

---

***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 Sismorresistente vigente (NSR-10). 7.3.2.1.

## 1.1 COBERTURA DEL DETONANTE SÍSMO

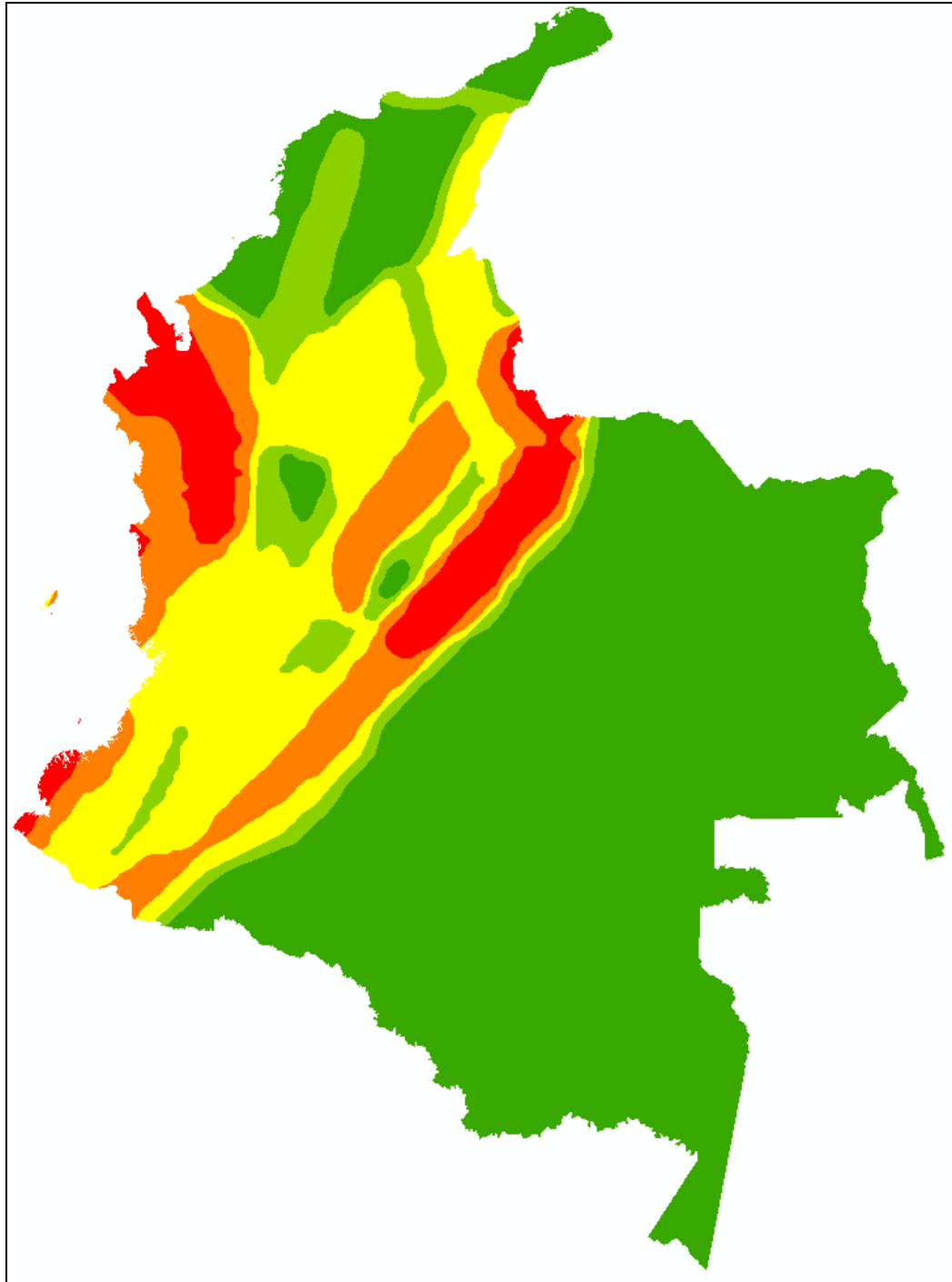
Por lo anterior y con base en los procesos y evidencias de inestabilidad que se han documentado en estudios de sismicidad histórica, así como en sismos recientes ocurridos en el territorio colombiano (p.e. Sismo de Páez en 1994, Sismo del Quindío en 1999, Sismo de Quetame en 2008, entre otros), la cobertura 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 ( $\text{cm}/\text{seg}^2$ ) 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/s <sup>2</sup> o Gal).	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 <sup>2</sup> )	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 364 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.

