

1. MARCO GENERAL

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Cali, una ciudad con cerca de 2'000.000 de habitantes, (DANE, 1996) se estableció y creció durante 400 años sobre terrenos del cono aluvial del río Cali, conformado por materiales granulares parcialmente cementados y con niveles freáticos de varios metros de profundidad (OSSO para Gases de Occidente, 1996). En los últimos años el crecimiento urbanístico la ha extendido hacia terrenos mas bajos, hasta hace pocos años inundables, y hacia terrenos pendientes, potencialmente inestables, sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental.

El comportamiento dinámico de los terrenos varía de acuerdo con sus propiedades elásticas, la geometría - espesor y forma de los depósitos sobre un basamento rocoso - y otros factores como la granulometría y el nivel freático (p. ej. Sauter, 1989; Sarria, 1996).

Algunos terrenos presentan un fenómeno conocido como “efecto de sitio” o efecto sísmico local, asociado con la amplificación selectiva de las ondas y la impedancia, lo que implica que se presenten mayores intensidades y por lo tanto mayores sollicitaciones sísmicas en las edificaciones emplazadas.

Evaluar el comportamiento sísmico de los terrenos en un entorno urbano es, hoy en día, esencial para aspectos de reglamentación urbana, y para los parámetros específicos de diseño y construcción sismorresistente. Incluso la legislación así lo estipula para ciudades colombianas (AIS, 1998). El objetivo de estas evaluaciones es el de dividir la ciudad en microzonas con respuesta sísmica homogénea (microzonificación).

Este trabajo está orientado hacia aportar elementos para la definición y caracterización de una microzona de Cali. Se trata de los depósitos de suelo en el área del río Cañaveralejo, preliminarmente identificados como una microzona con base en información geomorfológica, geotécnica y evidencia empírica del comportamiento anómalo con respecto a unidades geológicas cercanas, es decir, como una zona diferenciable por tener “efecto de sitio” particular.

Los indicadores que condujeron a proponer los terrenos como una microzona fueron de tipo geoambiental y macrosísmico.

Geoambientales:

1. Previo a la urbanización de los terrenos, presencia de humedales y áreas pantanosas; establecida con base en revisión de documentos históricos, fotografías aéreas de los años 1950-1960 y testimonios de personas que conocieron los terrenos antes de su urbanización.
2. Inundabilidad del área en inviernos fuertes, identificada con base en documentación histórica y testimonios, complementado con características geométricas de la cuenca, que le dan menores tiempos de concentración de la escorrentía y mayor precipitación anual, con respecto a cuencas aledañas (Materón & Carvajal, 1997).
3. Depósitos aluviales superficiales espesos, de origen cuaternario, compuestos principalmente por limos arcillosos (MH) intercalados con capas de arcillas (CH), arenas gruesas y, en profundidad, con gravas.

4. Los ensayos de penetración estándar, SPT, dan valores comparativamente bajos, entre 12 y 18 golpes/pie (OSSO para Gases de Occidente, 1996), que pueden alcanzar en estratos mas profundos 46 golpes/pie (Villafañe, 1995).

Macrosísmicos:

1. Concentración de daños en edificios asociada a sismos recientes como los del 23 de noviembre de 1979, 19 de noviembre de 1991, 18 de octubre de 1992, 6 de junio de 1994 y 8 de febrero de 1995.
2. Testimonios de vibraciones inducidas, producidas por cargas dinámicas generadas durante conciertos y espectáculos en la Plaza de Toros y en el Coliseo El Pueblo. Las vibraciones fueron sentidas por personas en edificaciones cercanas, hicieron vibrar objetos y produjeron sensación de incomodidad.

Estas observaciones sugieren que los depósitos del Cañaveralejo tienen propiedades geodinámicas que inducen amplificación de ciertos periodos de ondas incidentes - excitación sísmica - por lo cual se pensó en primeria instancia que podía existir alguna relación entre los reportes de macrosísmica y los reportes de vibraciones inducidas.

Por el conjunto de elementos o factores previamente expuestos se postula que los depósitos de Cañaveralejo corresponden con una microzona sísmica.

Por otra parte, el estado actual del conocimiento y desarrollo tecnológico ponen a disposición diversas metodologías para la evaluación de propiedades mecánicas y dinámicas de los suelos, incluyendo acceso relativamente fácil a bajo costo, a tecnologías y herramientas para ensayos *in situ*; por ejemplo adquisición y procesamiento de señales de microtrepidaciones, de refracción sísmica.

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en el Sur de Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca.

Corresponde a la depósitos sedimentarios del río Cañaveralejo y sus alrededores; limitados al Occidente por el piedemonte de la Cordillera Occidental, por el Oriente por la llanura aluvial del río Cauca, al Norte por el cono del río Cali y al Sur por el cono del río Meléndez.

La zona de estudio se delimitó rectangularmente, de tal manera que cubriera parte de los depósitos del Cañaveralejo con evidencias geoambientales y empíricas para postularlos como una microzona, a la vez que incluyera áreas adyacentes de otras unidades geológicas superficiales. La topografía del área en los depósitos sedimentarios de interés es suavemente inclinada hacia el E, entre las cotas 980 y 955 msnm.

