ↶           |
|             |             | 1      | 9           |
|             |             | 2      | 8           |
|             |             | 3      | 7           |
|             |             | 4      | 6           |
|             |             | 5      | 5           |
|             |             | 6      | 4           |
|             |             | 7      | 3           |
|             |             | 8      | 2           |
|             |             | 9      | 1           |
|             |             | NODATA | NODATA      |
| ⌵ pga       | 10          | VALUE  | ↶           |
|             |             | 1      | 9           |
|             |             | NODATA | NODATA      |
| ⌵ geo       | 7           | VALUE  | ↶           |
|             |             | 3      | 3           |
|             |             | 5      | 5           |
|             |             | 7      | 7           |
|             |             | 9      | 9           |
|             |             | NODATA | NODATA      |
| ⌵ pen       | 3           | VALUE  | ↶           |
|             |             | 1      | 1           |
|             |             | 2      | 2           |
|             |             | 3      | 3           |
|             |             | 4      | 4           |
|             |             | 5      | 5           |
|             |             | 6      | 6           |
|             |             | 7      | 7           |
|             |             | 8      | 8           |
|             |             | 9      | 9           |
|             |             | NODATA | NODATA      |

Sum of influence

Evaluation scale  From  To  By

Figura 32. Herramienta Weighted Overlay con asignación de datos.

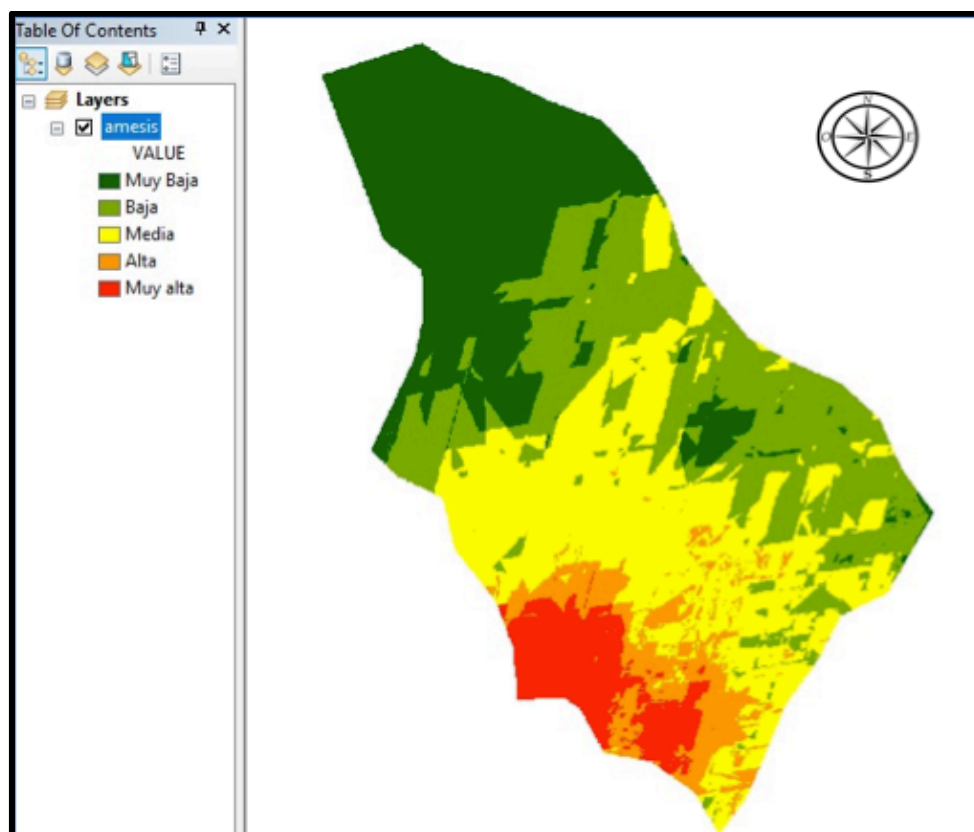


Figura 33. Mapa de zonificación de amenaza sísmica obtenido con la metodología superposición ponderada.

Se observa que el mapa obtenido con la metodología 3 detalla la amenaza en todas las áreas a diferencias de las dos metodologías donde se sopesaba solo la magnitud. Aquí el área de la amenaza media que predominaba disminuye casi al mismo nivel de la baja y la muy baja, manteniendo la tendencia de la amenaza alta y muy alta.

