
ANEXO F
AMENAZA POR DETONANTE SISMO

1. CONDICIONES DE AMENAZA SÍSMICA

Desde el punto de vista ingenieril, las laderas y taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman. Los movimientos en masa inducidos por sismos han sido documentados. En el sismo de Alaska de 1964, se estima que el 56% de los costos totales de los daños fueron causados por deslizamientos inducidos (Youd, 1978, Wilson and Keefer, 1985). Kobayashi, 1981, encontró que más de la mitad de todos los muertos en terremotos en Japón (magnitud mayor a 6.9) entre 1964 y 1980 fueron causados por movimientos en masa.

Para evaluaciones preliminares de estabilidad, el conocimiento de las condiciones sobre las cuales los movimientos en masa han ocurrido en sismos pasados es muy útil. Es lógico esperar que el grado de actividad pudiera incrementarse con el incremento de la magnitud del sismo y que hubiera una magnitud mínima por debajo de la cual movimientos en masa inducidos por sismos podrían raramente ocurrir. Es igualmente lógico esperar que el grado de actividad pudiera disminuir con la distancia fuente a sitio y que hubiera una distancia más allá de la cual, los movimientos en masa podrían no ser esperados por sismos de cierto tamaño.

Un estudio de 300 sismos americanos entre 1958 y 1977 mostró que los sismos más pequeños que produjeron movimientos tuvieron magnitud local de alrededor de 4.0 (Keefer, 1984). La máxima distancia, fuente al sitio a la cual movimientos han sido inducidos en sismos históricos, son diferentes de acuerdo al tipo de movimiento generado. Movimientos en masa y caídas, por ejemplo, han sido raramente encontrados más allá de distancias epicentrales de alrededor de 15 Km para sismos de $M=5$, pero han sido observados hasta alrededor de 200 Km para sismos de $M=7$. Similarmente, el área afectada también podría incrementarse con el incremento de la magnitud del sismo. Diferencias regionales en el comportamiento de la atenuación tienen una pequeña y aparente influencia sobre el área de los movimientos en masa inducidos por sismos.

Es evidente que la evaluación de estabilidad sísmica de las laderas es uno de los más importantes aspectos de la ingeniería sismogeotécnica. Para zonificación regional, como es nuestro caso, se puede considerar suficiente la información del estudio “Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS, Universidad Nacional, 2008-2010, informe en elaboración). Dicho estudio proporciona los valores de aceleración máxima horizontal a nivel de terreno firme (PGA) correspondiente a un periodo de 475 años, calculadas para una grilla cada 0.1 grados cubriendo la totalidad del territorio nacional y conformada por 16872 puntos, incluyendo adicionalmente 1114 puntos correspondientes a los municipios y capitales en origen Magna Sirgas Bogotá. En el marco del mencionado estudio, se ha empleado el método probabilístico con base en investigaciones geológicas, neotectónicas, sismológicas y de ingeniería sísmica. Los cálculos se han realizado mediante el uso del programa de computador Crisis (Ordaz *et al*, 2007), el cual tiene en cuenta los aspectos de geometría, recurrencia y ley de atenuación, así como los parámetros de probabilidad de excedencia y tiempo de exposición, definidos según la Normatividad Sismo resistente vigente (NSR-10). 7.3.2.1.

