

Variables sobre la vulnerabilidad ante la amenaza sísmica en las ciudades colombianas con dos ejemplos: Tumaco y Villavicencio

Germán Chicangana

Ingeniero de Minas, Magister en Ciencias – Geología

Centro de Investigaciones en Ingenierías y Arquitectura “Rogelio Salmona”

Vicerrectoría de investigaciones

Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia

E – mail: german.chicangana@unimeta.edu.co

Manuscrito recibido 29 de septiembre de 2011. Aceptado 17 de enero de 2012

RESUMEN

Se realiza un análisis sobre la vulnerabilidad sísmica de dos ciudades de Colombia. Por un lado, Villavicencio con 400.000 habitantes, presenta a una alta amenaza sísmica, debido a que se encuentra ubicada en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental dentro del corredor del Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental. Estas fallas presentan en campo evidencias fuertes de tectónica activa conforme una valoración previa y su movilidad queda constatada con el registro de su sismicidad instrumental que a nivel regional realizan la Red Sismológica Mundial y la Red Sismológica Nacional de Colombia, junto con varios sismos históricos como los acaecidos en 1743, 1785, 1827, 1917 y 1923. Villavicencio igualmente en términos geológicos es muy vulnerable ya que su área urbana se está expandiendo sobre un gran abanico aluvial que se conformó durante los dos últimos millones de años, siendo susceptible a presentar altas aceleraciones sísmicas y períodos de hasta 75 segundos de duración en sus suelos, debido al gran espesor de los sedimentos no consolidados que constituyen el subsuelo de su área urbana. En sus aspectos sociales encontramos que la ciudad presenta una muy alta vulnerabilidad debido a que más de la mitad de su población tiene un nivel socioeconómico bajo, infraestructura deficiente, y poca atención gubernamental frente al tema de la amenaza sísmica, debido a la ausencia de una política de planificación local por parte del autoridad local ya que no existe un plan de ordenamiento territorial serio para la ciudad.

Tumaco por su parte presenta cerca de 90.000 habitantes en su área urbana, la cual se asienta en una isla constituida por sedimentos no consolidados consistentes en limos y arenas. Presenta antecedentes de megasismos acompañados de tsunamis como los de 1738, 1778, 1840, 1868, 1906 con $M = 8.8$, 1958 con $M = 7.7$ y 1979 con $M = 8.2$.

Igualmente ha sido afectada por tsunamis de procedencia lejana como el de 1836. Desde el punto de vista social, se presenta en esta ciudad una proporción de población con estrato socioeconómico bajo mucho mayor a Villavicencio con una infraestructura mucho más deficiente, pero su sector gubernamental está realizando planes de reubicación paulatina de todo su casco urbano desplazando sus edificios administrativos, escuelas y hospitales entre otros, hacia el continente, obligando de esta manera a que su población tome conciencia para su reubicación y de esta manera reducir su vulnerabilidad frente a un futuro sismo y tsunami.

Palabras Claves: Vulnerabilidad Sísmica, Colombia, Gestión de Riesgo, Desarrollo Sostenible.

ABSTRACT

In this paper show an analysis about the seismic vulnerability of two Colombian cities. These are Villavicencio and Tumaco. Villavicencio with 400,000 inhabitants has a high seismic hazard because located in the eastern foothills of Eastern Cordillera in corridor of East Frontal Fault System. This fault system presents strong evidences of active tectonics verified with field data and their mobility it is equally verified with the seismicity registered by the World Seismological Network and the National Seismological Network of Colombia and was demonstrated for this Colombian region the occurrence of the 1743, 1785, 1827, 1917 and 1923 historical earthquakes. Villavicencio also in geologic terms present high seismic vulnerability because to the urban area is expanding over soft soils that are originated of big alluvial fan that built in last two millions years and can happen in these soils high spectral accelerations with 75 seconds time periods because to the loose sediments that they conform have an great thickness ($> 100\text{m}$). In social terms I find that the city have a very high seismic vulnerability because more of half of population have a low social - economic level, bad quality constructions, and little attention persists of the local government front to the seismic hazard matter because to the absence of a politics by the local authorities on a serious Land Use Plan for the city. Tumaco present near of 90,000 inhabitants in his urban area which is over a barrier island made up of loose sediments that are silts and clay mainly. In Tumaco also has happened several historic mega - earthquakes that have left as consequence tsunamis as those happened in 1738, 1778, 1840, 1868, 1906 ($M = 8.8$), 1958 ($M = 7.7$), and 1979 ($M = 8.2$). Equally this city was affected by tsunamis that originated in a far earthquake as the happened in 1836. In a social point of view the low social - economic level of this city is bigger in comparison to Villavicencio. The quality of the constructions is bigger but the local authorities is executing campaigns for the gradual re - localization of all urban area toward continent and from this manner to achieve that the population reduces his vulnerability front to a future earthquake and tsunami.

Key words: Seismic vulnerability, Colombia, Risk Management, Sustainable Development.

INTRODUCCIÓN

Villavicencio se encuentra en el centro de centro de Colombia (Figura 1) entre los $04^{\circ} 09'$ norte y los $73^{\circ} 38'$ oeste asentándose sobre el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental, denominado Piedemonte Llanero. Es el principal centro administrativo y económico de la Orinoquía colombiana y tiene cerca de 400.000 habitantes (DANE, 2005). En esta ciudad se han realizado estudios sobre amenaza sísmica desde finales de la década de 1990 por parte de algunas instituciones gubernamentales y privadas, consiguiendo de ésta manera su “Zonificación Sismogeotécnica Preliminar indicativa” que fue realizada por INGEOMINAS en convenio con la Alcaldía a principios de la década de 2000. Las

recomendaciones y sugerencias que dejó este trabajo no fueron y ni han sido tomadas en cuenta por el sector gubernamental para ser considerados para el Plan de Ordenamiento de la ciudad. En éste trabajo encontramos que la amenaza sísmica alta se debe desde el punto de vista geológico por un lado a que la ciudad se encuentra ubicada dentro del corredor de varias de las más grandes fallas que conforman el Sistema de Fallas del Piedemonte Llanero, técnicamente denominado Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (SFFFCO), y por el otro, a que su área urbana se está expandiendo sobre un gran abanico aluvial que se conformó durante los dos últimos millones de años, siendo susceptible a presentar aceleraciones sísmicas altas debido al gran espesor de los sedimentos no consolidados que constituyen el subsuelo. Igualmente desde el punto de vista sismológico también determinamos que la movilidad permanente del SFFFCO (Figura 2) queda constatada con el registro de su sismicidad que a nivel regional realiza la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) y que con el soporte de la sismicidad histórica, la cual se basa en trabajos de macrosísmica previos, se han determinado aquí tres zonas sismogénicas que son las que eventualmente podrían producir un sismo con $M \geq 6.5$.

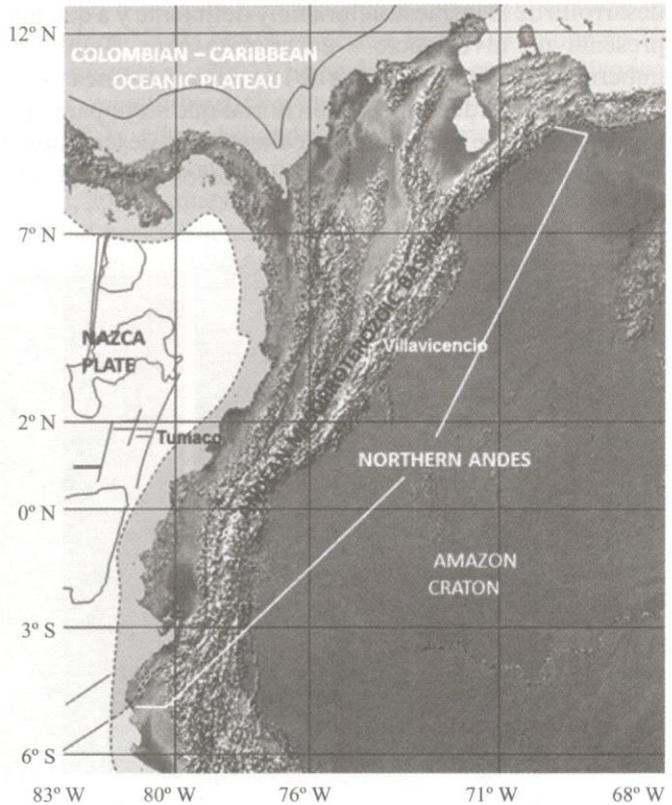


Fig. 1. Localización de las ciudades de Villavicencio y Tumaco.

Villavicencio también con respecto a sus aspectos sociales, presenta una alta vulnerabilidad frente al fenómeno sísmico, debido a que ésta tiene un nivel de desarrollo de la infraestructura muy deficiente y a que más de la mitad de su población presenta un nivel socio - económico bajo. También ha existido poca atención gubernamental frente al tema de la amenaza sísmica y que a la fecha manifiesta la falta de un plan de ordenamiento territorial que sirva para aplicar dicha zonificación. Con los resultados de este análisis, realizamos la descripción de un posible escenario post-sísmico para Villavicencio resultante de los efectos de un sismo de magnitud $M \geq 6.5$.

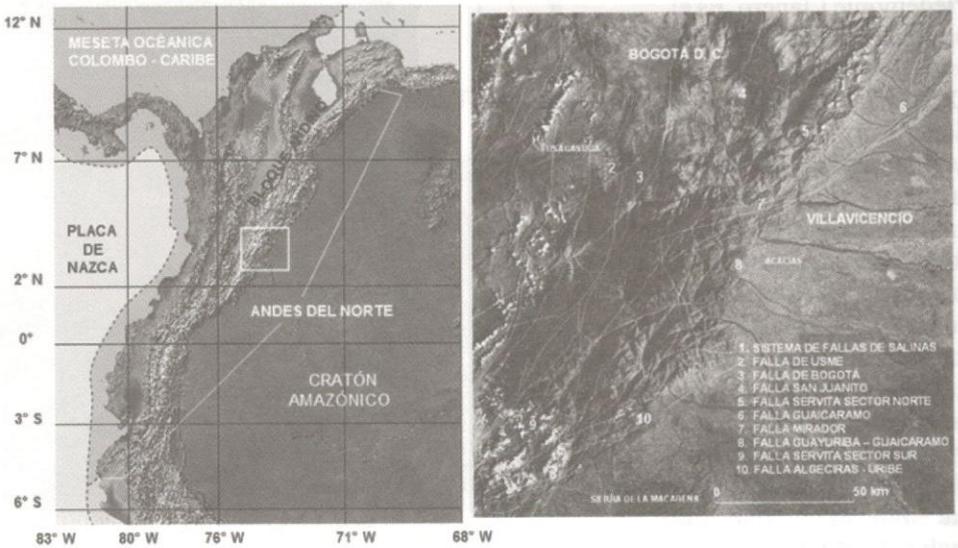


Fig. 2. Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (SFFFCO). A la izquierda localización de la figura de la derecha donde se exhiben las principales fallas que constituyen el SFFFCO.