Tabla 8. Área y porcentajes para las categorías de la metodología Superposición Ponderada.

| METODOLOGÍA 3 (SUPERPOSICIÓN PONDERADA) |                         |            |                  |
|---|-------------------------|------------|------------------|
| Categoría de Amenaza                    | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje | Rango Magnitud ® |
| Muy Alta                                | 11,289474               | 6.64%      | 0.7-1.3          |
| Alta                                    | 12,693316               | 7.47%      | 1.4-1.9          |
| Media                                   | 51,704173               | 30.41%     | 2.0-2.5          |
| Baja                                    | 46,610424               | 27.41%     | 2.6-3.0          |
| Muy Baja                                | 47,73845                | 28.08%     | 3.1-3.5          |

## 6. ANÁLISIS

Al usar las tres metodologías se obtuvieron tres superficies que muestran cada categoría de amenaza en la que se clasifica la región objeto de estudio. Estas categorías de amenaza se dividen en: Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja. La superficie generada mediante el método de interpolación determinístico IDW es la más básica y presenta el modelo menos aproximado al fenómeno estudiado. Esta superficie presenta picos para las zonas de amenaza muy alta y huecos para las zonas de amenaza muy baja debido a que este método implica que la superficie interpolada pase directamente por el punto muestreado; por otra parte, la superficie generada mediante el método de interpolación Geoestadístico que aplica kriging ordinario presenta una mejor aproximación al fenómeno estudiado que IDW. En este caso se estudia la variabilidad de la magnitud de los sismos la cual se modela mediante un semivariograma teórico y una elipse de anisotropía. Este método de interpolación tiene la ventaja de mostrar el error estándar de predicción y acercar mas el modelo al comportamiento real; así mismo, la zonificación resultante de aplicar la superposición ponderada se considera la mejor aproximación al mapa de zonificación de amenaza sísmica debido a que incluye la superficie generada en la metodología 2 y otros factores como Peak Ground Acceleration, distancia a fallas, pendientes y geología. A cada uno de estos factores se le asigna un peso en porcentaje y a cada una de sus categorías se le asigna un valor de escala de 1 a 9, donde el valor de 1 es el que menos contribuye a la amenaza y el valor de 9 es el que más contribuye.

Para esta ultima metodología se destaca la intervención de la geología como medio de expansión de la onda sísmica en superficie, la evidencia de la actividad tectónica como son la falla del Suarez, la falla Bucaramanga, la falla la salina y las fallas asociadas a estos sistemas que

evidencian aceleraciones particulares en relación con la energía liberada por los eventos telúricos.

La comparación estadística se realiza mediante la comparación de los datos que entrega el software en cuento al área de clasificación en cada mapa generado para amenaza sísmica. Todos los cálculos se realizan de la misma forma, por ejemplo para el muestreo de la amenaza baja en la metodología IDW, se realiza mediante el calculo de selección de estadísticas como se muestra en la figura 29 donde se muestra que los datos para la categoría muy baja del mapa generado a partir de IDW arroja un área de 11.8687 km<sup>2</sup> correspondiente al 6,97% del área total. Así todos los valores quedan compilados en tablas al final de la descripción de los resultados de cada metodología consiguiendo un análisis estadístico.