1.1 COBERTURA DEL DETONANTE SISMO

Por lo anterior y con base en los procesos y evidencias de inestabilidad que se han documentado en estudios de sismicidad histórica, así como en sismos recientes ocurridos en el territorio colombiano (p.e. Sismo de Páez en 1994, Sismo del Quindío en 1999, Sismo de Quetame en 2008, entre otros), la cobertura del detonante sismo obedece a la hipótesis de que a mayor aceleración sísmica horizontal basal (a nivel de roca), se incrementarán las fuerzas actuantes y se reducirán las fuerzas resistentes debido al incremento de las presiones de poros, lo cual no solamente depende del entorno sismotectónico considerado, sino de otras condiciones como la topografía del terreno y la disposición, espesor y propiedades dinámicas de los materiales que conforman el subsuelo, aspectos locales que están fuera del alcance del presente estudio. De esta manera, el cálculo del detonante sismo se generó a partir de los datos de PGA (cm/seg^2) correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, los cuales fueron rasterizados y categorizados cada 50 gales, permitiendo de esta forma calificar, de forma cualitativa (Tabla 1), para el área de estudio se debe de tener en cuenta para el criterio de calificación la Tabla 2; el grado de contribución del sismo a la ocurrencia de movimientos en masa.

En la Figura 1 se presenta la cobertura calificada del detonante sismo a nivel nacional, observándose que las zonas de mayor contribución coinciden con la localización de las estructuras geológicas y fuentes sismogénicas de mayor actividad y recurrencia sísmica, como es el caso del occidente colombiano, la zona centro-oriental Andina y la Cordillera Oriental.

Tabla 1. Calificación del detonante sismo según su contribución a los movimientos en masa. (Tomado de SGC, 2012).

Valores de PGA (cm/seg ²)	Calificación
10-100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

Tabla 2. Calificación de los valores de PGA de menor a mayor grado de contribución de la amenaza sísmica a su contribución a los movimientos en masa. (Fuente: INGEOMINAS, 2009)

Valores de PGA (cm/seg ²)	Calificación
<100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