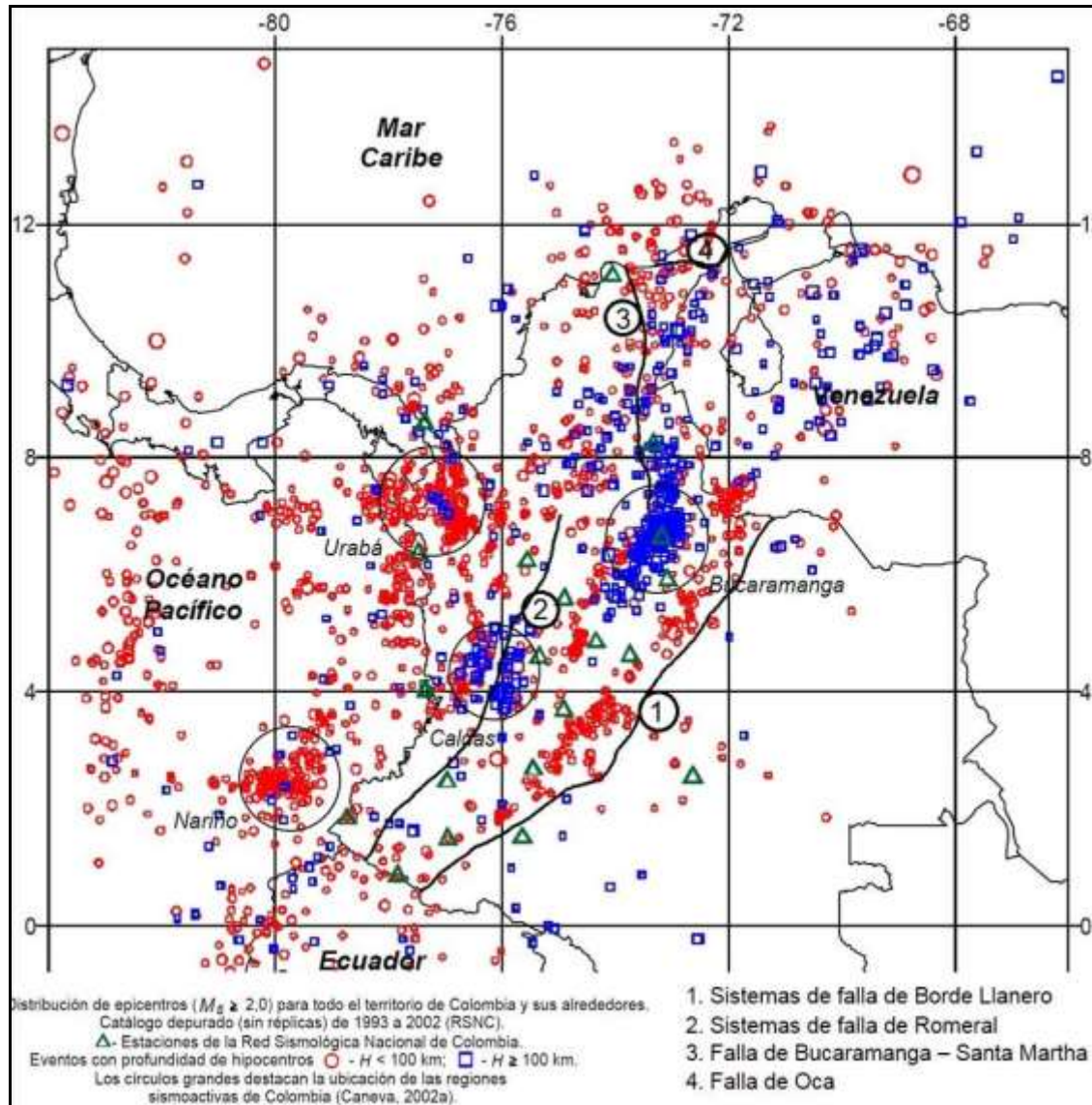
El territorio Colombiano se ubica en la interacción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Sudamericana), las dos primeras generan márgenes convergentes en la zona oeste del territorio Colombiano sobre las costas Pacífica y Atlántica, estos márgenes destructivos producto del choque contra el cratón 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).