Tumaco por su parte (Figura 1), presenta una alta vulnerabilidad frente al fenómeno sísmico ya que la ciudad está localizada en una región la cual se ubica entre los $1^{\circ} 48' 32''$ N y los $78^{\circ} 45' 58''$ W, en donde es frecuente un evento con $M \geq 8.0$ y que se encuentra expuesta a tsunamis ya sea por causa de un sismo local o lejano. Tumaco fue fundada el 30 de noviembre de 1640 y se asienta sobre un grupo de pequeñas islas (áreas $\leq 4 \text{ km}^2$) en una bahía próxima a un delta en donde sus suelos se constituyen de limos y arenas (Correa et al., 1988), reflejando un sistema de islas barrera (Martínez et al., 1995). Dichas islas están sometidas a constante erosión de su línea de costa por efecto de tormentas. Desde la geotectónica la bahía de Tumaco constituye una plataforma constituida por varios sistemas de abanicos aluviales que han ido paulatinamente conformando el talud continental desde finales de Mioceno. La secuencia estratigráfica regional muestra que se diferencian varios episodios de aportes terrígenos de manera discordante al menos para el Mioceno Superior y durante el lapso Plioceno Superior-Pleistoceno, aunque estas no están claramente diferenciadas (Cediel, 2010). Durante el transcurso de la evolución de la subducción

de la placa Nazca en este sector del norte de Suramérica, se fue progradando todo el sistema de deltas aluviales que constituyen en esta región de Colombia la plataforma continental. La relativa proximidad a la zona de subducción bajo este sector y la velocidad de convergencia de la placa Nazca con Suramérica, la cual se estima en 70 mm/año (Trenkamp et al, 2002; White et al., 2003), ha hecho que la amenaza sísmica sea muy alta en el litoral colombo - ecuatoriano. Con un gran sismo histórico como el del 31 de enero de 1906 con $M = 8.8$, la vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Tumaco es muy alta. En términos sociales Tumaco con una población de 85.855 habitantes de acuerdo al censo de 2005 (DANE, 2008), muestra que cerca del 90% de su población se asienta en la llanura intermareal perteneciente al delta del río Mira y las islas El Morro - La Viciosa y Tumaco con más del 80 % de vivienda de muy baja calidad (Figura 3).

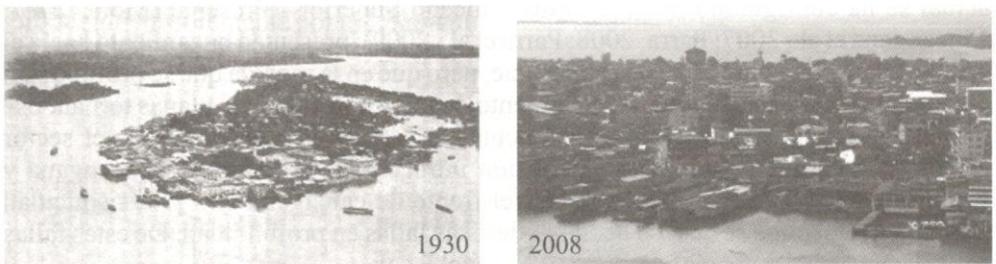


Fig. 3. Dos panorámicas de la ciudad de Tumaco, para 1930 (Grosse, 1935) a la izquierda y 2008 a la derecha. Se observa el tipo de suelos por un lado que conforman el área urbana con la imagen de 1930 y la gran densidad de población con la poca calidad de sus construcciones para 2008.

A continuación se muestra tanto para Tumaco como Villavicencio variables geológicas y sociales que nos indican el grado de vulnerabilidad sísmica de cada ciudad y los posibles escenarios post - desastre frente a la eventualidad de la ocurrencia de un sismo de magnitud grande conforme los parámetros geotectónicos de la región en la que cada una se ubica.

Estos trabajos forman parte del desarrollo de investigaciones en los campos de la Geotectónica, Sismotectónica y la Geología Ambiental desarrollados desde 2005 por el Grupo de investigación “Estudios sobre Riesgo Sísmico y Amenazas Naturales del Piedemonte Llanero” el cual está adscrito al Centro de investigaciones de Ingenierías y Arquitectura “Rogelio Salmona” de la Corporación Universitaria del Meta de la ciudad de Villavicencio.

ASPECTOS GEOTECTÓNICOS

Región de Villavicencio

El bloque central de la cordillera Oriental colombiana (Figura 2) se caracteriza por no exhibir litologías del basamento Mesoproterozoico Andino a diferencia de su bloque meridional, que limita al sur del central en $3,5^{\circ}$ N, y el bloque septentrional, que se

presenta al norte de 6° N (Chicangana et al., 2007). En éste bloque (Figura 4) las unidades de roca más antiguas pertenecen al Complejo Quetame, compuesto por rocas sedimentarias y rocas metamórficas con muy bajo y bajo grado con edad Neoproterozoico Tardío (Maya, 2001; Chicangana y Kammer, 2011). Sobre estas rocas se presenta una cobertera Fanerozoica compuesta de rocas sedimentarias cuyas edades abarcan el lapso Paleozoico Superior hasta Cenozoico, que en su conjunto presentan un espesor que varía entre 0,5 y más de 5 Km tanto en el Piedemonte Llanero como en los Llanos. (Mora, 2007; INGEOMINAS, 2007a). En general todas estas litologías se encuentran afectadas por varios episodios tectónicos, donde el grado de afectación por la tectónica en los paquetes rocosos es directamente proporcional a su edad y para esto han gobernado varios sistemas de fallas principales en el sector del Piedemonte Llanero durante varias épocas del tiempo geológico desde el Neoproterozoico (Chicangana y Kammer, 2011). Estas fallas cuyo estilo estructural actual se ha configurado durante lapso Mioceno Superior - Presente (Mora, 2007; Chicangana et al., 2007; Parra, 2008; Parra et al., 2009), presentan buzamiento hacia el oeste, con un alto ángulo hacia la superficie, pero que en la medida que se profundizan en dirección oeste, su ángulo de buzamiento decrece hasta ser casi planas tornándose listricas. La disposición geotectónica actual de las rocas que componen el sector estudiado comprende una zona de colisión intracontinental antigua (Chicangana y Kammer, 2011) que está delineada por el frente de cabalgamiento y la sismicidad intraplaca registrada se debe al accionar de estas fallas en profundidad. De estas fallas se destacan por su potencial sismogénico a nivel local:

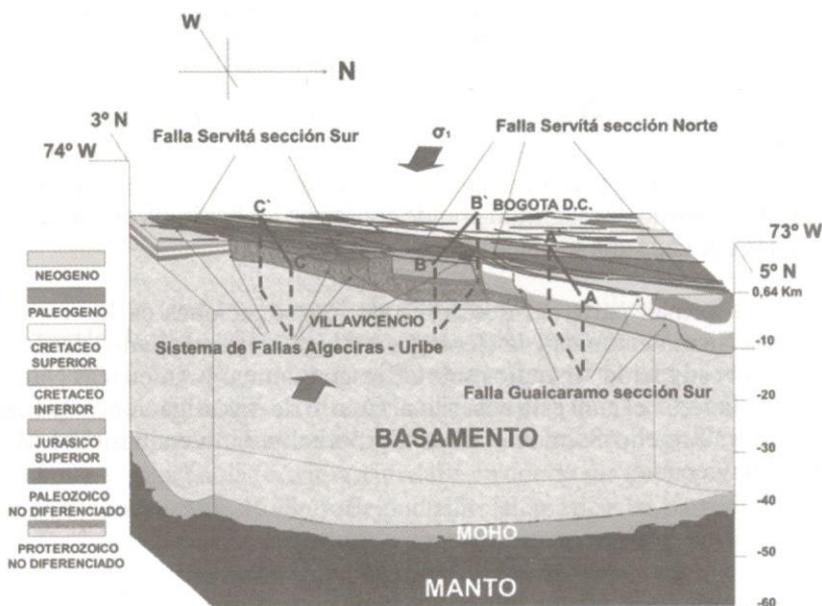


Fig. 4. Bosquejo general en 3D de la disposición tectono – estratigráfica con su escenario litosférico de la región de estudio, correlacionándose igualmente desde un punto de vista estructural con la ayuda de un DTM tomado de GTOPO30. En este se muestran los principales planos de fallas del SFFFCO, cuya característica es la de ser cabalgamientos. Los perfiles A – A', B – B', y C – C', se pueden observar en la figura 6.

El Sistema de Fallas Algeciras – Uribe, el cual es una agrupación de cabalgamientos con un rumbo en promedio de N 45°E (Figura 5) que se ubica a una distancia de 130 km al suroeste de Villavicencio al oeste de la estribación norte de la Serranía de La Macarena. Este sistema de fallas ha producido los sismos de 1785, 1927 y 1967. El sismo de 1967 es el mejor documentado ya que contó con el apoyo de la red sismológica mundial. Éste tuvo una magnitud (M_w) = 7.2, y su foco se localizó en 2,89° norte y 74,80° oeste (IRIS, 2011). La actividad sismológica del sector epicentral del sismo de febrero 9 de 1967 ha sido registrada de manera continua por la RSNC durante el lapso 1993 – 2007 (INGEOMINAS, 2008, 2011), y dicha red destaca una fuerte sismicidad somera para el trazo de la falla Algeciras. Chicangana et al. (2011) establecen para estas fallas un lapso de tiempo inferior a 100 años para la ocurrencia de un sismo con $M \geq 6.0$, lo cual sugiere que el sismo del 31 de agosto de 1917 con $M = 7.1$ (Dimaté et al., 2005), que afectó a Bogotá y Villavicencio, fue producido posiblemente por un segmento de éste sistema fallas.

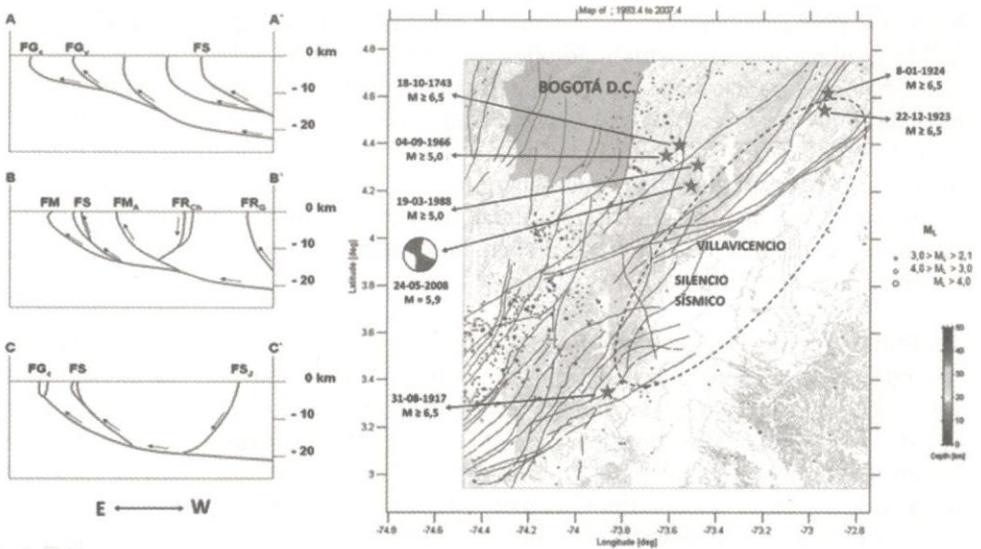


Fig. 5. Perfiles A – A', B – B', y C – C', indicados en la Figura 3. FG₁: Falla Guacaramo; FG₂: Falla Guayuriba; FM: Falla Mirador; FM₁: Falla Manzanares; FR_{ch}: Falla Rio Chiquito; FR_G: Falla Gallo; FS: Falla Servitá; FS₁: Falla San Juanito. De acuerdo a estos perfiles, que salvo A – A', el cual tiene poca información geológica pre – existente y es muy especulativo para su geometría tal como se muestra aquí, el estilo tectónico de estas fallas es el de cabalgamientos supeditados a fallas extensionales lítricas que sufrieron un proceso de inversión tectónica desarrollada durante las dos fases de acortamiento que sufrieron los Andes del Norte durante el Cenozoico. Dichas fallas tal como se ve en la figura de la derecha, que es una combinación de un modelo de elevación digital, el registro de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) para el lapso 1993 – 2007 y el mapa tectónico de la figuras 2 y 4 presentan históricamente al menos un sismo importante. La elipse nos indica un silencio sísmico basado en el registro de la RSNC.