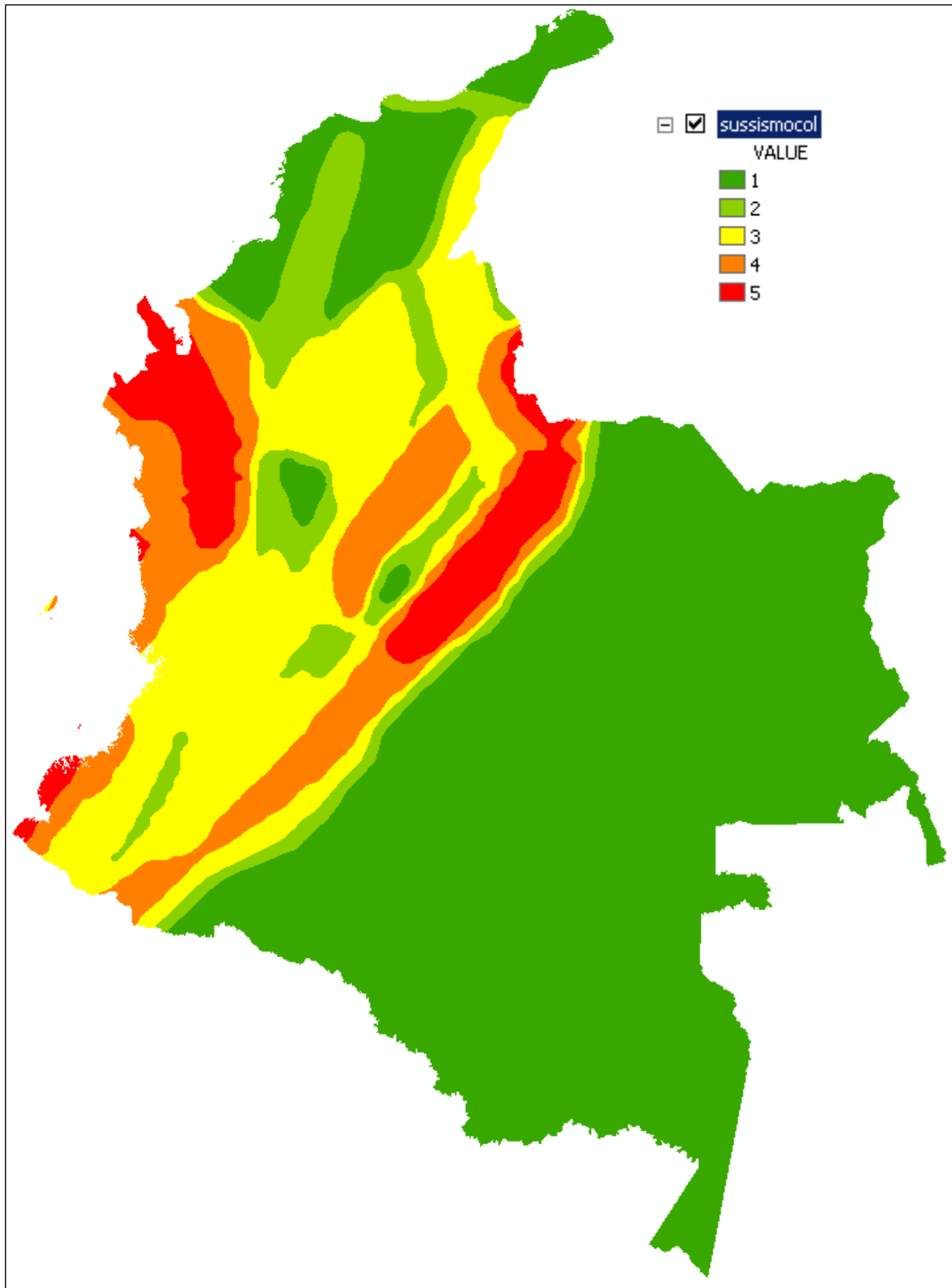


Figura 1. Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa (valores de PGA tomados de: Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, INGEOMINAS & Universidad Nacional, 2008-2010).

1.2 SÍNTESIS DEL MAPA DE AMENAZA A PARTIR DE LA VARIABLE DEL DETONANTE SISMO

Las condiciones sísmicas presentes en la región de la plancha 110 Pamplona se analizan a partir del componente del detonante sismo (Suministrado por SGC), en el cual se pueden obtener aspectos del comportamiento del terreno al someterse a factores que producen inestabilidad sobre las laderas y de esta forma generar planos de movimiento en sus diferentes mecanismos. El presente análisis se enfoca en la influencia que tiene el detonante Sismo sobre el área de estudio, por lo tanto se evalúan las condiciones del terreno para generar diferentes rangos de amenaza que sectorizan la plancha en zonas de bajo a muy alto grado de estabilidad.

El territorio Colombiano se ubica en la interacción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Sudamericana), las dos primeras generan márgenes convergentes en la zona oeste del territorio Colombiano sobre las costas Pacífica y Atlántica, estos márgenes destructivos producto del choque contra el cratón Sudamericano generan un grado de inestabilidad en las regiones adyacentes a estos márgenes, lo cual se refleja en un alto grado de actividad sísmica debido al movimiento y ruptura del cratón.

Dentro de este contexto geodinámico se generan diversas estructuras regionales que dividen el territorio colombiano en diferentes bloques tectónicos contenidos en el sistema Orogénico Andino; estos bloques se encuentran limitados por fallas de carácter regional como el sistema de Fallas de Borde Llanero, el sistema de falla de Romeral, la Falla de Bucaramanga-Santa Marta y la Falla de Oca. El comportamiento de estas estructuras genera el registro sísmico el cual se muestra en el mapa de actividad sísmológica para Colombia (Figura 2).