La calificación de amenaza por el detonante sísmico obedece a un estudio de esta actividad y genera el mapa de amenaza por actividad sísmica, el cual es suministrado por el Servicio Geológico Colombiano. Este mapa para la Plancha 364 describe los rangos de calificación baja y media:

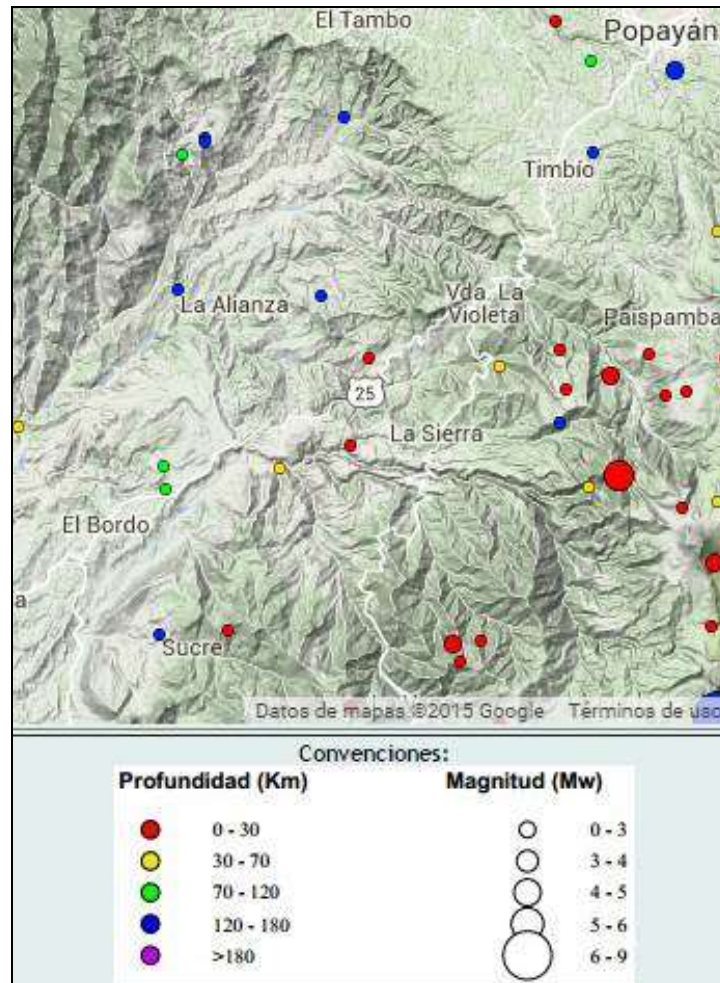
Con una calificación baja que cubre el 23,9% y media que cubre el 76,1% de la plancha, se presenta la actividad sísmica, cuyos valores de PGA se expresan con velocidades de desplazamiento horizontal de 150 a 200 cm/seg<sup>2</sup> (Figura 4). Este cubrimiento es general para la plancha y su actividad sísmica registrada a partir del año 1900 al 2015 no muestra una densidad de eventos sísmicos considerables (Figura 3); en general esta condición sísmica puede desarrollar en mediano y alto grado planos de debilidad donde las superficies presenten inestabilidad en las laderas y por consiguiente movimientos en las mismas,

incluyendo factores como el tipo de roca, la cobertura vegetal y las condiciones del suelo.