La Falla Guaicaramo, es un cabalgamiento (Figura 5) que se desarrolló desde el Plioceno Superior hasta el Presente, como resultado de la extensión hacia el este de una componente estructural de la falla El Mirador debido a la propagación de la fracturación de unidades Paleo – Neógenas por el accionar de la Falla Servitá durante éste lapso de tiempo geológico (Mora, 2007). El acortamiento que configuró el estilo estructural del Piedemonte llanero del centro de Colombia cerca de Villavicencio deriva del desarrollo geodinámico de la interacción entre las placas Caribe y Nazca con la esquina noroccidental de Suramérica durante el Neógeno Superior.

Sin embargo éste autor indica también que hacia el norte de los 4.5° N, la falla Guaicaramo se torna fundamental propagando su plano hasta el basamento Mesoproterozoico Andino. La RSNC en su registro muestra una sismicidad regional relacionada a esta falla a partir de la latitud 5° N. El sismo más reciente relacionado a esta falla fue el ocurrido el 19 de enero de 1995 con $M = 6.5$ en el municipio de Tauramena, Departamento de Casanare (Dimaté et al., 2003), para la cual la RSNC evidencia sismicidad permanente en su catálogo. Cerca de Villavicencio, en el nororiente del Departamento de Cundinamarca, se presentaron los sismos históricos de 1923 y 1924 los cuales se relacionan con esta falla. Sin embargo Chicangana et al. (2011) estiman que esta sismicidad obedece más al trazo de la falla Servitá que a la falla Guaicaramo en esta región. De acuerdo a los grandes rasgos de tectónica activa que esta falla presenta en la estribación sur de la Serranía de las Palomas, 30 km al norte de Villavicencio. Chicangana et al. (2010a y 2011), recomiendan que de manera urgente se despliegue una red sismológica local para poder detectar la microsismicidad asociada a su movilidad tectónica para de esta manera poder determinar el alcance de su amenaza sísmica, ya que la RSNC no la detecta en esta región tan cerca de Villavicencio.

-La Falla Servitá, es una gran falla de cabalgamiento (Figura 5) y su plano de falla se extiende hasta una profundidad superior a 30 km con un buzamiento de 45° NW presentando características de falla listrica a nivel cortical (Mora, 2007; Chicangana et al., 2007). Esta falla define una gran expresión fisiográfica rectilínea de varias decenas de Km de longitud, la cual es fácilmente observable desde imágenes satelitales y se ubica hacia el frente oriental del flanco oriental de la Cordillera Oriental en el centro del país (Figura 1). Este rasgo tan contundente de la falla pone en evidencia su movilidad reciente y actual como estructura regional de primer orden. Paris et al. (2000), indican que esta falla pertenece al grupo de fallas Servitá - Santa María, posee un rasgo geomorfológico contundente, coincidiendo con Page (1986) que señala que ésta presenta un gran desplazamiento para tiempos muy recientes, pero estos autores recomiendan estudios neotectónicos detallados con el fin de caracterizar con fundamento científico su movilidad. La falla de Servitá está relacionada con sismos históricos que han afectado a Bogotá como los del 18 de octubre de 1743, 1966, 1988 y el del 24 de mayo de 2008 (Chicangana et al., 2007, 2011). La sismicidad de esta región es muy claramente registrada por la RSNC, la cual muestra un proceso presísmico regional para el sismo del 24 de mayo de 2008 y postsísmico a dicho evento (Figura 2), que deja en claro que la dimensión de la zona de ruptura que generó dicho sismo obedece más al mecanismo de una gran estructura que define un gran bloque cabalgante como lo es el caso de la falla de Servitá en el sentido geológico

estructural de Mora (2007) o como lo plantean desde un punto vista sismotectónico Chicangana et al. (2007).

LA GEOLOGÍA LOCAL DE LA ZONA URBANA DE VILLAVICENCIO



Fig. 6. Arriba, imagen tomada de Google Earth © que muestra el área urbana de Villavicencio para 2010 y abajo panorámica de la misma tomada desde los cerros occidentales igualmente en 2011. En la imagen de Google Earth © se observa que el área urbana se encuentra disectada por varios sistemas de drenajes constituidos por las cuencas del río Guaitiquía al norte y el río Ocoa al sur. La evolución de estas cuencas para al menos el último medio millón de años, ha construido a partir de materiales de arrastre y depósitos aluviales el suelo de más del 70 % del área urbana la cual se está expandiendo en sentido SE y en la medida que dichos sedimentos se apartan de la cordillera incrementan su espesor.

Como aparte especial está la geología del subsuelo de la ciudad de Villavicencio y sus implicaciones geotécnicas. El subsuelo de la mayor parte de la ciudad se ha conformado muy recientemente en términos geológicos y consta hacia la base de rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Corneta de edad Plioceno Superior representadas por conglomerados, areniscas, arcillolitas y limolitas en paquetes con muy poco buzamiento fuertemente estratificados y fracturados. Esta unidad está parcialmente cubierta hacia el piedemonte por derrubios y sedimentos de procedencia fluvial correspondientes al lapso Pleistoceno - Holoceno (Chicangana, 2009) y la zonificación sismogeotécnica indicativa preliminar realizada para la ciudad determinó que esta se encuentra en una desventaja muy grande con respecto a otras ciudades de tamaño intermedio del país y que ya han sufrido sismos previamente, como lo es el caso de Armenia, Pereira o Popayán, ya que Villavicencio está construida sobre un gran depósito de origen fluvio-torrencial y aluvial (Figura 6) cuyo espesor oscila de entre 5 hasta más 100 metros (Ojeda y Alvarado, 2002). La zonificación geotécnica dividió el área urbana de Villavicencio en cuatro zonas, las cuales oscilan en aceleraciones espectrales desde 0,7 g para el occidente de la ciudad en la zona de los cerros, hasta una aceleración superior a 2,0 g en los abanicos aluviales ubicados en la parte correspondiente al piedemonte cordillerano. En general, para la mayor parte del área urbana que se está extendiendo hacia el oriente y suroriental, la aceleración espectral esperada debido a la ocurrencia de un sismo muy cercano, es de 1,6 g y sus suelos se componen de humedales y pantanos. Los periodos fundamentales de los suelos de la ciudad en general se encuentran entre 0.20 y 0.75 segundos acordes con los periodos de registros de sismos tomados por el estudio de INGEMINAS para su zonificación sismogeotécnica (Ojeda y Alvarado, 2002). En Villavicencio, las zonas de rondas de los ríos y los humedales en los cuales está prohibido por norma ubicar y desarrollar asentamientos humanos debido a sus condiciones de riesgo como inundaciones y licuefacción de suelos, se encuentran ocupados debido a que por causas históricas como las sucesivas inmigraciones derivadas de la violencia en Colombia (lapso 1950 – 1970) y la violencia del narcotráfico (lapso 1980 - actualidad), ha generado una ocupación ilegal del territorio en una muy alta proporción. Lo anterior aumenta la vulnerabilidad de la población frente a un eventual sismo en una proporción que supera más del 60% del área urbana, considerando para ello igualmente una muy baja calidad de su infraestructura y de vivienda (Turkstra, 1998; Chicangana et al., 2010b).

Región de Tumaco

La evolución geotectónica la Bahía de Tumaco es muy reciente en términos geológicos. Esta es resultado de la convergencia entre la dorsal de Carnegie con el margen Suramericano desde el Plioceno Superior hasta el Presente (Figura 7). En esta evolución se presenta un paulatino levantamiento de la cordillera Occidental del sur de Colombia generando aportes sedimentarios derivados de la denudación de la cordillera y en menor proporción de los aportes vulcano - sedimentarios derivados de la actividad del volcanismo Neógeno del suroccidente colombiano, el cual presenta un incremento progresivo desde el Mioceno Superior hasta el Presente (Chicangana, 2005). Observando la columna estratigráfica representativa de la cuenca Tumaco, se

puede observar que esta se conforma exclusivamente de depósitos sedimentarios relacionados a la evolución de una plataforma continental. La nomenclatura estratigráfica de esta región para el Neógeno no es muy clara. Por un lado Thomas van der Hammen con datación palinológica estableció para la llanura Pacífica como Formación Naya a sedimentos con aporte continental de edad Mioceno y un espesor de más de 2000 m, y Formación Guapi a sedimentos similares de edad Plioceno que cubren de manera discordante a los anteriores (van der Hammen, 1958). A esta última unidad Nivia et al. (2003) la correlacionan con las Formaciones Mayorquín – Raposo, las cuales fueron determinadas para la llanura Pacífica del Valle del Cauca por Aspden (1984). La Formación Raposo corresponde a la facies continental y la Formación Mayorquín a la facies marina. Estas unidades se interdigitan y se les asigna edad Plioceno (Aspden, 1984). Con las líneas sísmicas de plataforma correspondientes a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (Cediell et al., 2010) y la línea regional SIS - 35 de la Campaña SISTEUR 2000 (Collot et al., 2004), se observan paquetes sedimentarios diferenciados y de gran espesor que recubren el basamento oceánico previamente deformado.

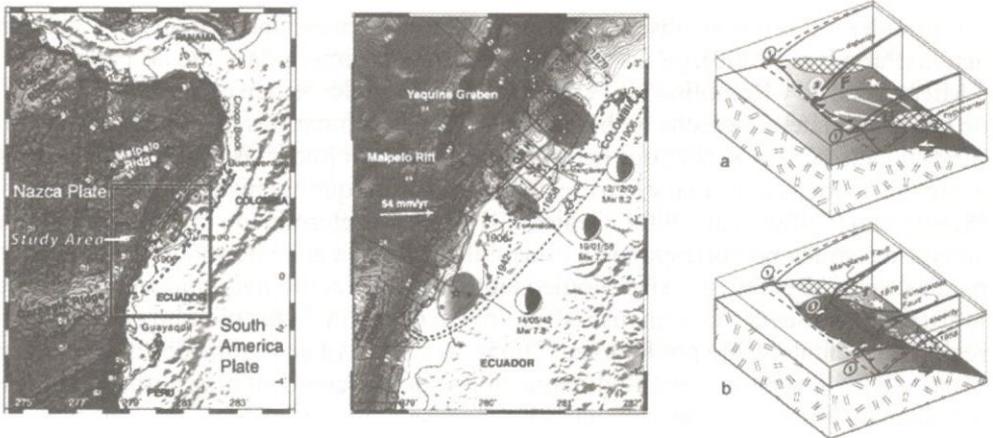


Fig. 7. Aspectos generales de los sismos sufridos en la región de Tumaco durante el siglo XX de acuerdo a Collot et al. (2004). Al extremo izquierdo se observa la región noroccidental de Suramérica en la zona de convergencia entre la placa de Nazca (gris oscuro) con la placa Suramericana (gris claro), en la cual el desplazamiento de la placa de Nazca es del orden de 54 de mm/año, como se ve en la figura central. En las figuras izquierda y central se observa que el megasismo de 1906 ($M = 8.8$), tuvo una longitud de ruptura (gran elipse) de cerca de 500 km, mientras que las rupturas de 1942, 1958 y 1979 fueron mucho menores y estuvieron dentro de la zona de ruptura del de 1906. Las zonas de ruptura son resultado del colapso de las asperezidades que se presentan en la zona de contacto entre ambas placas las cuales son las zonas con trazo cruzado en los bloques diagramas de la derecha.