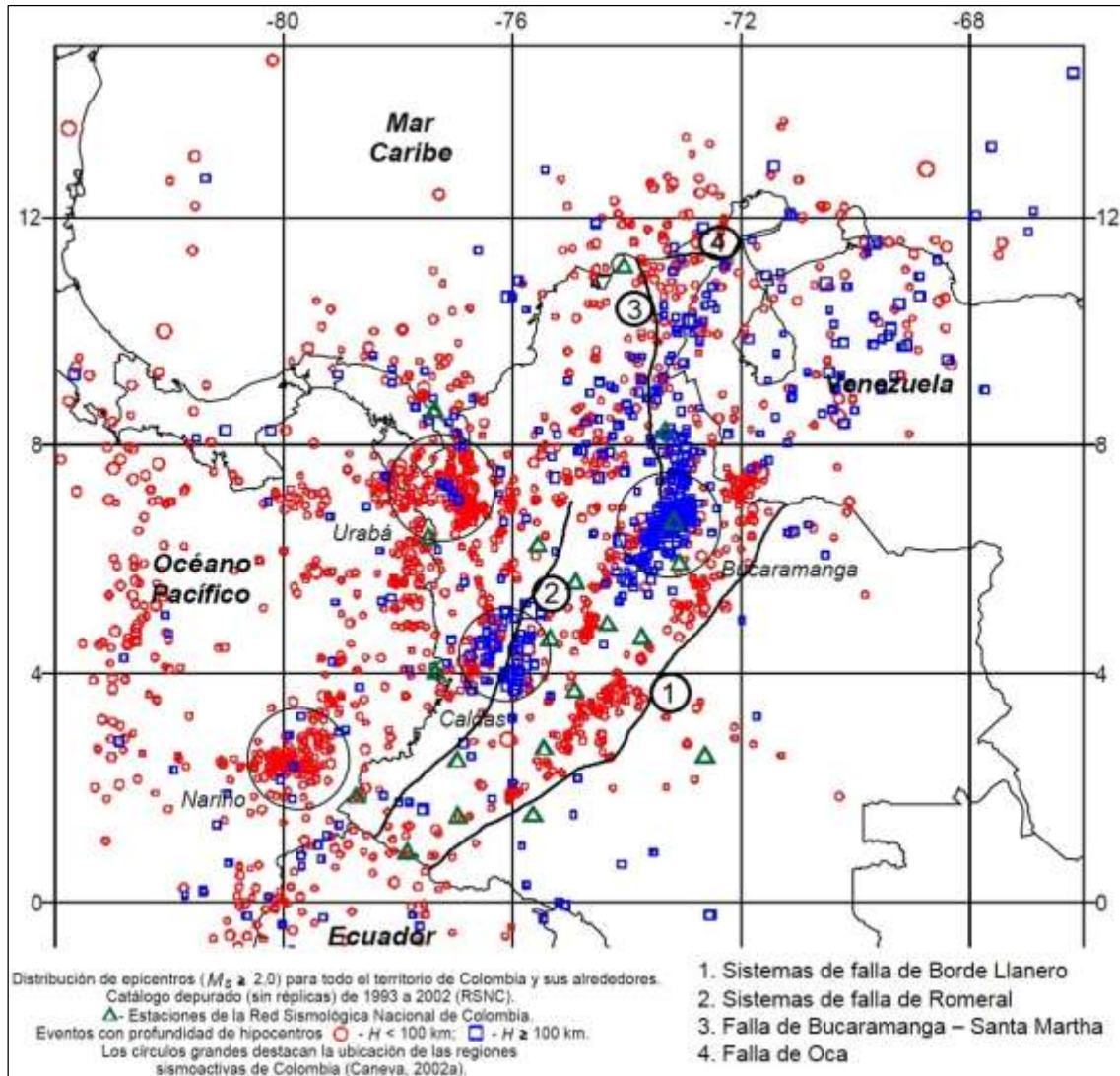


Figura 2. Distribución de epicentros, estaciones de la RSNC y estructuras principales de carácter regional (Tomado y modificado de Rincón *et al*, 2004).

La actividad sísmica registrada a partir del año 1900 al 2015 muestra una densidad de eventos sísmicos con escasa densidad en la Plancha 110 - Pamplona (Figura 3); en general, esta condición sísmica puede establecer en mediano grado planos donde las superficies presenten inestabilidad en las laderas y por consiguiente movimientos de las mismas, incluyendo factores como el tipo de roca, la cobertura vegetal y las condiciones del suelo.