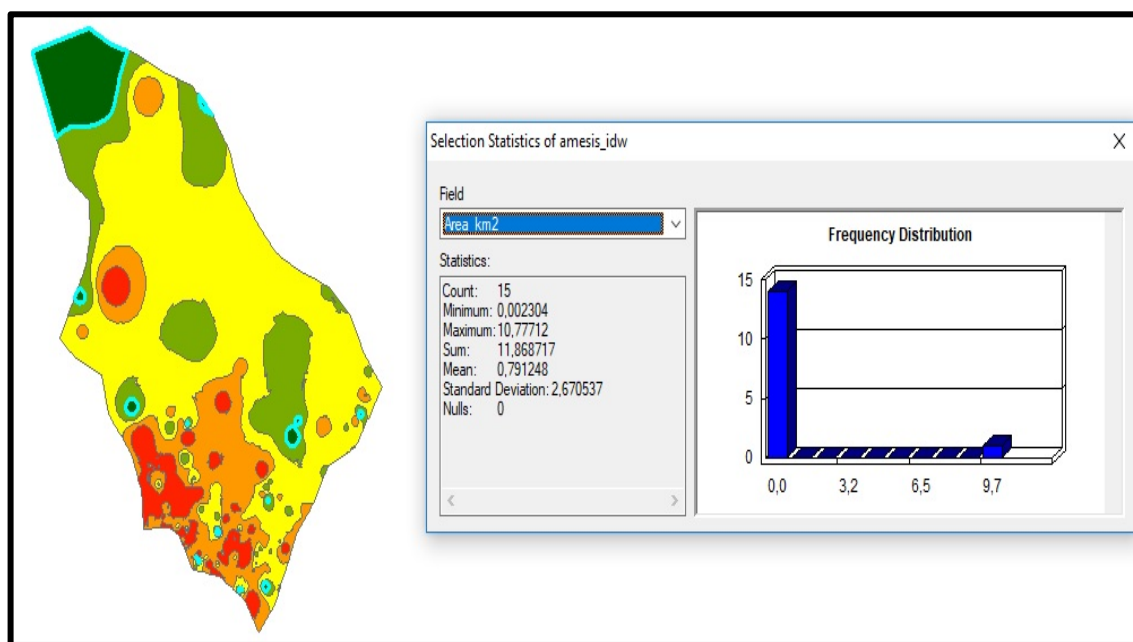


Figura 34. Calculo del área para la categoría Muy Baja del mapa de zonificación de amenaza de la metodología IDW

Se observa que la tendencia es que la amenaza sísmica disminuya hacia el NW de la zona de estudio y la amenaza muy alta se encuentre hacia el sur. Los porcentajes de amenaza muy alta no

difieren mucho en las tres metodologías, con el valor más bajo siendo 6.24% y el más grande 8.4%. Los porcentajes de amenaza alta difieren en un 8.79%, los porcentajes de amenaza media difieren en un 25.13%, los porcentajes de amenaza baja difieren en un 17.7% y los porcentajes de amenaza muy baja difieren en un 21.11%.