La deformación inicial es posiblemente resultado de la acreción Campaniano - Eoceno de la Meseta Oceánica Cretácica Colombo - Caribe (MOCCC) de acuerdo a Nivia, (1996). Tanto hacia el norte de la cuenca de Tumaco como hacia el sur, se observa que la plataforma se encuentra afectada por varios sistemas de fallas normales con rumbo que varía entre NNE y WNW. El paquete sedimentario espeso que cubre el basamento, el cual se constituye de rocas de corteza oceánica asociada a la MOCCC (Kerr et al.,

2002), y que en edad abarca desde el Oligoceno Superior hasta el Presente, es mostrado por las líneas sísmicas con las cuales se puede estimar que éste puede alcanzar un espesor de hasta cerca de 5 km en las zonas de mayor plegamiento (Collot et al., 2004; Cediél, 2010). Durante la evolución de este margen continental desde la acreción definitiva de la MOCCC durante el Eoceno, se ha estimado que se han presentado varias disconformidades. Estas se presentan para los lapsos Oligoceno - Mioceno Inferior, Mioceno Medio a Mioceno Superior, Mioceno Superior - Plioceno y Plioceno - Pleistoceno. Sobre esta última y de la cual queda claro que obedece a la acción de la convergencia entre la dorsal de Carnegie con el margen suramericano, se observa que dio lugar a la discordancia que se presenta entre los sedimentos costeros correspondientes al lapso Pleistoceno - Holoceno con las Formaciones Mayorquin - Raposo. Estos sedimentos en la llanura Pacífica y la cuenca de Tumaco se han conformado de depósitos aluviales del tipo prodelta, que en general han dado lugar a sistemas de islas barrera y llanuras deltaicas mareales (Martínez et al., 1995; Nivia et al., 2003), y que han dado lugar al actual contexto geológico de la Bahía de Tumaco y su costa adyacente.

Las grandes fallas que se observan en esta plataforma presentan indicios de tectónica activa (Paris et al., 2000), ya sea en la zona continental emergida como las Fallas Naya - Micay al norte y Remolino - El Charco al sur, las cuales tienen con rumbo NE y son de tendencia lateral derecha a oblicuas, o las fallas submarinas de la plataforma con rumbos tanto NNE y WNW, que han sido detectadas por líneas sísmicas. Estas últimas presentan tendencia normal y han afectado sedimentos que abarcan el lapso Mioceno - Pleistoceno (Collot et al., 2004; Cediél, 2010). Se ha determinado que a nivel local la amenaza sísmica no corresponde a estas fallas sino a la zona de subducción, porque para esta región el registro sismológico tanto histórico como instrumental indica que la sismicidad de acuerdo al análisis sismológico de la trinchera colombo - ecuatoriana realizado recientemente por Pedraza (2005), es exclusiva de la zona de contacto de la placa subducida con la placa continental que se define como un megathrust o falla de megacabalgamiento. La ocurrencia de los megasismos que se producen el megathrust de la zona de subducción reactiva en cierta proporción a estas fallas, pero la manifestación tectónica más clara de su actividad tectónica es la subsidencia regional que se manifiesta en el litoral con la ocurrencia de los sismos producidos en la zona de subducción, tal como se evidenció con el sismo del 12 de diciembre de 1979 en donde la línea de costa descendió hasta 1,60 m por cerca de 200 km (Herd et al., 1981; Collot et al., 2004). Las líneas sísmicas muestran que la zona de subducción colombo - ecuatoriana está segmentada, destacándose como límite estructural de la zona de antearco la falla Manglares con rumbo NW, la cual se ubica al sur de la Bahía de Tumaco (Collot et al., 2004). Sin embargo esta segmentación estructural no influye en la propagación de la ruptura para el caso de grandes megasismos como el de 1906. Desde una escala local el sector de la Bahía de Tumaco, el cual está limitado por la falla Manglares al sur, no presenta segmentación hacia el norte por donde se generó la ruptura del sismo del 12 de diciembre de 1979 con $M_w = 8.2$ y mecanismo focal inverso. Igual por fuera de esta región al norte al sur de la isla Gorgona, se presentó el sismo del 9 de septiembre de 2007 con $M_w = 6.8$ y mecanismo focal normal (INGEOMINAS, 2007b). Las profundidades de ambos sismos varían. En el caso del

sismo de 1979 el foco se presentó a 33 km (Herd et al., 1981), mientras que del sismo de 2007 fue menor a 20 km. La profundidad del foco del sismo del 3 de junio de 1994 con $M_w = 5.8$ y mecanismo focal normal fue de 4,6 km, mientras que el del sismo del 27 de abril de 1996 con $M_w = 6.1$ y mecanismo focal inverso fue de 10,9 km. Estos dos últimos focos se establecieron de acuerdo a la relocalización de Pedraza (2005). Para el sismo de 1979, Pedraza (2005) compilando del NEIC, indica una profundidad focal de 25 km y mecanismo focal inverso para el megasismo del 31 de enero de 1906 con $M = 8.8$ y de 19 km para el sismo del 12 de diciembre de 1979. Con mecanismo focal inverso también están los sismos del 14 de mayo de 1942 con $M_w = 7.8$ y del 19 de enero de 1958 con $M_w = 7.7$. La profundidad del sismo de 1942 fue de 25 km y el de 1958 de 60 km (Pedraza, 2005; CERESIS, 2011). Los mecanismos focales normales son producto de un movimiento vertical fuerte relacionado a la subsidencia de la zona antearco (plataforma), mientras que los mecanismos focales inversos están más relacionados con la compresión relacionada a las rupturas en el techo de la zona de contacto del plano subducido en el canal de la subducción, es decir en la zona de megathrust (Figura 7).

En síntesis las fallas que se presentan en la cuenca de antearco que define la plataforma continental de la región de la Bahía de Tumaco en el suroccidente colombiano son estructuras activas de carácter pasivo. En otras palabras, el accionar de los megasismos en la zona de subducción produce la activación esporádica de los planos de falla que afectan directamente a la corteza que constituye la plataforma continental. Estas estructuras como las fallas Naya – Micay, Remolino - El Charco y las fallas de la plataforma en mar afuera verificadas desde las líneas sísmicas, exhiben rasgos de tectónica activa asociada al régimen sísmico regional, el cual deriva del accionar de la convergencia entre la placa de Nazca con el margen suramericano. La tasa de recurrencia de los sismos asociados al megathrust no ha sido posible establecerla. Desde el punto de vista de la sismicidad histórica la ventana de tiempo observada se remonta solo hasta más de 400 años desde la fundación de la ciudad de Esmeraldas en el noroccidente de Ecuador y no se tiene ninguna constancia de megasismos cuya ocurrencia haya sido antes de 1906, ni en Colombia, ni en Ecuador, salvo el dato de Gutiérrez (1948), que señala el sismo del 2 de diciembre de 1798 con coordenadas geográficas $1,9^\circ \text{ N}$ y $78,7^\circ \text{ W}$ e intensidad en escala de Rossi – Forel de V. Solo que este último dato con dicha fuente es único y se presta a especulación. Las estimaciones de acuerdo a la observado instrumentalmente con la sismicidad de la trinchera colombo – ecuatoriana, hacen indicar tasas de recurrencias para sismos con $M \geq 7.5$ para varias décadas, sin embargo el corto tiempo del registro sísmico instrumental realizado por las redes regionales de Ecuador y Colombia a una escala local, sobre todo la RSNC que no alcanza a tener un tiempo de desplegada de 20 años (John Jairo Sánchez, com. pers), no es suficiente para llevar a tener un estimativo aproximado consistente que permita poseer una valoración de los parámetros b y z con los cuales se puede determinar una aproximación del régimen sísmico de esta sismofuente en particular.

LA GEOLOGÍA LOCAL DE LA ZONA URBANA DE TUMACO

También la vulnerabilidad de la ciudad de Tumaco frente al fenómeno sísmico está dada por su localización geográfica y la naturaleza de sus suelos (Figura 8). En éste aspecto un sismo de gran magnitud producirá un efecto fuerte en la respuesta de la aceleración espectral de los suelos y la licuación de estos, ya que la mayor parte del área urbana se ubica sobre una isla barrera (Martínez et al., 1995), la cual se constituye de arenas y limos. Esta isla además hace menos de un siglo se constituía de dos islas barrera que estaban separadas por un estero o brazo constituyente del delta del río Mira (Meyer, 1997; Peralta et al., 2003). El estero en cuestión desapareció luego de 1930 por efecto del relleno sedimentario al producirse cambios en la dinámica del delta el cual es de carácter mareal (Nivia et al., 2003).

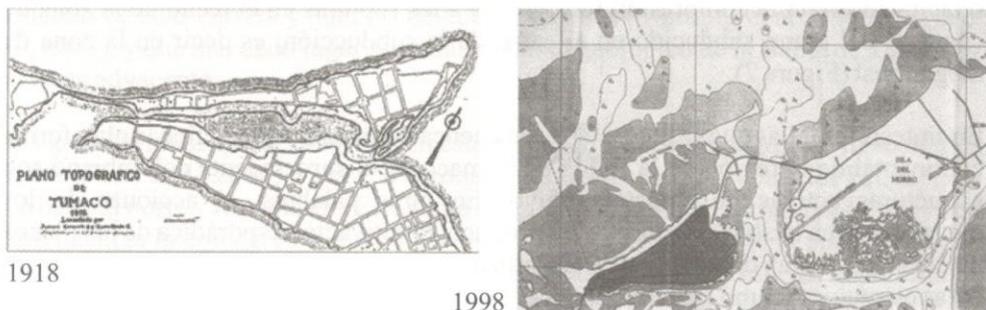


Fig. 8. Mapa topográfico y carta batimétrica de las islas barrera que conforman un delta mareal y sobre las que se ha extendido el área urbana de Tumaco. A la derecha (Meyer, 1997) se muestra como se distribuía el área urbana para 1918 y se observa que se presentaba un canal que cortaba en dos la isla. Para 1998, 80 años después, no existe rastro del canal y esto se debe a la isla han sido rellena por residuos sólidos (basuras) y la sedimentación durante los últimos 90 años. Por efecto de sismo y tsunamis, estos suelos son muy expandibles y susceptibles de licuación. Comparece la figura de la izquierda con las figuras 3 y 11.

Los fenómenos derivados de la licuación de suelos en éste caso particular derivan de su alta vulnerabilidad ante un tsunami. Con respecto a esta amenaza natural, Tumaco presenta una alta exposición a las inundaciones, ya que históricamente y muy frecuentemente en el caso de mareas extremas y tormentas esta situación es común (Martínez et al., 1995). Su alta vulnerabilidad a los tsunamis ha incentivado para la población planes de preparación con el fin de mitigar los efectos derivados de un eventual tsunami el cual puede generarse bien sea por un sismo local o lejano como el de 1868 cuando ocurrió el megasismo con $M \approx 9.0$ que afectó el sur de Perú el 13 de agosto de 1868 (CERESIS, 1985; Martínez et al., 1995; Meyer, 1997; USGS - NEIC, 2011).