La calificación del detonante sismo obedece a un estudio de esta actividad y el Servicio Geológico Colombiano suministra el mapa para la Plancha 110 Pamplona, que describe los siguientes rangos de calificación:

Específicamente, en la plancha se observa que el detonante sismo medio tiene una aceleración máxima horizontal a nivel de roca (PGA) $>150 \text{ cm/seg}^2$, y se localiza al occidente de la plancha, con un área de cubrimiento de 25,27% del total. El detonante sismo alto, tiene un cubrimiento de 74,30% del total de la plancha, y tiene valores intermedios de aceleración horizontal que alcanzan los 300 cm/seg^2 , lo que incidirá moderadamente en los niveles de amenaza a establecer; por último, un pequeño porcentaje (0,42%) del total del área de la plancha tiene un detonante muy alto y se localiza en el extremo más nororiental, con valores que superan los 300 cm/seg^2 (Figura 4).

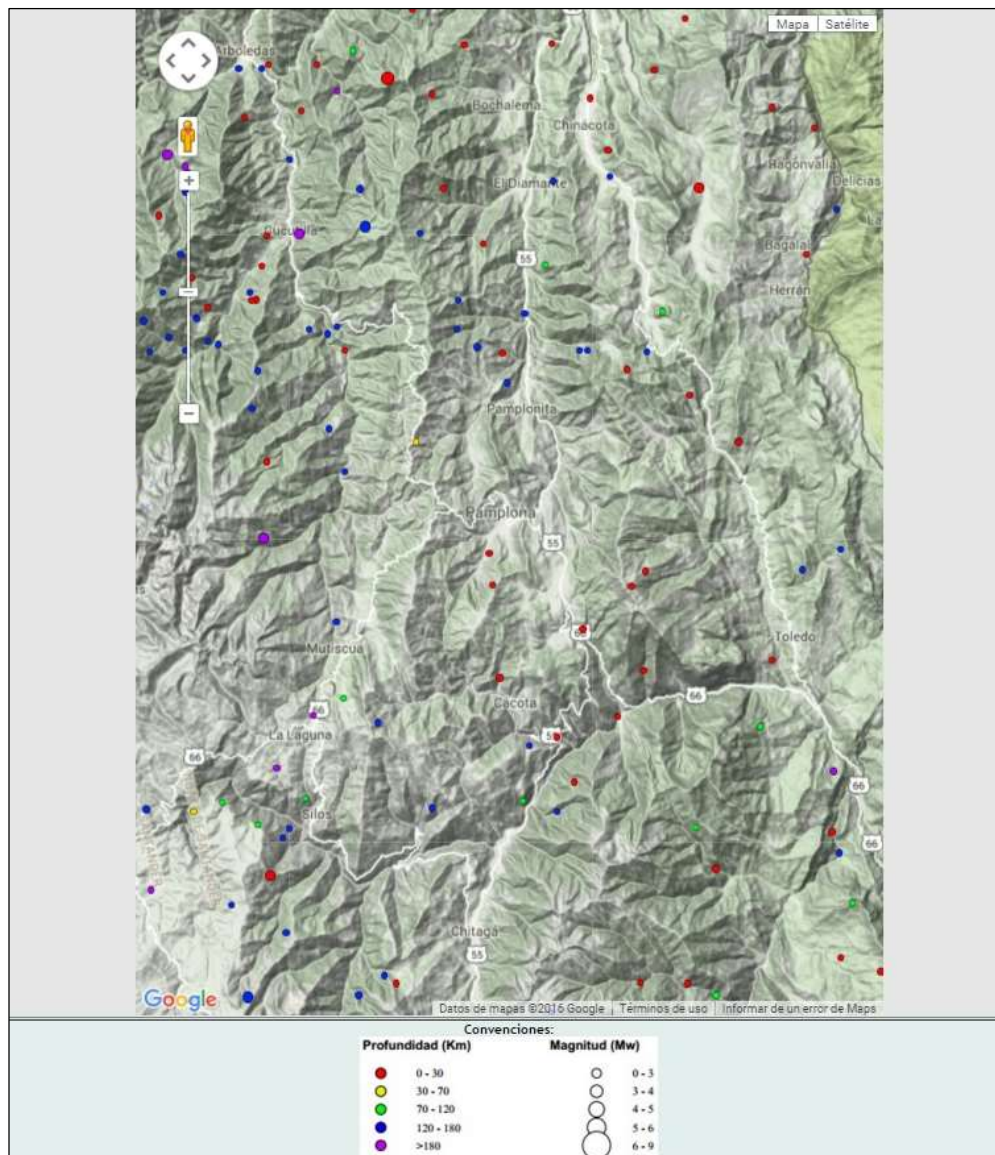


Figura 3. Mapa de puntos sísmicos registrados sobre la región del Municipio de Pamplona. Tomado de Red Sismológica Nacional.

Al incluir el detonante Sismo a la calificación por susceptibilidad total de la plancha, la cual agrupa variables como la Geología, Geomorfología, Suelos y Coberturas se obtiene la amenaza por detonante Sismo, como resultado de esta incorporación en la cual se han sumado estas variables, se genera un nuevo mapa donde se aprecia los sectores con mayor y menor influencia a las condiciones sísmicas (Figura 5).

1.2.1 Amenaza Media

En el rango de calificación de amenaza por detonante sismo moderado, se encuentran las zonas con el menor grado de inestabilidad por efecto del detonante sismo, que se localizan al occidente de la plancha, en área de los municipios de Tona, Charta, Berlín, California, Suratá, Cachirí y Vetás. Su expresión topográfica no es muy prominente en algunos sectores y el gradiente de las pendientes es bajo a moderado, en estos rangos son esporádicos los movimientos en masa del tipo deslizamientos traslacionales, caída de rocas y reptación de suelos, sobre geoformas de origen glacial y estructural.