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

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).



**Figura 3.** Mapa de puntos sísmicos registrados sobre la región del Municipio de Rio Blanco. Tomado de: Red Sismológica Nacional.

### 1.2.1 Amenaza Baja

Con un rango de calificación amenaza baja están las zonas con el menor grado de inestabilidad por efecto del detonante sismo, en áreas con superficies suavemente muy inclinadas ( $11^{\circ}$  -  $15^{\circ}$ ) a planas y amplias. Se presentan en la región suroeste de la plancha la Cordillera Occidental en unidades denudacionales como ladera erosiva y sierra denudada; en el Valle del Patía, altiplano de Popayán y en la Cordillera Central se presenta en las cuencas de los valles de los ríos Timbío, Quilcacé, Esmita, Bojoleo, Guabas, Guachicono y Patía, y las quebradas Salinas, Los Obandos, La Cañada, el obispo, Zo Cantarana, Zo Hondo y Palobobo, en unidades fluviales tales como planicies de inundación, terrazas de acumulación y cauces activos. Su expresión en condiciones de área no es muy prominente y se observa que en algunas regiones esta calificación se presenta en cuerpos de agua entre los que se



encuentran los principales ríos y quebradas de la plancha, lo cual indica valores de amenaza no coherentes con el estudio, dado que estos cuerpos de agua no presentan planos de inestabilidad.