Los efectos a nivel local en Tumaco con el sismo del 31 de agosto de 1906 de acuerdo a la descripción de Rudolph y Szirtes (1911) con la traducción de Hans Jürgen Meyer fueron:

... "Yo me encontraba el 31 de enero a las diez y media de la mañana en la calle, delante de mi casa, conversando con un vecino, cuando súbitamente y sin el menor preaviso comenzó el movimiento sísmico más terrible que jamás haya sentido. Todos fueron arrojados al suelo. Toda la Isla estaba en movimiento y todas las casas se mecían de un lado a otro, como un barco en mar embravecida, de tal manera que uno tenía que temer que en cualquier momento podían desplomarse y enterrarnos bajo sus escombros. El movimiento del terreno fue tan fuerte que hacía imposible moverse del sitio. Mi vecino vio su propia casa, ubicada a pocos centenares de metros, y temía su desplome: sin embargo no fue capaz de dirigirse hacia allá y socorrer a su familia. Yo también intenté varias veces y en vano llegar a mi esposa, quien se encontraba en la casa en el piso superior; ella había sido arrojada al suelo y no fue capaz de llegar hasta la escalera. Cuando yo hacía el tercer intento de llegar hacia ella y ayudarle, justo había logrado pasar por la escalera tambaleante y salir de la casa, así que por fortuna escapó de las últimas y terribles vibraciones...

Y con el Tsunami que siguió sus efectos fueron:

... Una media hora más tarde se regó en la población un gran susto, porque la mar estaba embistiendo hacia la isla con gran violencia. Afortunadamente, la ola de marejada rompió contra las dos islas que están localizadas delante de la ciudad y como en ese momento la marea estaba baja, el agua se podía extender sin inundar a la ciudad. 20 minutos más tarde llegó una segunda ola, la cual igualmente pasó sin causar daños, sin embargo, más tarde se notó que una de las dos islas que protegían a la ciudad había sido arrasada por el mar. Varias casas ubicadas en la costa fueron tumbadas por la ola, otras fueron averiadas fuertemente, pero no hubo ninguna víctima. En la costa de tierra firme la situación fue muy diferente. En una distancia de 80-100 km había muchas poblaciones y plantaciones que fueron destruidas sin excepción, como también lo fueron aquellas localizadas a lo largo de los muchos ríos, la mayoría probablemente por la gran ola de marejada que siguió al terremoto. La pérdida en vidas humanas se estima en total en 500-1000; sin embargo, es probable que la cifra exacta jamás se conozca...

Y con respecto a la liquefacción de los suelos y de fenómenos asociados:

... Una confirmación completa de las observaciones hechas sobre todo el fenómeno sísmico la obtenemos a partir del informe de otro testigo, quien antes de la ocurrencia del terremoto se había dirigido hacia la isla de Pindo, localizada hacia el S de Tumaco, para revisar los trabajos en su finca. Cuando en su viaje de regreso se encontraba nuevamente en cercanías de la playa frente a Tumaco, la tierra empezó a sacudirse súbitamente, de tal manera que sólo con esfuerzo pudo mantenerse de pié. Las palmeras se mecían, los cocos caían y las chozas de los pescadores en la playa estaban en movimiento ininterrumpido. Durante todo éste tiempo se escuchó un ruido fuerte. Tan pronto se había dado cuenta del fenómeno, se dirigió derecho hacia la playa; sin embargo habiendo llegado a su límite tuvo que detenerse súbitamente ya que la arena que tenía por delante se encontraba en un movimiento vertical, el suelo se abría y se volvía a cerrar, de tal manera que le fue imposible alcanzar su bote. Después de 3-4 minutos todo se tranquilizó y pudo regresar con su bote a Tumaco,

donde encontró todo en estado de terrible desorden. Media hora después del sismo llegó una ola de marejada con gran violencia y se rompió a un lado de la ciudad, donde fueron arrasados por el agua algunos astilleros. La ola de marejada llegó en periodo de bajar; su altura fue de 2.5 metros. Este fenómeno se repitió dos veces, después de lo cual volvió el estado previo...



Fig. 9. Consecuencias del sismo y el tsunami del 12 de diciembre de 1979 en Tumaco. Fotos tomadas de Pararas-Carayannis (2000).

Para el sismo del 12 de diciembre de 1979 de acuerdo a Herd et al. (1981), se muestra que toda la ciudad sufrió derrumbamientos de estructuras y edificaciones de concreto e inundaciones que obedecieron al efecto del tsunami el cual arrasó con casi la totalidad de las construcciones palafíticas ubicadas en las islas (Figura 9), y generó el fenómeno de la licuación de suelos de manera general a lo largo de la línea de costa incluyendo el área urbana de Tumaco y hasta 50 km dentro del continente, explicándose esto último por el tipo de costa que caracteriza a esta región, la cual se constituye de llanuras y deltas mareales que presentan hacia el litoral islas barrera (Martínez et al., 1995). La zona de subsidencia en la línea de costa que produjo la mortandad de la vegetación compuesta principalmente por manglares, y que se extendió por cerca de 200 km en dirección NE - SW, coincide en su límite, denominado por Herd et al. (1981) Limit of Ground Failure, con el trazo de la falla Remolino - El Charco (Martínez et al., 1995, París et al. 2000), por lo que el efecto sísmico produjo la reactivación de esta estructura generando en esta un movimiento vertical resultante del momento sísmico producido por el megasismo. Dicho movimiento dio lugar a la subsidencia en éste caso del bloque occidental de la falla. El desarrollo de éste fenómeno produjo que el tsunami aumentara su efecto, incrementando de esta manera su letalidad no solo en la región de la Bahía de Tumaco, donde desapareció por completo la población de San Juan de la Costa asentada sobre una isla barrera dejando más de 200 víctimas, sino también poblados ubicados dentro

de los brazos de los deltas del río Mira y Patía, así como de otros ríos como el Tapaje en donde en la localidad del Charco al norte y distante de Tumaco más de 100 km y de la línea de costa 20 km aproximadamente, se presentaron cerca de 100 víctimas. En 1912 Julián Uribe Uribe (Uribe, 1994), muestra los efectos posteriores del tsunami y subsidencia regional derivada del megasismo de 1906, indicando que la población de esa época atribuía al sismo el incremento de la proliferación de insectos como zancudos, jejenes y mosquitos que por ese entonces había en la región de Micay, 180 km al norte de la Bahía de Tumaco.

SITUACIÓN SOCIAL Y GOBIERNO

Villavicencio

La evolución urbana reciente de Villavicencio (Figura 10) según el trabajo de Tursktra, (1998), muestra que para 1994 el 25 % de la población de la ciudad se encontraba con un nivel socio – económico bajo a muy bajo. Para 2005 el DANE mostraba que el 17,77 % de la población de la ciudad se encontraba con necesidades básicas insatisfechas, el 25,7 % de los hogares presentaban déficit convencional de vivienda. En 2009 la Superintendencia de Servicios Públicos mostraba que el 49,1 % de la población pertenecían a los estratos socioeconómicos 1 y 2, de los cuales el 17,4% pertenece al estrato 1, que es el estrato socio – económico más bajo (CENAC, 2009). Esta última medida no ha variado para Villavicencio desde 1994 cuando Tursktra, (1998), culminó su trabajo sobre el desarrollo urbano de la ciudad, y se puede estimar que para 2011 se mantiene.

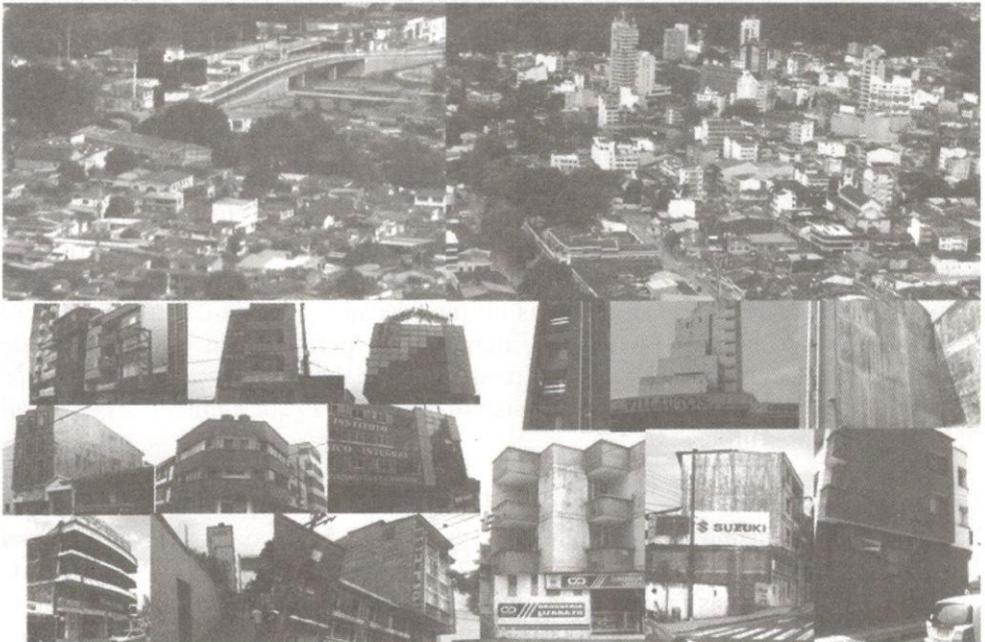


Fig. 10. Aspectos de las construcciones de Villavicencio

Desde la década de 1960 se dio inicio a la invasión de predios baldíos pertenecientes al sector gubernamental por parte de la población inmigrante de bajos recursos desplazada por la violencia política. Normalmente estos predios o se encuentran en zonas inestables susceptibles de corrimiento de masa, o son susceptibles de inundaciones por presentarse cerca o en humedales y rondas de los ríos o caños, y este último caso se ha incrementado desde la década de 1980 cuando se dio inicio al asentamiento pirata por parte de una nueva población desplazada inmigrante y de bajos recursos, producto del desplazamiento forzado por el conflicto armado y el narcotráfico (Tursktra, 1998). Esta situación de desplazamiento continúa hoy y sigue produciendo el incremento de la población en la ciudad. Considerando entonces que el 25% de la población se ubica dentro de la población más vulnerable, se considera que cerca del 10% de la población del país no presenta ningún tipo de escolaridad, lo que indica que el 10% de población de la ciudad es analfabeta y esta contribuye en la generación de nuevos grupos delincuenciales en una eventual situación post - desastre. La vulnerabilidad a un sismo es mucho mayor en aquella población que presenta déficit convencional de vivienda, lo cual se traduce en que esta tiene más de una necesidad básica insatisfecha. Esto significa en términos reales para una población de 400.000 habitantes, una población de más de 100.000 personas, sin considerar los otros 100.000 que se encuentran con necesidades económicas permanentes que son los que pertenecen al estrato socioeconómico 2. Si por último consideramos aquí la informalidad, Villavicencio según el CENAC (2009), presenta informalidad en el 67,6% de la población, cantidad que supera con creces a la cantidad de población perteneciente a los estratos socioeconómicos bajos.