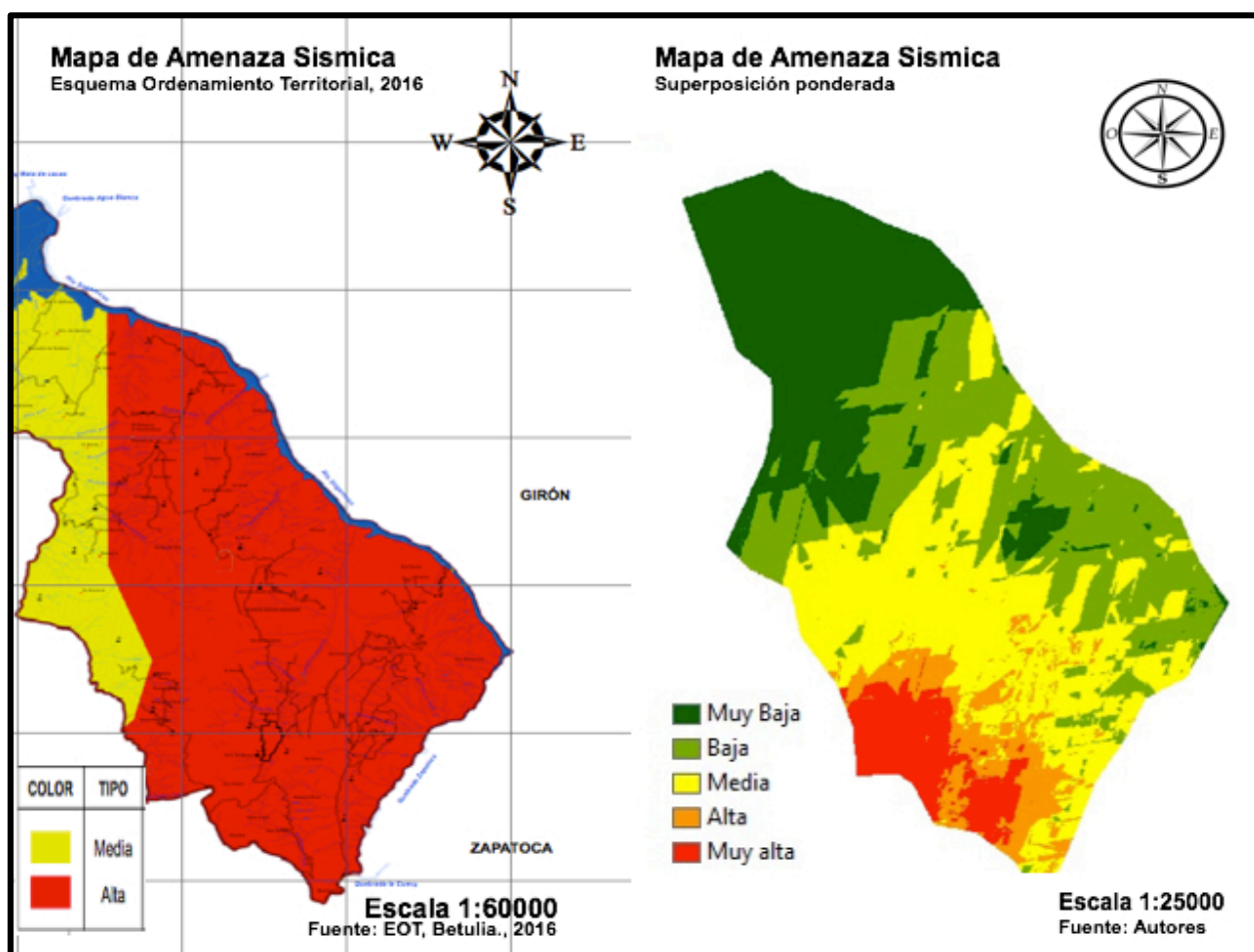
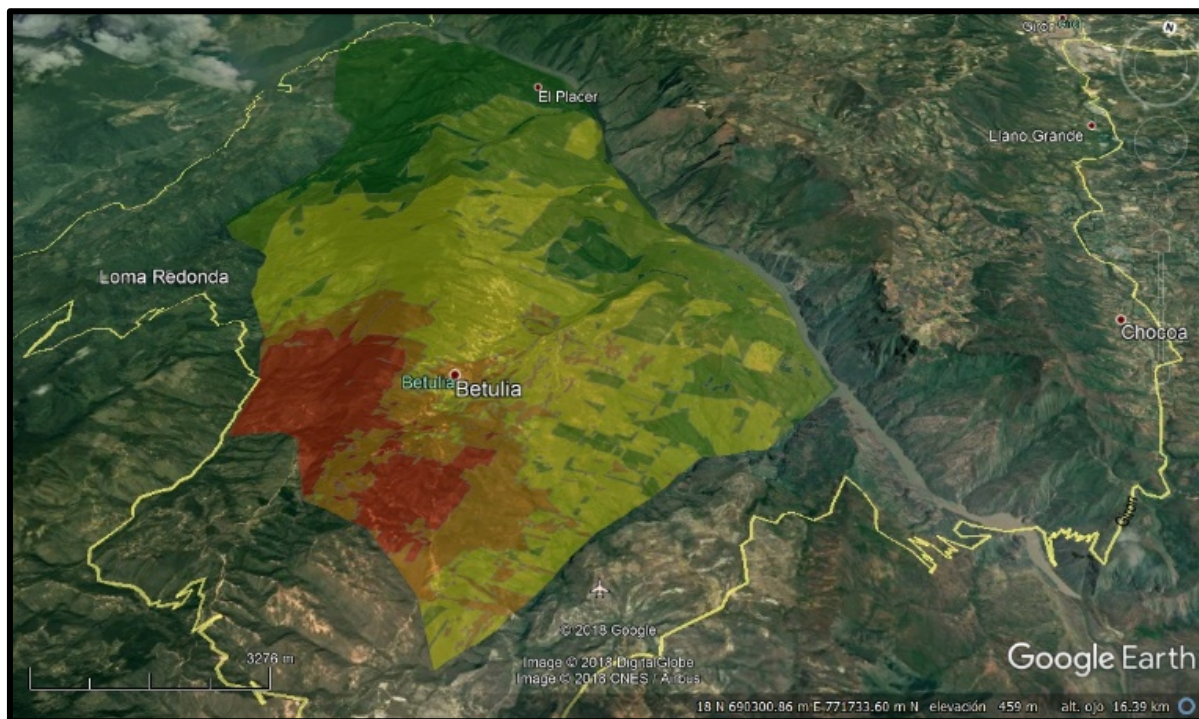


Figura 35. Diagrama comparativo de la zonificación generada por el EOT de Betulia 2016 a escala 1:60.000 (izquierda) y la zonificación de amenaza resultado de la investigación del presente artículo a escala 1:25.000

Se realizó la comparación de la amenaza obtenida en el EOT del 2016 y el mapa generado por la tercer metodología de este proyecto de investigación (ver figura 31), donde se determina que la

escala realizada es de mayor detalle en comparación al mapa de amenaza existente, se amplia los rangos de clasificación y de zonifica con mayor precisión.