La zona está limitada al Norte por el cruce de la Carrera 34 con la Autopista Sur, al Sur por la Carrera 66, al Oriente por la Calle 14 y al Occidente por el piedemonte de la Cordillera e inicio de la cuenca del río Cañaveralejo (Figura 1).

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para la descripción, delimitación y modelamiento de efectos de sitio y microzonas no es suficiente la información geológica, geotécnica o empírica de la cual hasta el momento se dispone para la zona de estudio y para la mayoría de la ciudad. El consenso y la práctica científica e ingenieril actual indican la necesidad de obtener información adicional sobre las propiedades elásticas de los terrenos, generalmente con métodos geofísicos (velocidades de ondas S y P, periodos, cálculo de los parámetros elásticos, periodo naturales de vibración), hasta ahora no disponibles en la zona de estudio.

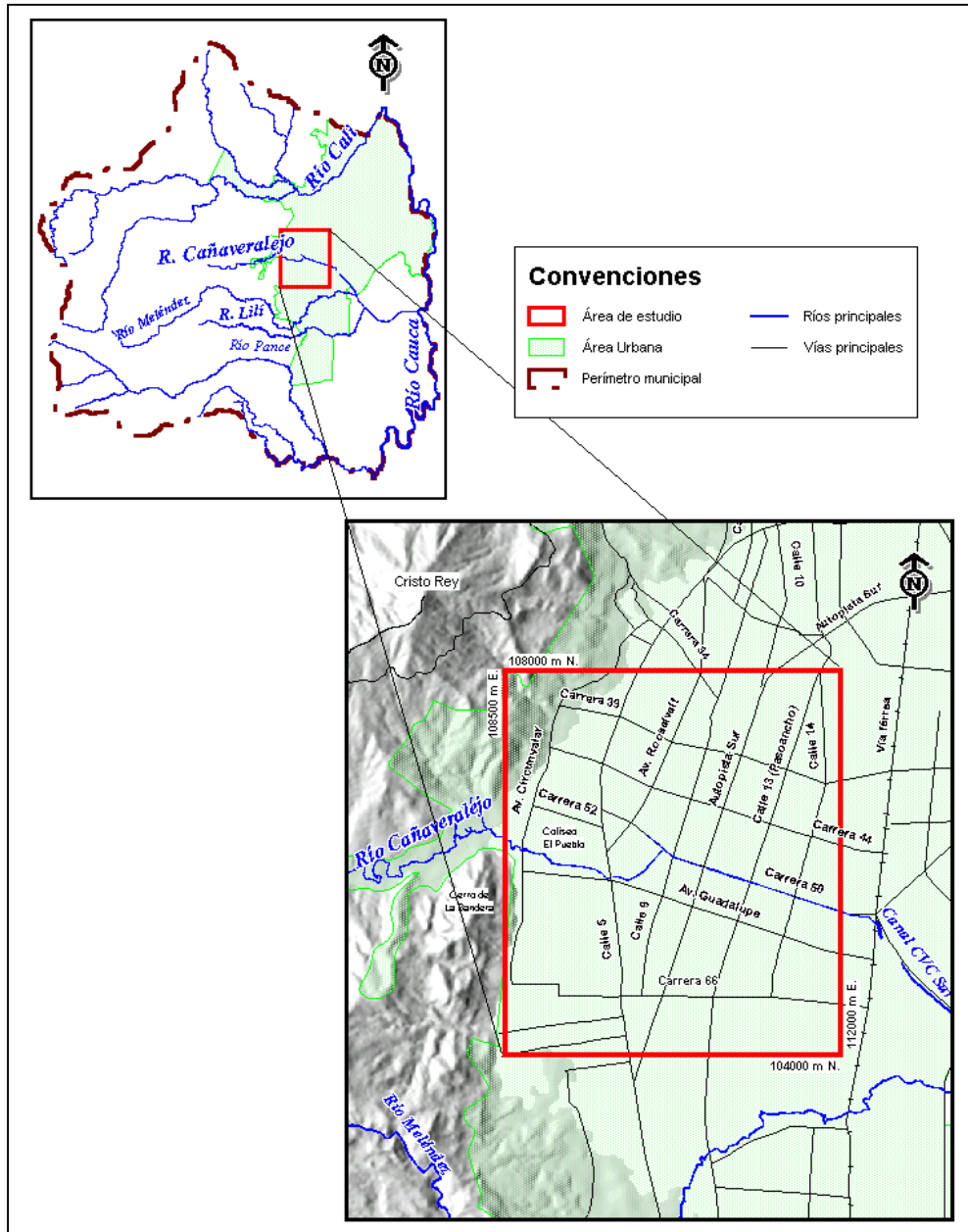


Figura 1. Localización del área de estudio.

El movimiento del terreno producido por un sismo en un lugar específico se puede dividir en tres componentes: fuente, trayectoria de las ondas y efecto de sitio (p. ej. Field, 2001).