En el sector gubernamental por otro lado, es frecuente la negligencia y mal uso de los recursos públicos por causas como la corrupción administrativa, la no contemplación de políticas que incentiven la prevención de desastres y mitigación de efectos derivados por la amenaza sísmica en los planes de desarrollo, y la falta o no realización de planes de ordenamiento territorial que cumplan con los requerimientos mínimos como es el caso de Villavicencio que en la actualidad aspira a que se reformule el POT para la siguiente administración. La desatención de las autoridades locales y regionales por la concentración de poder, la falta de visión a largo plazo, la debilidad del Estado, la ingobernabilidad y la corrupción entre otros, ha incrementado la vulnerabilidad de la población frente al fenómeno sísmico. Junto a lo anterior, en Villavicencio los diversos episodios de ingobernabilidad y de corrupción administrativa de la ciudad durante las últimas décadas además de su crecimiento urbano desorganizado en este mismo tiempo, han permitido la proliferación de muchas construcciones con fines comerciales principalmente, que en muchos casos no cumplen con las mínimas normas de sismoresistencia, lo que aumenta la penalidad del sismo en el área urbana.

Con base en lo anterior indicamos que el posible escenario post - desastre con la ocurrencia de un sismo con magnitud ($M \approx 6,5 - 7,5$) cuyo epicentro tenga una localización similar a la de los sismos de 1917, o los sismos de 1923 o 1924, sería el de al menos 1000 víctimas fatales en la ciudad y 1500 en la región al momento de la ocurrencia del terremoto, unas 2000 personas más morirían en las ruinas de los edificios colapsados en la siguiente semana si no son rescatados oportunamente, al

menos 50000 personas serían heridas y cerca de 300000 personas se encontrarían damnificadas en Villavicencio y la región vecina a la ciudad. Por los efectos del sismo, la ciudad se paralizaría, ya que se encontraría sin servicios públicos por lo menos en un lapso de tiempo que superaría los 3 meses considerando el estado actual de su infraestructura y las pérdidas económicas por efecto del sismo serían del 3 % del PIB (Chicangana et al., 2010 b). Éste modelo de pronóstico que sintetiza los resultados expuestos aquí, se basa en términos económicos y socio - culturales a un patrón de esquema de los resultados de post - desastre experimentado en los sismos de Popayán de 1983 y del Quindío de 1999.

Tumaco

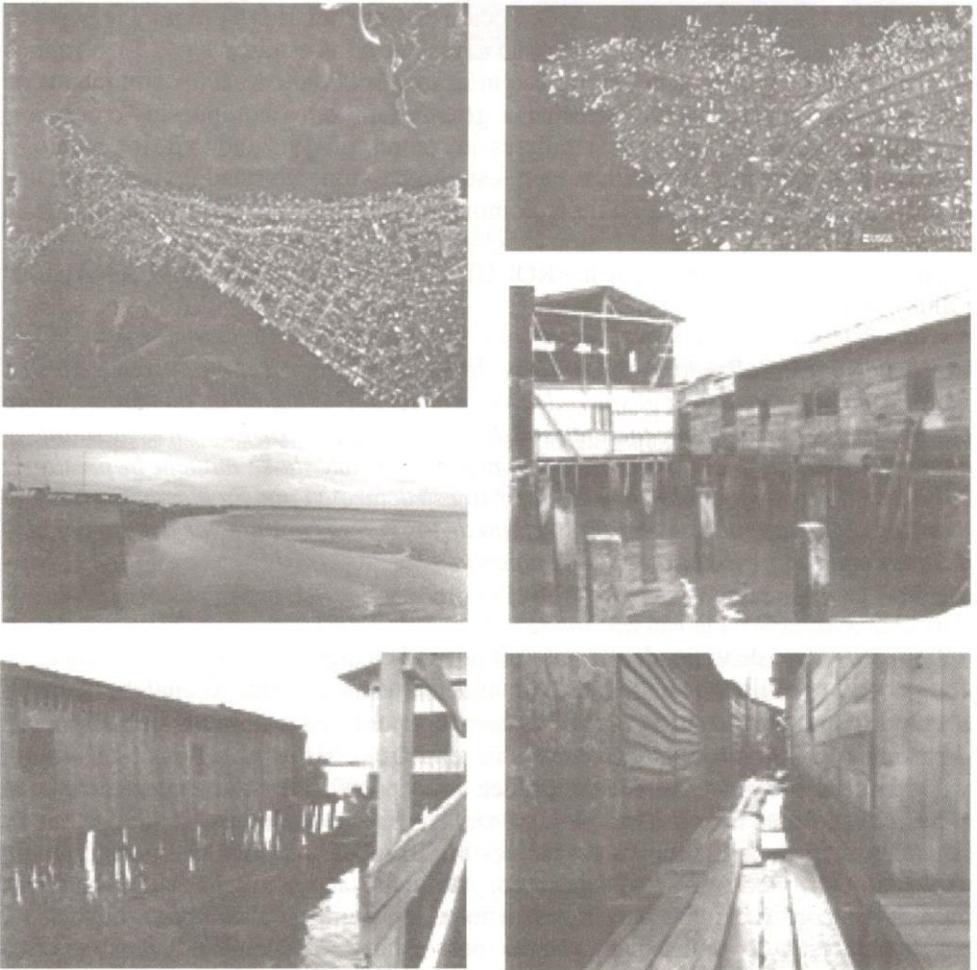


Fig. 11. Aspectos del área urbana de Tumaco. Con foto aérea para 1998 en la parte superior izquierda. Imagen ampliada de Google Earth © fechada en 2010, en la parte inferior izquierda y aspectos de los palafitos en el año 2010 en el centro y a la derecha. Fotos cortesía de la Antropóloga Diana Bernal Jiménez.

Para 2005, el área urbana de Tumaco (Figura 11) concentra cerca de 86.000 personas de acuerdo al censo de 2005 que se realizó en Colombia (DANE, 2008). Los índices sociales de acuerdo al estudio de vulnerabilidad de bienes de uso público construidos sobre palafitos que realizó la Procuraduría delegada para asuntos civiles del Instituto de Estudios del Ministerio Público a finales de la década de 2000 (PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN, 2008), muestra en comparación con la ciudad de Villavicencio aspectos bien distintos y bastantes complejos en términos de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales por parte de la población. Por un lado se muestra que la estratificación social no tiene comparación en cuanto a Villavicencio, ya que la población con más de una necesidad básica insatisfecha es del orden del 52 %, lo que indica que estas pertenecen de forma global al estrato 1, considerando las condiciones de hacinamiento. En términos de educación el porcentaje de población sin escolaridad es del 20,6%. Con la prestación del servicio de salud, el 80,32 % de la población está afiliada al Sistema de Selección de Beneficiarios a Programas Sociales - SISBEN, lo que significa una afiliación exclusiva a los estratos 1 y 2. En términos económicos, el 92,06% tiene un ingreso inferior a \$600.000 de 2008, con menos de esta cantidad se da sustento mensual a grupos familiares compuestos con 5 a 7 miembros en promedio. Grupos familiares que representan sin duda a de los estratos 1 y 2. Toda la población encuestada en el estudio de vulnerabilidad de bienes de uso público construidos sobre palafitos, comprendió aquella que para principio de la década de 2000 abarcan en extensión el 56% del área urbana (Peralta et al, 2003). Los palafitos según la descripción de la PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN (2008), son:

Construcciones realizadas sobre pilotes de madera, o concreto que sostienen una plataforma que estructura el suelo de la construcción, usualmente de madera junto con muros que comúnmente también son de madera. La forma de unión es mediante el método de encaje, puntillas o amarres, pero generalmente se maneja la presión o columnas de sostenimiento para sostener la estructura en pie. Su elevación sobre el nivel del agua permite que el flujo y reflujos de las mareas circule por debajo del piso de la vivienda, entre los pilotes que la soportan.

Para el área urbana en la isla de Tumaco el DANE (2008) estableció en un 80,71% el déficit cualitativo de vivienda. Lo anterior nos indica que la calidad de vivienda es en comparación a Villavicencio, mucho mayor en mala calidad, lo cual frente a un eventual sismo con $M \geq 8.8$, no aplica comparaciones en cuanto a escenario post - desastre y solo considerando para ello el efecto sísmico en sus suelos. La vulnerabilidad establecida por Velásquez et al. (2003) en lo concerniente a la exposición del área urbana a los efectos de un tsunami como impacto, inundaciones y licuación de los suelos, supera con creces el 80 % del área urbana en un grado de exposición que va de muy alto a extremo, ya que dicha área urbana se ubica en islas barrera con construcciones palafíticas en zona de bajamar y o en lugares cuyo suelo está compuesto de rellenos de esteros por sedimentos blandos o basuras. Los escenarios de vulnerabilidad a los efectos de un tsunami no solo para Tumaco sino para la bahía y regiones adyacentes de la costa los cuales son expuestos por OSSO (2003) y Peralta et al. (2003), surgen de la experiencia histórica que la ciudad de Tumaco ha tenido con anteriores tsunamis, como los de 1836, 1906, 1958 y 1979

(Figura 12). Las autoridades con estas experiencias han realizado convenios para ejecutar planes locales de emergencia, no solo para el municipio de Tumaco, sino para todo el litoral que corresponde al Departamento de Nariño (Meyer, 1997; OSSO, 2003; Gobernación de Nariño, 2011).

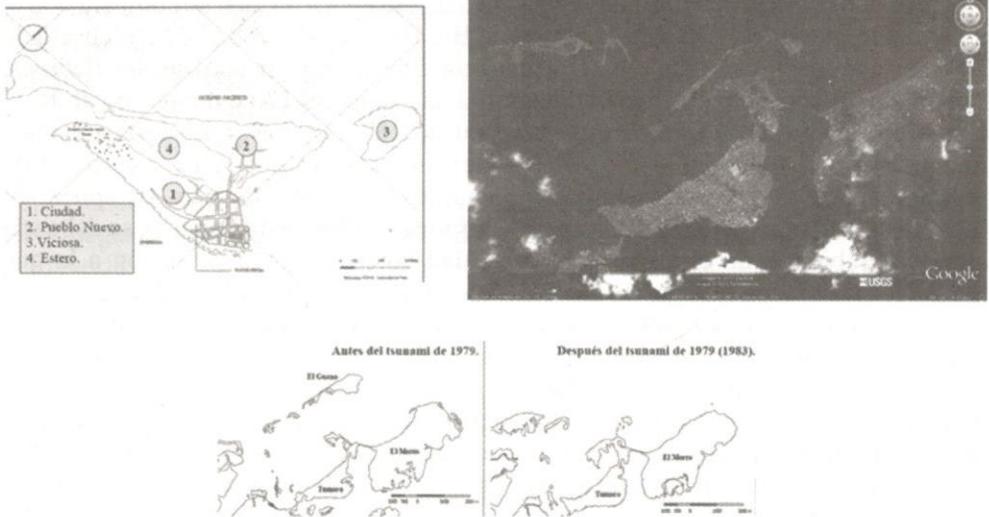


Fig. 12. Mapas e imagen que muestran los diversos cambios que han sufrido en más de 100 años las islas barrera que constituyen el actual área urbana de Tumaco. Arriba a la izquierda se observa cómo era la isla que corresponde a la actual ciudad durante el lapso 1906 – 1930. Abajo al centro se observa el antes y después del tsunami producido durante el sismo del 12 de diciembre de 1979, Finalmente arriba a la derecha el panorama actual en 2011 desde la imagen Google Earth©. Se hace obvio que antes del megasismo del 31 de enero de 1906, el panorama que mostraban estas islas era muy diferente al que observamos en estas figuras que fueron tomadas del OSSO (2003).