1.2.2 Amenaza Alta

El rango de calificación de amenaza por detonante sismo alta, se distribuye en una franja que ocupa gran parte del occidente, centro y oriente de la plancha de manera heterogénea, y al occidente, en zonas de manera heterogénea, abarcando áreas de todos los municipios. La región presenta morfologías colinadas a montañosas en geoformas de ambientes glaciales, estructurales y denudativos, con un desarrollo de suelo que varía entre los 25 a 150 cm de espesor y cobertura vegetal entre herbazal denso de tierra firme, bosque denso alto de tierra firme, mosaico de pastos y cultivos, entre otros. Las condiciones de la zona aunque presenta un rango específico de calificación se pueden encontrar en pequeños sectores un mayor grado de desestabilización del terreno, es así, como se evidencia lugares con movimientos en masa de tipo deslizamientos traslacionales, rotacionales y flujo de detritos.

1.2.3 Amenaza Muy Alta

La región que presentan el rango de calificación muy alta, para la presente plancha, se localiza en el extremo nororiental de la plancha, en la vereda Quebrada Grande del municipio de Chinácota se observa de manera puntual al noroccidente de Chitagá, oriente de Tona, en Cácuta (cerca de la Laguna El Cornal, el sitio Don Alonso) y Labateca (márgenes de las quebradas Tencalá y Lirgua). En estas zonas se presentan las más altas condiciones de inestabilidad por la actividad sísmica, en la cuales se registran movimientos en masa de carácter deslizamiento (rotacional y traslacional), caídas de roca y flujos de detritos, sobre geoformas de origen estructural y denudativo. Es recomendable para estas tener prelación en la realización de estudios de geotecnia a una

escala de trabajo que permita detallar las zonas de mayor impacto por la actividad sísmica y su influencia en la actividad humana.