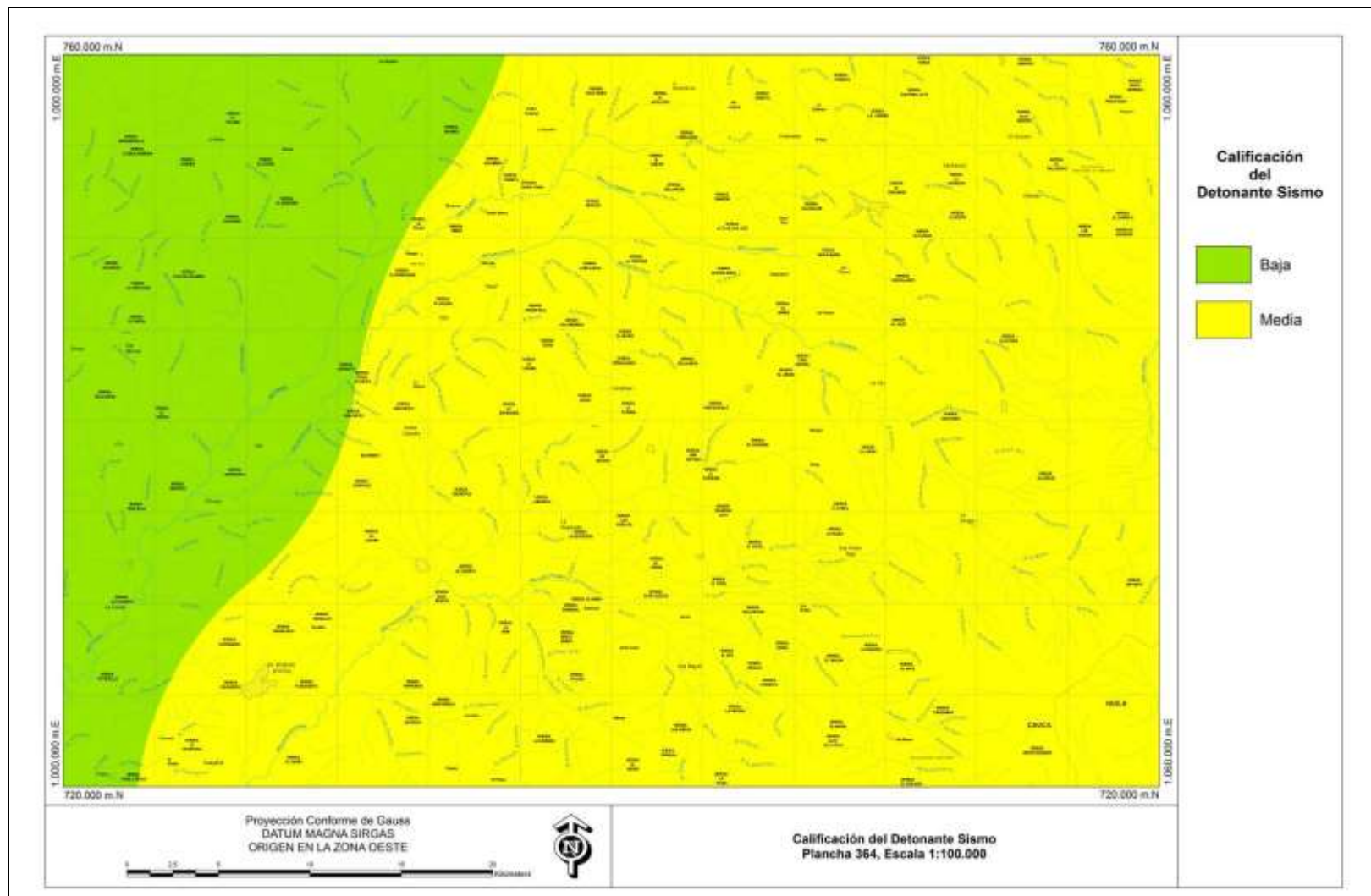
### **1.2.2 Amenaza Media**

El rango de calificación media de amenaza por Sismo comprende parte de la Cordillera Central y Occidental y en un área muy significativa del valle del Patía, sobre en zonas de relieve relativo moderado y laderas muy inclinadas ( $11^{\circ}$  -  $15^{\circ}$ ) y abruptas ( $16^{\circ}$  -  $21^{\circ}$ ). Esta región se presenta en geofomas de ambientes preferencialmente Estructurales y Denudacionales y en menor proporción Volcánicas, con un desarrollo de suelos que varían entre moderadamente profundos (50-100 cm) y profundos (100-150 cm), con Arbustal denso, Herbazal denso de tierra firme, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos y cultivos, Pastos enmalezados, Pastos limpios y Tejido urbano continuo. 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 asociados a la activada sísmica como deslizamientos traslacionales y caídas de roca.