Los escenarios de riesgo derivados sobre todo de la amenaza por tsunami en la región de acuerdo a lo analizado aquí en términos de número de víctimas y pérdidas económicas, son directamente proporcionales a la magnitud del evento sísmico que se pueda presentar a nivel local en el área de la Bahía de Tumaco y su costa adyacente. Teniendo presente que cerca del 60% de la población más vulnerable a los efectos tanto sísmico como de tsunami se encuentran asentada en la zona de playas y esteros, lo cual los hace exponerse de manera directa frente al eventual impacto de un tsunami, es claro que un sismo con un tamaño de devastación como los acaecidos recientemente en la cuenca del Océano Índico el 26 de diciembre de 2004 con el megasismo de Andaman $M=9.1$, o el megasismo de Tohoku en Japón con $M=9.0$ del 11 de marzo de 2011, los cuales en ambos casos generaron olas de más 10 metros de altura, producirían en la Bahía de Tumaco y las costas adyacentes, la destrucción total de los centros urbanos y la mortandad de hasta más del 90 % de su población actual, lo cual sería comparable en letalidad al reciente sismo que sufrió la república de Haití el 12 de enero de 2010 con $M=7.0$. Las comparaciones son odiosas, sin embargo tanto para la Bahía de Tumaco, como para la región de la costa Pacífica colombiana, así como a

Colombia, el crecimiento desmesurado de la población ha sido alto en los últimos 20 años (DANE, 2008). Para el municipio de Tumaco se estima un crecimiento poblacional desde la pasada década de 1990 hasta el presente en más del 30%. De acuerdo a esto, los resultados de un eventual megasismo con la magnitud del acaecido en 1906 en la actualidad, no se compararía con las pérdidas de vidas que se presentaron en dicho año por efecto del tsunami del sismo de esa época, el cual se compara con el megasismo que sufrió Chile en la región de Bio Bio con $M = 8.8$ el 27 de febrero de 2010, el cual produjo un tsunami y que junto con éste produjo un total de 562 víctimas. Igualmente proporcionalmente a la magnitud, el sismo del 12 de diciembre de 1979 con $M = 8.2$, presentó oficialmente un total de 259 víctimas y 95 desaparecidos, mientras que el megasismo de 1906 produjo un total estimado de más de 1000 víctimas (NOAA, 2011), el cual fue un número muy grande para su época. El incremento del número de víctimas para la región de la Bahía de Tumaco, se debe a la alta vulnerabilidad de esta por la baja calidad de su vivienda, situación a la que inclusive no escapa ni siquiera la construcción en concreto, tal como lo establece OSSO (2003), y a sus condiciones de calidad de vida, para la cual se presenta más de una necesidad básica insatisfecha. Con este índice, tenemos que hablando solo de condiciones ambientales como la falta de servicios públicos básicos como el agua potable, de por sí ya establece para la población problemas de salubridad permanentes sobre todo en la población infantil que es la más numerosa (PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACION, 2008). Otro factor del aumento de víctimas en condiciones de post – desastre es la falta de infraestructura adecuada para afrontar dicha situación, ya que se presenta falencia en la atención oportuna de heridos graves y se generan condiciones de inseguridad muy altos.

CONCLUSIONES

Desde un punto de vista geológico, en el Piedemonte Llanero del centro de Colombia se han determinado que las fallas relacionadas al Sistema de fallas Algeciras – Uribe, la Falla Guaicaramo y la Falla Servitá, son potencialmente sismoactivas y el registro de sismicidad tanto histórico como instrumental lo confirman. Sin embargo, es claro que la falta de un monitoreo de la sismicidad local para esta región que incluye aquí al Piedemonte Llanero y Villavicencio, aumenta la incertidumbre sobre el alcance de su amenaza sísmica, lo que implica un aumento de la vulnerabilidad frente al fenómeno, ya que la carencia de una red sismológica local produce un desconocimiento de la movilidad de estas fallas, por lo que a la fecha no es posible visualizar el estado de la acumulación de los esfuerzos que permita cuantificar con certeza en donde se podrá presentar una liberación espontánea de estos en el corto o mediano plazo. Igualmente hemos encontrado que la ciudad de Villavicencio se está expandiendo sobre un subsuelo compuesto de sedimentos que en términos de tiempo geológico no superan en edad el millón de años, lo que hace que estos no estén consolidados. Dichos suelos derivan de la evolución de varios abanicos aluviales, que se desarrollaron mientras se levantaba el frente oriental de la cordillera Oriental, y es por esta razón, que el estudio sismogeotécnico preliminar realizado por INGEOMINAS determinó que para el área urbana de Villavicencio, se esperan altas aceleraciones espectrales y periodos fundamentales altos para sus suelos, que la colocan en una muy alta vulnerabilidad

sísmica. Con los aspectos sociales, se encuentra que Villavicencio adolece de un crecimiento de su población alto debido a entre otras causas, el desplazamiento forzado por el conflicto del narcotráfico. El sector gubernamental local, presenta negligencia administrativa, falta de políticas sobre inversión en la infraestructura, mal uso de los recursos públicos, no contemplación de políticas que incentiven la prevención de desastres y mitigación de efectos derivados por la amenaza sísmica en los planes de desarrollo y la no realización de un plan de ordenamiento territorial que cumpla con los requerimientos mínimos para contrarrestar los efectos de un sismo. Todo lo anterior, incrementa de manera dramática la vulnerabilidad de la población de Villavicencio frente a un eventual sismo fuerte.

Para Tumaco se observa una situación combinada de zona de alta vulnerabilidad tanto a los megasismos derivados de la zona de subducción o sismos de megathrust y a que la mayoría de su población se asienta sobre islas barrera en un delta influenciado por las mareas. En términos geológicos el tipo de suelos sobre los que se asienta la ciudad no garantizan ninguna seguridad frente a la ocurrencia de un evento sísmico local, para el cual se estiman magnitudes $M \geq 8.0$. La alta vulnerabilidad a los tsunamis, deja por sus condiciones geológicas, una alta vulnerabilidad para la población al impacto de estos, inundaciones y licuación de suelos. La población de Tumaco presenta en cerca de un 60 % más de una necesidad insatisfecha y pertenece cerca del 90 % de su población a los estratos 1 y 2. El déficit de calidad de vivienda en Tumaco es del orden del 80 % y el 56 % de su área urbana se ubica en la zona más vulnerable a los tsunamis, viviendo en vivienda palafítica. Los efectos combinados del sismo y el tsunami que afecte a la Bahía de Tumaco y su costa adyacente son directamente proporcionales a la magnitud que presente el sismo. En comparación a Villavicencio, en Tumaco se han realizado campañas de prevención y planes de emergencia buscando mitigar los efectos adversos sobre todo de un eventual tsunami, el cual bien puede deberse a un sismo local o lejano. Esto se debe a que en Tumaco a diferencia de Villavicencio, existe una memoria histórica de desastres asociados a estos fenómenos para los últimos 200 años, cosa que no ocurre en Villavicencio, el cual sufrió un sismo histórico con cerca de un siglo de antigüedad, cuya letalidad en comparación con el último evento sísmico que sufrió la región de la Bahía de Tumaco no es comparable. En la ocurrencia de un sismo local con magnitud mortífera par ambos casos, esto es $M \geq 6.5$ para Villavicencio, o $M \geq 8.0$ para Tumaco, la cuantía de pérdidas económicas será mucho mayor en Villavicencio que en Tumaco, pero para esta última el número de pérdida de vidas será mucho mayor, ya que el porcentaje de pérdida de vidas en Villavicencio no llegará al 5% del número de muertos que se presentase en la Bahía de Tumaco y su costa adyacente incluyendo a la vecina república de Ecuador. Esto último se deberá a las bajas condiciones de calidad de vida de los habitantes de Tumaco y a la severidad del sismo acompañado de tsunami en esta última región por las condiciones geológicas imperantes en la costa Pacífica colombo – ecuatoriana.

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento es para Carlos Alberto Vargas -Jiménez, Alexander Caneva y Andreas Kammer del Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la

Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ya que sin su apoyo y esfuerzo durante los últimos seis años, no habría sido posible conseguir los resultados que se han encontrado en cuanto a la vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Villavicencio, en los temas geológico y sismológico. Para Claudia Lucía Mojica Sánchez de la Corporación Universitaria del Meta y Tulio Aymerich Hernández Hernández de la Regional del Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” de Villavicencio, por su apoyo y esfuerzo durante también estos últimos seis años en el tema socio-económico de Villavicencio, y en los parámetros de planificación ambiental de la ciudad. Para la antropóloga Diana Bernal Jiménez de la Fundación Nueva Herencia de Villavicencio, por su apoyo en el tema social de Tumaco. Para la Ecóloga Alejandra Bernal Jiménez de también de la Fundación Nueva Herencia, por su apoyo con la socialización de gestión de riesgo para la ciudad de Villavicencio. Para el ingeniero civil egresado de la Universidad del Meta Johann Ardila Escobar quien lidera la Fundación Kinkajú de Villavicencio, por su apoyo en la labor de gestión de riesgo para la ciudad de Villavicencio, y para la Vicerrectoría de Investigaciones de Corporación Universitaria del Meta de Villavicencio, por su apoyo al autor desde 2006 hasta la fecha para conseguir realizar esta investigación con el grupo de investigación “Estudios sobre riesgo sísmico y amenazas naturales del Piedemonte llanero”. Por último hay que anotar que parte de éste trabajo fue presentado en el *III Coloquio Evaluación de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgos para la Reducción de Desastres* el cual se desarrolló con la *VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo* que se realizó en La Habana, Cuba, entre el 4 y el 8 de julio de 2011.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aspden, J. (1984). The geology of the Western Cordillera, Department of Valle, Colombia, (sheets 269, 278, 279, 280 and 299). Cali: INGEOMINAS - British Geological Survey, report N° 7. 61p.

Cediel, F. (2010). Cuenca Tumaco, Open Round Colombia 2010. Agencia Nacional de Hidrocarburos.

http://www.anh.gov.co/media/presentaciones_open_round_2010/Cuenca_Tumaco_PhD_Fa bio_Cediel.pdf (Último acceso 12-09-2011)

CENAC. (2009). Boletín Estadístico, Contexto Sectorial Villavicencio – Meta. Bogotá D. C.: Centro de Estudios de la Construcción y el Desarrollo Urbano y Regional - CENAC <http://www.cenac.org.co> (Último acceso 12-09-2011)

CERESIS. (1985). *Terremotos destructivos en América del Sur (1530 - 1894)*. Programa para la mitigación de los efectos de los terremotos en la región andina (Proyecto SISRA), Centro Regional de Sismología para América del Sur - CERESIS. Volumen 10, 333 p. http://www.ceresis.org/Publicaciones_SISRA/SISRA%20VOLUME%202010.pdf (Último acceso 12-09-2011)

CERESIS. (2011). Consulta al Catálogo de Hipocentros (1520 - 1991). Centro Regional de Sismología para América del Sur - CERESIS http://www.ceresis.org/portal/catal_hipo.php (Último acceso 12-09-2011)

Chicangana, G. (2005). Estudio del Sistema de Fallas Romeral (0,5 – 11,5 ° N), a partir de una caracterización sismotectónica regional. Tesis de Maestría en Ciencias – Geología, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - UNCB-, Bogotá D.C. 191p, 6 Anexos. (No publicada).

Chicangana, G. (2009). *La Amenaza sísmica de Villavicencio y el centro de Colombia. Villavicencio, Colombia*. Corporación Universitaria del Meta, Punto Gráfico, 110 p.

Chicangana, G. y Kammer, A. (2011). Evolución tectónica de la cordillera Oriental de Colombia. Desde la apertura del océano Iapeto hasta la conformación de la Pangea: Una visión preliminar. Primera parte: Aspectos geológicos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia. (En prensa).