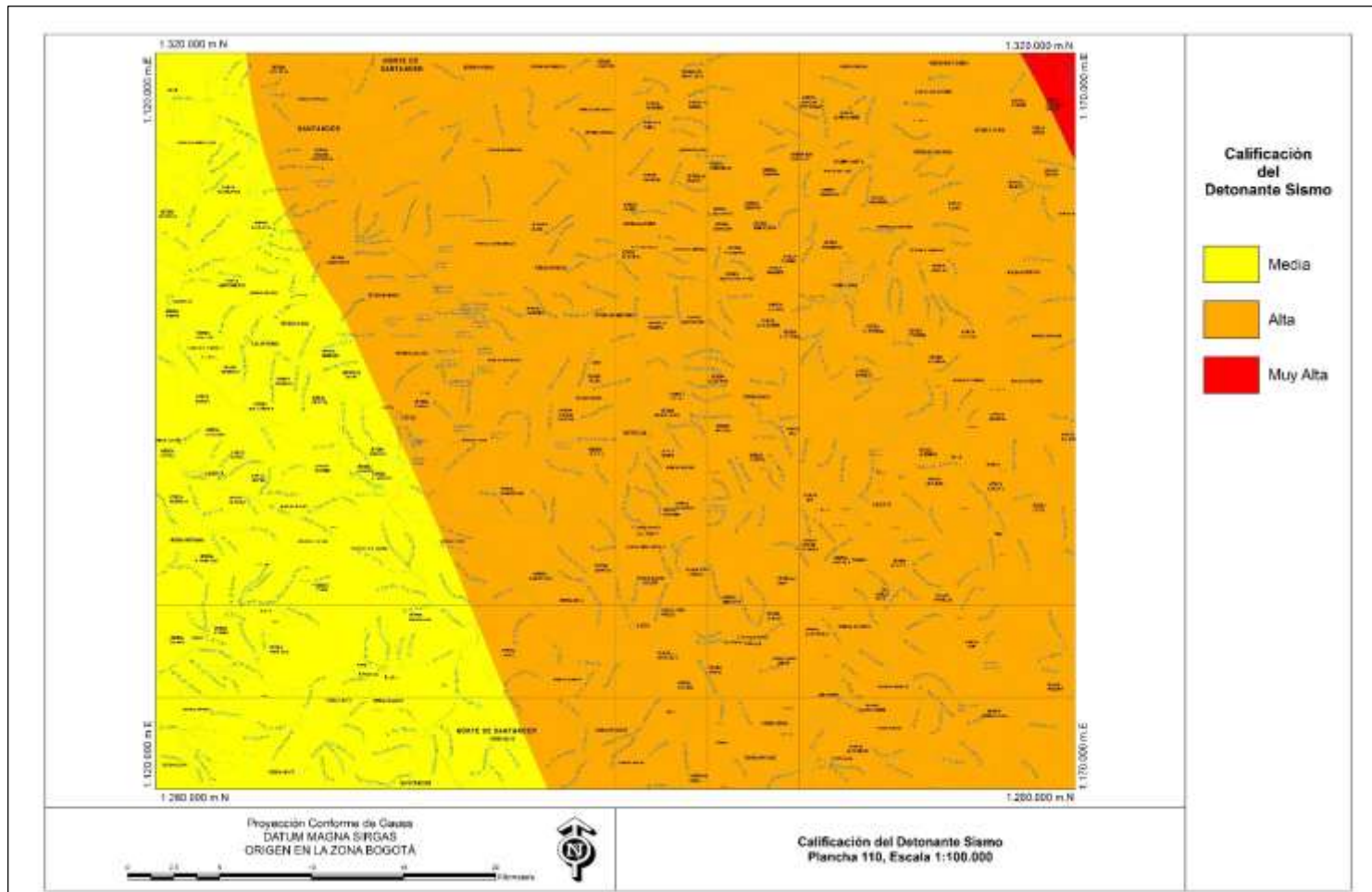


Figura 4. Mapa del Detonante Sismo suministrado por el SGC.