*Figura 36. Mapa de zonificación de amenaza sísmica usando la metodología Superposición. Fuente: Mapa satelital de Google Earth superpuesto en el mapa de amenaza sísmica, editado por los autores.*

La zonificación del casco urbano según el mapa de amenaza encontrado y superpuesto en imagen satelital de Google Earth clasifica el casco urbano de Betulia con amenaza sísmica alta (ver figura 31) lo que ratifica el nivel de inestabilidad que se ha presentado durante varios años en edificaciones y obras civiles.

A través de los resultados generados se puede plantear la discusión sobre la particularidad de la localización de origen de los sismos, que se concentran sobre el sector sur del municipio, cobijando la cabecera municipal y la mitad de los centros poblados; determinando si existe o no correlación de la fuente que origina los movimientos telúricos en el municipio de Betulia con el

nido sísmico de Bucaramanga debido a su proximidad y sistema estructural, como también la similitud en las profundidades registradas tanto el área trabajada como en el nido.

Se deja abierta la opción de poder generar un estudio de mayor detalle y con mas rango de precisión donde se plantee de la inclusión de datos sísmicos con un mayor rango en el tiempo, así como la consecución de datos de aceleraciones más locales que permitirían modelar con mayor proximidad un posible periodo de recurrencia e induciendo un recalcu en las escalas de amenaza.

## 7. CONCLUSIONES

De los resultados de las tres metodologías se encontró que la metodología IDW representa una aproximación generalizada a la zonificación de la amenaza sísmica, apropiada para una escala pequeña mas no adecuada para una zonificación sísmica urbana.

La metodología Geoestadística representa mejor las observaciones reportadas por los autores que la metodología previa, aunque también hace una interpolación de la magnitud de los sismos, la diferencia radica en que esta metodología estudia la variabilidad de esos datos y la modela mediante un semivariograma teórico y elipse de anisotropía ajustándose adecuadamente a los reportes de grietas en obras civiles.

Correlacionando los resultados para las tres metodologías se observó las diferencias en porcentaje para las categorías de amenaza. La variación más grande se encuentra en la amenaza media con un 25.13% y la variación más pequeña se encuentra en la amenaza muy alta con un 2.16%. Se observó que la amenaza sísmica aumenta en la dirección SW de la zona de estudio.

La metodología que da una mejor aproximación al mapa de zonificación de amenaza sísmica es la de superposición ponderada debido a que usa la superficie generada con geoestadística y tiene en cuenta los factores como PGA, distancia a fallas, pendientes y geología. Esta metodología se puede optimizar si los valores de PGA se detallan mediante un estudio en campo.

Los sismos sentidos en el municipio que tiene como epicentro su ubicación fuera de este no son tomados en cuenta en esta investigación, para realizar un completo análisis en factores de vulnerabilidad y riesgo deben incluirse insumos como composiciones de suelo, resistencia de edificaciones, entre otros.

La localización de los sismos en puntos donde la evidencia estructural esta marcada por el sistema de fallas como la del Suárez, la Salina y Bucaramanga sugiere una correlación directamente proporcional y pueden estar asociados seguramente con la actividad del nido sísmico de Bucaramanga.

Las formaciones geológicas de tipo sedimentario son predominantes y cada formación toma un valor establecido de acuerdo al comportamiento en las expansiones de onda y propagación en el medio para determinar la amenaza

Los resultados obtenidos en esta investigación corresponden en la tendencia de los estudios previos que han ubicado al municipio de Betulia en una amenaza media-alta, pero entregan a detalle la zonificación de la amenaza sobre la zona sur del municipio tanto en el casco urbano como en los centros poblados más próximos.

Como resultado de los mapas de amenaza se concluye que el municipio de Betulia en su casco urbano y en algunos centros poblados se encuentra en zona de actividad tectónica considerable e inestabilidad, clasificándose como zona de media a alta amenaza ratificando la necesidad de continuar y profundizar estudios en el conocimiento de la amenaza en esta área y en general en todo el Departamento.