Chicangana, G., Kammer, A., Vargas – Jiménez, C. A. y Caneva, R, A. (2011). La vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Villavicencio, Colombia: Aspectos geológicos, sismológicos y sociales. *Revista Nova*, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Colombia. (En prensa).

Chicangana, G., Vargas - Jiménez, C.A., Kammer, A., Hernández, H, T.A. y Ochoa, G., L. H. (2007). Caracterización Sismotectónica Regional Preliminar de un sector del Piedemonte Llanero colombiano: Corredor San Juan de Arama – Cumaral, Meta. *Boletín de Geología - UIS*, 29 (1): 61 – 74.

Chicangana, G., Vargas - Jiménez, C. A., Caneva, A., Mojica - Sánchez, C. L., Hernández - Hernandez, T. A., Ardila- Escobar, J. y Bernal - Jiménez, A. (2010a). About necessity of a local seismic network: the seismic hazard of the Villavicencio city, Colombia. AGU Meeting of the Americas. http://www.ig.utexas.edu/jsg/Americas_2010/Vargas_2.pdf (Último acceso 12 -09 –2011)

Chicangana, G., Vargas - Jiménez, C. A., Caneva, A., Hernández - Hernandez, T. A., Mojica - Sánchez, C. L., Ardila- Escobar, J. y Bernal - Jiménez, A. (2010 b). La sociedad frente a la gestión del riesgo: Caso sobre la amenaza sísmica en la ciudad de Villavicencio. *Boletín de Geología - UIS*, 32 (1): 125-141.

Collot, J - Y., Marcailliu, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, Ph., Graindorge, D., Gutscher, M - A. & Spence, G. (2004). Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador – southwest Colombia margin. *Journal of Geophysical Research*, 109: B11103, doi:10.1029/2004JB003060

Correa, I., González, J. L. & Rodríguez, C. (1988). Geomorfología general y sedimentología de la bahía de Tumaco. V Seminario Nacional de Ciencias del Mar, Memorias, 233- 239.

DANE. (2008). *Censo General 2005, Nivel Nacional*. Bogotá D. C.: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <http://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf> (Último acceso 12 -09 – 2011)

Dimaté, C., Rivera, L. & Cisternas, A. (2005). Re-visiting large historical earthquakes in the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of Seismology*, 9: 1 -22.

Dimaté, C., Taboada, A., Rivera L., Delouis, B., Osorio, A., Jiménez E., Fuenzalida, A., Cisternas, A. & Gómez, I. (2003). The 19 January 1995 Tauramena (Colombia) earthquake: geometry and stress regime. *Tectonophysics*, 363: 159-180.

Gobernación de Nariño (2011). *Plan Local de Emergencia de Tumaco*. 74 p.
http://www.narino.gov.co/index.php?option=com_remository&Itemid=232&func=startdown&id=160 (Último acceso 12-09-2011)

Grosse, E. (1935). *Acerca de la Geología del Sur de Colombia II: Patía y Nariño*. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales de Colombia, 1917 – 1933: Ministerio de Industrias, Biblioteca del Departamento de Minas y Petróleo, Bogotá, III, 139-231.

Gutiérrez, H. (1948). *Informe geológico sobre la isla del Morro, Bahía de Tumaco (Departamento de Nariño)*. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales de Colombia: Ministerio de Industrias, Biblioteca del Departamento de Minas y Petróleo, Bogotá, VIII, 148 – 173.

Herd, D., Meyer, H., Arango, J.L. & Person, W. (1981). The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 december 1979'. *Science*, 211: 4481, 441-445.

INGEOMINAS (2007a). Mapa Geológico de Colombia. Escala: 1: 1000000. Bogotá D.C., INGEOMINAS.

INGEOMINAS (2007 b). El sismo de Gorgona del 9 de septiembre de 2007, aspectos sismológicos y evaluación de efectos. Bogotá D.C. INGEOMINAS – Red Sismológica Nacional de Colombia. 20 p.

INGEOMINAS (2008a). Boletín de Sismos 1993 – 2007. Bogotá D.C. INGEOMINAS – Red Sismológica Nacional de Colombia.

INGEOMINAS (2010). Boletín de Sismos 1993 – 2009. Bogotá D.C. INGEOMINAS – Red Sismológica Nacional de Colombia.

IRIS (2011 a). 1967 Huila (Colombia) Earthquake Archive. *Incorporated Research Institutions for Seismology*. <http://www.iris.edu/seismo/quakes/1967huila/> (Último acceso 12-09-2011)

IRIS (2011 b). Handbook: Word – Wide Standard Seismograph Network, April 1964. Acoustic and Seismics Laboratory, Institute of Science and Technology, The University of Michigan, Ann Harbor, Michigan, 500 p. *Incorporated Research Institutions for Seismology*. <http://www.iris.edu/seismo/info/stations/WWSSN1964.pdf> (Último acceso 12-09-2011)

Kerr, A. C., Tarney, J., Kempton, P. D., Spadea, P., Nivia, A., Marriner, G. F. & Duncan, R. A. (2002 a). Pervasive mantle plume head heterogeneity: Evidence from the late Cretaceous Caribbean – Colombian oceanic plateau. *Journal Geophysical Research*, 107: B7, 10.1029/2001JB000790, 2002.

Maya, M. (2001). *Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia*. INGEOMINAS, I-2426, 57 p.

Martínez, J.O., González, J. L., Pilkey, O. H. & Neal, W. J. (1995). Tropical barrier islands of Colombia's pacific coast. *Journal of Coastal Research*, 11 (2): 432 – 453.

Meyer, H - G. (1997). *Estado actual del conocimiento y control de riesgos causados por terremoto en la ciudad de Tumaco (Nariño)*. Informe presentado al proyecto Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Tumaco de Plan Pacífico (DNP) y "Asesorías Municipales Ltda." 20 p.

http://www.osso.org.co/docu/proyectos/grupo-osso/1997/estado/asesorias_municipales.pdf (Último acceso 12-09-2011)

Mora, A. (2007). Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat) in der Wissenschaftsdisziplin Geologie eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam, 133 p.

Nivia, A. (1996). El Complejo Estructural Dagua, Registro de Deformación de la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental en un Prisma Acrecionario. VII Congreso Colombiano de Geología, Memorias, 3, 54-67.

Nivia, A., Pérez, C., Sepulveda, J. (2003). Geología y Geomorfología de la Plancha 383 Tumaco. Mapa, escala 1:100000 y Memoria, 39 p. Bogotá D.C. INGEOMINAS.

NOAA. (2011). Comments about the 1906 Colombia – Ecuador Tsunami.

http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?eq_0=2748&t=101650&s=18&d=99,91,95,93&nd=display (Último acceso 12-09-2011)

Ojeda, J. y Alvarado. C. (2001). Zonificación Sismogeotécnica Indicativa de la Ciudad de Villavicencio. En: Zonificación integral por amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio - Meta. INGEOMINAS – Alcaldía de Villavicencio, Convenio interadministrativo 009/2000. Volumen II, 178 p.

OSSO (2003). *Proyecto de Vulnerabilidad Física por Terremoto y sus fenómenos asociados en poblaciones del Litoral de Nariño*. Convenio de cooperación N° 1005-04-408/2002 entre el Fondo Nacional De Calamidades y la Corporación Observatorio Sismológico del Sur Occidente. Ministerio del Interior, Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc12427/doc12427> (Último acceso 12-09-2011)

Page, W. D. (1986). *Seismic geology and seismicity of northwestern Colombia*. San Francisco. Woodard - Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda. Medellín, Colombia. 200 p.

Pararas-Carayannis, G. (2000). El terremoto y el tsunami del 12 de diciembre de 1979 en Colombia. En: The Tsunami Page of Dr. George Pararas – Carayannis.

<http://www.drgeorgepc.com/Tsunami1979ColombiaSpan.html> (Último acceso 12-09-2011)

París, Gabriel., Michael N. Machette, Richard L. Dart, and Kathleen M. Haller. (2000). *Database and Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions*. Denver: US Geological Survey (USGS). Open – File Report 00 – 0284.

<http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0284/ofr-00-0284.pdf> (Último acceso 12-09-2011)

Parra, M. (2008). Cenozoic foreland-basin evolution in the northern Andes: insights from thermochronology and basin analysis in the Eastern Cordillera, Colombia. *Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)* in der Wissenschaftsdisziplin Geologie, Institut für Geowissenschaften, Mathematisch-

Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Potsdam. 121 p.

http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2009/2933/pdf/parra_diss.pdf (Último acceso 12 -09 -2011)

Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Strecker, M. R., Sobel, E.R., Quiroz, L., Rueda, M. & Torres, V. (2009). Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *GSA Bulletin*, 121: 780–800. doi:10.1130/B26257.1

Pedraza, G. P. (2005). Geometría de la subducción en el suroeste de Colombia, implicaciones tectónicas. Tesis de Maestría en Ciencias – Geofísica, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - UNCB-, Bogotá D.C. 97p, 2 Anexos. (No publicada).

Peralta, H., Arellano, J., Leusson, A., Quiñones, J., Camacho, R., Llanos, L., Mendoza, J., Meyer, H. y Velasquez, A. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad física por terremoto y sus fenómenos asociados en poblaciones del litoral de Nariño.

www.osso.org.co/docu/congresos/2003/congreso_Ing_sismica.pdf (Último acceso 12 - 09 - 2011)

PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN (2008). *Amenazas Naturales. Construcciones palafíticas sobre bienes de uso público*. Procuraduría General de la Nación, Procuraduría delegada para asuntos civiles, Instituto de Estudios del Ministerio Público, Bogotá D. C., octubre de 2008, 328 p.

Ramírez, J. E. (1975). *La Historia de los Terremotos en Colombia*. Bogotá, Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”, Segunda edición, 250 p.

Rudolph, E. y Szirtes, S. (1911). El terremoto colombiano del 31 de enero de 1906. *Gerland Beitrage fur Geophysik*. 11, 1, Leipsig. *Publicaciones ocasionales del OSSO, N° 1. OSSO - Universidad del Valle*. 34 p.

Sarabia, G, A. M., Cifuentes, A, H. G. y Robertson, K. (2010). Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y en 1917 en el centro de Colombia. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, 19: 153-162

Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T. & Mara, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal South American Earth Sciences*, 15: 157–171.

Turkstra, J., 1998. *Urban Development and Geographical Information, Spatial and temporal patterns of urban development and land values using integrated geo – data, Villavicencio, Colombia*. ITC Publication Series. Enschede, Netherlands. 60, 268 p.

Uribe, U, J., (1994). *Memorias de Julian Uribe Uribe (1907 - 1922)*. Historia Colombiana, Colección Bibliográfica del Banco de la Republica. 623 p.

USGS – NEIC (2011). Historic Earthquakes: Arica, Peru (now Chile) 1868 August 13 21:30 UTC Magnitude 9.0.

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1868_08_13.php (Último acceso 12 -09 -2011)

Van der Hammen, T. (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y

tectogénesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico, Bogotá*: Servicio Geológico Nacional, 6(1-3): 67-128.

Velasquez, A., Meyer, H. y Peralta, H. (2004). *Zonificación de amenazas por tsunami y licuación en el litoral de Nariño*.

http://www.osso.org.co/docu/congresos/2004/zonificacion_litoral.pdf (Último acceso 12 -09 -2011)

White, S.M., Trenkamp, R. & Kellogg, J.N., 2003. Recent crustal deformation and the earthquake cycle along the Ecuador - Colombia subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 6853: 1-12.