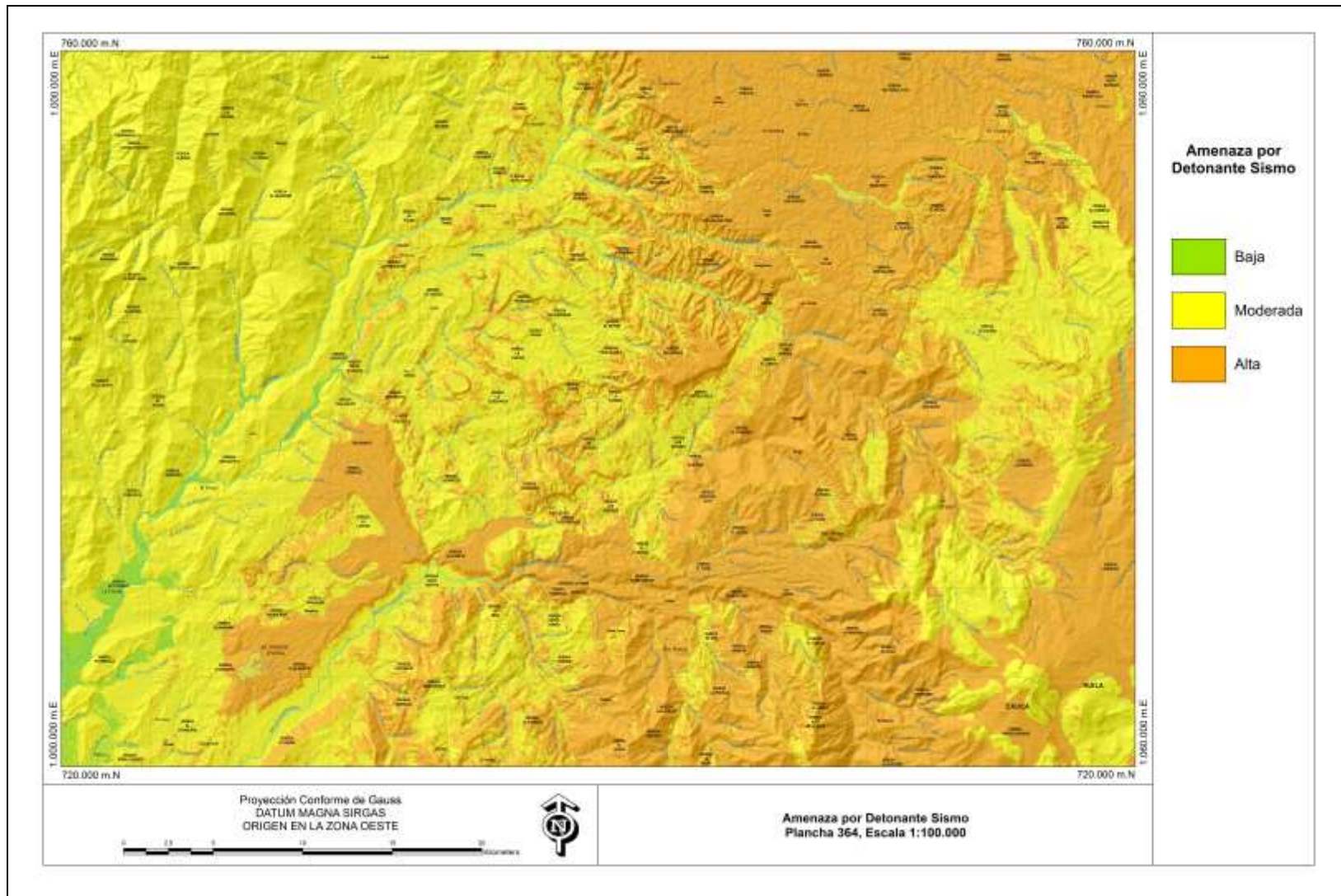
### **1.2.3 Amenaza Alta**

Esta región se presenta con morfologías colinadas a alomadas y montañosa en geofomas de ambientes, Estructurales y Denudativos y en unidades Volcánicas de pendiente inclinada a plana, priman los suelos profundos (100-150 cm) y en menor proporción suelos moderadamente profundos (50-100 cm) y muy profundos ( $>150$  cm). Este rango de calificación cubre todo el altiplano de Popayán, partes de la región Intercordillerana del Valle del Patía y la mayoría de la superficie de la Cordillera Central. Las condiciones de la zona aunque presenta un rango específico de calificación se pueden encontrar en pequeños sectores un mayor grado de inestabilidad del terreno como en las áreas que presentan suelos profundos y muy profundos y coberturas vegetales de mosaico de pastos con espacios naturales y vegetación secundaria o en transición, es así, como se evidencia lugares con movimientos en masa asociados a la activada sísmica como deslizamientos traslacionales de suelo y detritos y caídas de roca.

La zona en la cual se desarrollan laderas de pendientes altas y relieve montañoso de las cordilleras Central y Occidental demarcan regiones con alta Amenaza al detonante Sismo, por ende estas zonas deberían tener una prelación en cuanto a estudios de geotecnia y una escala de trabajo más detallada para sectorizar las zonas de mayor impacto por la actividad sísmica.



**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.