## 8. RECOMENDACIONES

Ejecutar un plan detallado en el Departamento de Santander, iniciando por el municipio piloto, Betulia, que permita capacitar a la población que habita en las zonas clasificadas como de alta y muy alta amenaza que fuesen obtenidas de haber ensayado y comparado las metodologías propuestas.

Incluir en la metodología de superposición ponderada mapas de clasificación de suelos, uso del suelo, riesgo físico, clima, entre otros, puede ayudar a generar un mapa de Riesgo Sísmico.

Elaborar un mapa departamental de amenaza sísmica empleando cualquier metodología aquí descrita usando preferiblemente la de Superposición Ponderada con datos variables de PGA para determinar la amenaza sísmica departamental y dar cumplimiento a la meta del conocimiento de la amenaza incluida en el plan de desarrollo departamental.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Betulia, 2009. Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Betulia, Santander.
- Al-Dogom, D., Schuckma, K., R. Al-Ruzouq., 2018. Geostatistical Seismic Analysis And Hazard Assessment; United Arab Emirates. Department of Geography, the Pennsylvania State University, USA – [aldogomd@gmail.com](mailto:aldogomd@gmail.com) <sup>2</sup> Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Sharjah, UAE.
- Arcila, M., y Dimaté, C. 2005. Caracterización de fuentes sísmicas. En: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6. INGEOMINAS-DAGMA. M. Bogotá, p. 38.
- Bartier, P.M. and Keller, C.P., 1996. Multivariate Interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW).
- Brejchaa, M., Stanková, H., & Cernota, P. (2016). Landscape modelling of past, present and future state of areas affected by mining. *Perspectives in Science*, 151-155.
- Cardozo, E. y Ramírez, C., 1985. Ambientes de depósitos de la Formación Rosa Blanca, áreas de Villa de Leiva. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo XIII: 1-13. Bogotá.
- Cediel, F., 1968. El Grupo Girón, una molasa Mesozóica de la Cordillera Oriental. *Serv. Geol. Nal. Bol. Geol. Bogotá* 16, pp. 5–96.
- Clavijo, J., *et al.*, 1993. Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes. Cuarto Simposio de Geología Regional. Bucaramanga.
- Coral, C., 1985. Contribución al estudio de las actividades sísmicas en Santander (Colombia). VI Congreso Latinoamericano de Geología. II: 271-292. Bogotá.
- Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *BSSA*, Vol. 58, pp. 1583-1606.
- Corredor, F., 2003. Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America. *Tectonophysics*, 372: 147-166.
- Esteva, L. 1970. Consideraciones prácticas en la estimación bayesiana de riesgo sísmico. *Univ. Nac. México. Insti. Eng. Rep.*, pp. 248.
- Esteva, L. 1976. Seismicity en *Seismic Risk and Engineering Decision*, cap. 6. Editores C. Lomnitz y E. Rosenbluth. Elsevier, Amsterdam, pp. 179-224.
- Etayo, F., 1968. El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana*, (5): 3-74. Bogotá.
- Etayo, F. y Rodríguez, G., 1985. Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo XXVI: 1-12. Bogotá.

- Frankel, 1995. Mapping seismic hazards in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, Vol. 66, No. 4, pp. 8-21
- Frey Mueller, J.T., Kellogg, J.N., and Vega, V. 1993. Plate motions in the North Andean region. *Journal of Geophysical Research*, pp. 21.853
- Gómez, J.A., 1980. Actividad sísmica en el Departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología*, 14 (28): 3-23. Bucaramanga.
- Gumbel, E. J., 1954. Statistical theory of extreme values and some practical applications. National Bureau of Standards Appl. Math. Series. 33 US. Govt. Printing Office. pp.51.
- Gumbel, E. J., 1958. Statistics of extremes. Columbia University Press, New York, p. 375.
- Julivert, M., 1958. La morfoestructura de la zona de Mesas al SW de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología*, (1) 7-44. Bucaramanga.
- Julivert, M. *et al.*, 1968. Lexique Stratigraphique International, merique Latine Colombia Premiere Parte). Centre National de la Recherche Scientifique. 5, (4a), Colombie, p. 651. París.
- Hettner, A., 1892. Die Kordillere von Bogotá, Gotha, Paternans Mitteil; pp 22, 131. *Erganzungsheft*.
- Kasahara, K. Earthquake Mechanics. Cambridge University Press, pp. 248. 1981.
- Kagan, Y. & Knoff, L., 1980. Spatial distribution of earthquakes: the two point correlation function. *Geophys. Astr. Soc.* 62, pp. 303-320.
- Langenheim, R. L., 1954. Preliminary report on the stratigraphy of the Girón Formation in Santander and Boyacá. Instituto Geológico Nacional. Informe 1011, pp. 20. Bogotá.
- Laverde, F. y Clavijo, J., 1985. Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tu y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo VI: 1-9. Bogotá.
- Lomnitz, C., 2005. El próximo sismo de México, pp. 12,13.
- López, A. & Espinosa, F., 1978: «Deterministic and probabilistic approaches to seismic risk determination». Proc. of the Symposium on the Analysis of Seismicity and an Seismic Risk. Liblice. 487-496. Czechoslovak Academy of Sciences. Praga
- Méndez Venegas, J., Díaz Viera, M., Herrera, G., & Valdés Manzanilla, A., 2013. Geostatistical simulation of spatial variability of convective storms in Mexico City Valley. *Geofísica internacional*, 111-120
- Monsalve, H. 1998. Geometría de la subducción de la Placa Nazca en el noroeste de Colombia. Universidad Nacional Autónoma de México, México. p.107.