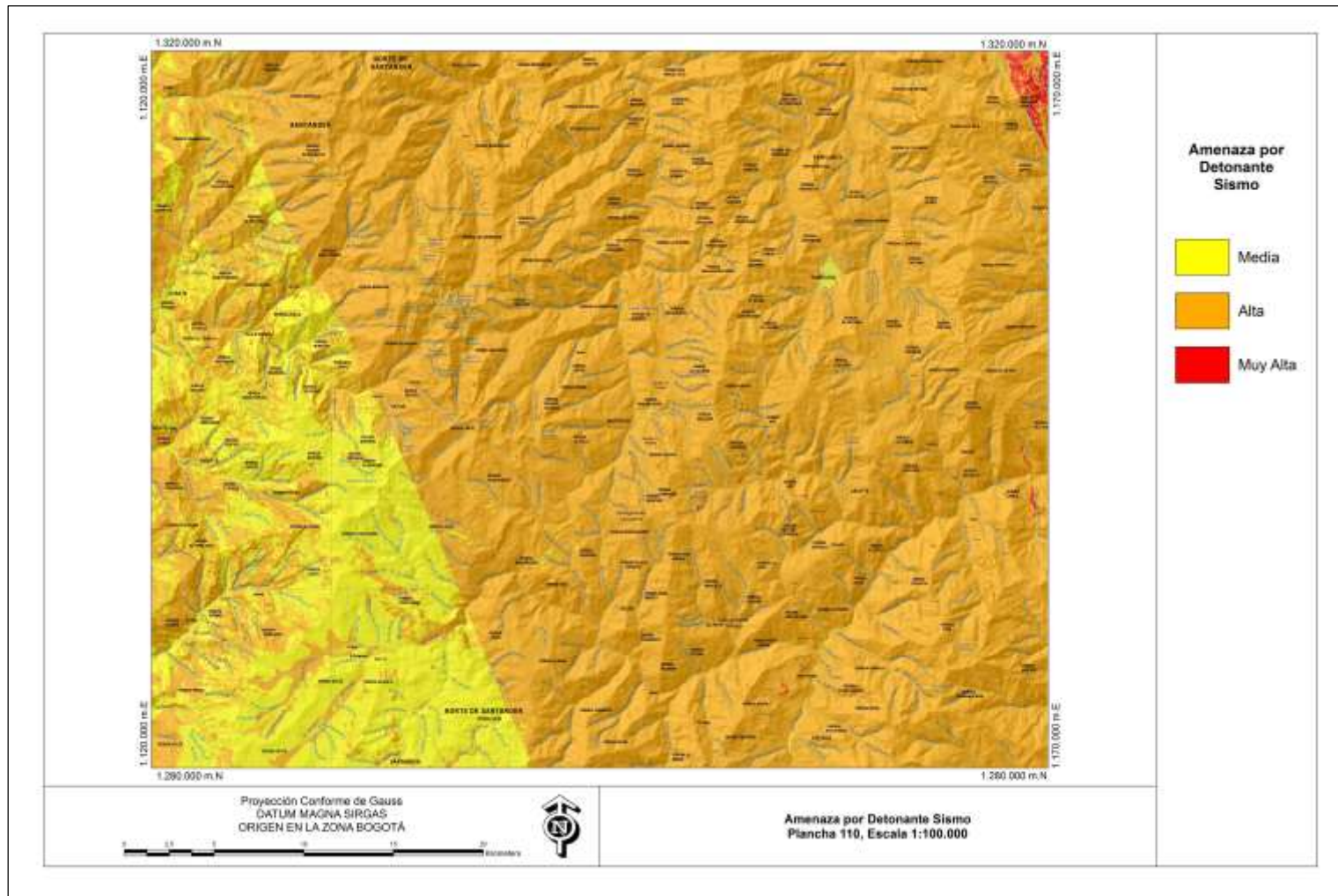


Figura 5. Mapa del resultado del cálculo entre la Susceptibilidad total y el Detonante sismo.