- Morales, L., *et al.*, 1958. General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In *Habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin*: 641-695. Tulsa.
- Muñoz, D., 1989. *Conceptos básicos en riesgo sísmico*. U. Complutense, Madrid. Pp 199-213
- Navas, J., 1963. Estudio estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental). Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología*, (12) 19-33. Bucaramanga.
- Oppenheim, V., 1940. Jurassic-Cretaceous (Girón) beds in Colombia and Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 24: 1611-1619. Tulsa.
- Paredes Hernández, C. U., Salinas Castillo, W. E., Martínez Becerra, X., & Jiménez Hernández, S. B., 2013. Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 118- 130.
- Pons, D., 1982. Etude paleobotanique et palynologique de la Formation Giron (jurassique moyencretace inferieur) dans la region de Lebrija, Departamento de Santander, Colombie. *Nat. Savantes Brest. Sci. Jasc.1*: 53-78. París.
- Trangmar, B. B., Yost, R. S., & Uehara, G., 1985. Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties. In *Advances in Agronomy* (pp. 45-90). Orlando: Academic Press, Inc
- Trumpy, D., 1943. Pre-Cretaceous of Colombia. *Bulletin Geological Society of America*, 54 1281-1304. New York.
- Van Der Hammen, T., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. *Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico*, 6 (1-3): 67-128. Bogotá.
- Wheeler, O., 1929. Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama and la Paz Formation near the Eastern part of the Mares Concession. *Int. Emp. Col. Petr.* (Inédito)
- Woo, O., 1996. Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling, *RSSA*, Vol. 86, N. 0 2, pp. 353-36.

## APÉNDICE

APÉNDICE A. Plancha 120- Bucaramanga, escala 1:100.000. Fuente: Ingeominas, 1997.

APÉNDICE B. Tabla de Datos de los registros sísmicos utilizados, Fuente: Red Sismológica Colombiana y modificado por los autores.

APÉNDICE C. Mapa Geológico del municipio de Betulia, escala 1:60.000. Fuente: Mapa del proyecto apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes y esquemas de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto hidroeléctrico Sogamoso (a partir de fuentes información cartografía básica rural esc 1:25.000, IGAC, CAS, ISAGEN), 2016.

APÉNDICE D. Mapa de Pendientes del municipio de Betulia, escala 1:60.000. Fuente: Mapa del proyecto apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes y esquemas de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto hidroeléctrico Sogamoso (a partir de fuentes información cartografía básica rural escala 1:25.000, IGAC, CAS, ISAGEN), 2016.

APÉNDICE E. Mapa de amenaza sísmica a escala 1:60.000 Fuente: del municipio de Betulia, escala 1:60.000. Fuente: Mapa del proyecto apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes y esquemas de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto hidroeléctrico Sogamoso (a partir de fuentes información cartografía básica rural escala 1:25.000, IGAC, CAS, ISAGEN), 2016.

APÉNDICE F. Archivos Ejecutables Metodología IDW. Fuente: Autores.

APÉNDICE G. Archivos Ejecutables Metodología Geoestadística. Fuente: Autores.

APÉNDICE H. Archivos Ejecutables Metodología PGA. Fuente: Autores.