Según las leyes de atenuación, la intensidad del movimiento disminuye con la distancia del epicentro, sin embargo, a cualquier distancia del epicentro, las ondas sísmicas pueden amplificarse por el fenómeno “efecto de sitio”, que corresponde a la fase final de trayectoria de las ondas, cuando se aproximan a la superficie y entran en contacto con depósitos de suelos (p. ej. Sauter, 1989).

La fuerte influencia de las condiciones de sitio en los daños ocasionados por terremotos ha sido reconocida desde hace más de 200 años (Drake, 1815, 82¹; Ladoucette, 1848²). Por ejemplo, después del terremoto de Calabria, 1783 en Italia, una comisión especial encontró que los edificios sobre llanuras aluviales habían sufrido más daños que aquellos sobre roca (Tiedemann, 1992, 139). Pero es en las últimas décadas que el problema empezó a ser tenido en cuenta en los estudios de evaluación de la amenaza sísmica y en la planificación urbana. Esto se debe a la creciente evidencia empírica e instrumental acumulada en diversos terremotos importantes. Entre los casos más recientes están los efectos diferenciables y dramáticos, en términos de daños por efecto de sitio, en Chile en 1960, Alaska y Niigata en 1964, Ciudad de México en 1985, Loma Prieta 1989, Northridge 1994 y Kobe 1995. En Colombia también se ha documentado el “efecto de sitio” con base en registros instrumentales, por ejemplo, el sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999 generó en suelo aceleraciones de 0,29 g con registros en roca de 0,05g (según CARDER, 1999). La norma sismorresistente colombiana (NSR-98) incluye explícitamente cuantificar el efecto local a través del coeficiente de sitio, el cual depende de la conformación del suelo, la profundidad y la velocidad de propagación de la onda S.

¹ En Field *et al*, 2001

² En Cotton *et al*, 1999.

Con base en centenares de registros y reportes de efecto de sitio Tiedemann (1992, 145) concluye que los valores de intensidad para depósitos aluviales se pueden incrementar hasta tres grados en la escala de Mercalli Modificada. Seed *et al* (1976), retomado en la literatura reciente (p. ej. Dobry *et al*, 2000), presenta el “efecto de sitio” comparando los cocientes espectrales de aceleración registrados en diversos tipos de suelo y roca (Figura 2). Con base en este tipo de resultados los códigos sismorresistentes modernos incluyen diferentes clasificaciones de suelos y espectros de respuesta para fines de ingeniería.

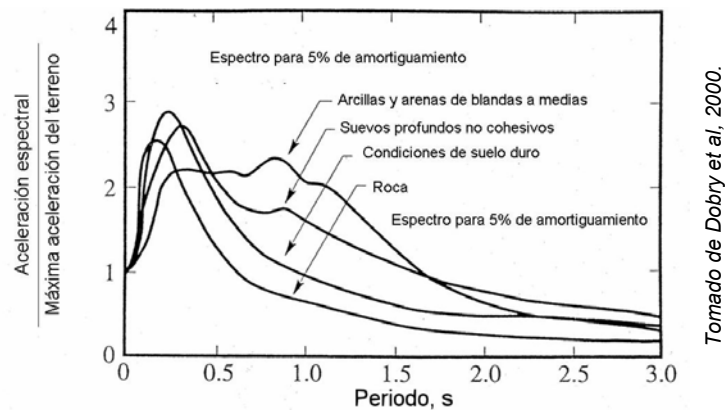


Figura 2. Espectro de aceleraciones promedio para diferentes condiciones.

La anterior documentación muestra que se ha reconocido claramente que los daños causados por los sismos no solo son función de la magnitud del sismo y de la distancia epicentral, sino que dependiendo de las características del subsuelo y de la topografía del terreno – y del basamento – las ondas provenientes del sismo pueden ser amplificadas, produciendo mayores intensidades.

Al considerar los efectos sísmicos locales es necesario distinguir entre dos tipos de amplificación: (1) La ley de conservación de la energía exige que el desplazamiento de las partículas asociado con ondas sísmicas que se propagan en un cuerpo sólido, debe incrementarse al pasar de un medio de alta velocidad de propagación de las ondas (por ejemplo roca) a un medio de baja velocidad de propagación (por ejemplo suelo). Se ha demostrado teóricamente (p. ej. Sauter,

1989) que la amplitud asociada con las ondas sísmicas aumenta – se amplifica - al pasar de un lecho rocoso (alta velocidad) a través de un estrato de sedimentos blandos (baja velocidad); el aumento depende de la relación de las velocidades de propagación en los dos medios. (2) El otro tipo de amplificación, reconocida ampliamente en la literatura, amplificación por resonancia, resultado de la multi-reflexión de las ondas dentro de capas de velocidad bajas cerca de la superficie que junto con el fenómeno de interferencia constructiva de las ondas contribuyen a que se presenten mayores amplificaciones en superficie (p. ej. Joyner & Boore, 1988).

Las variables básicas que describen y contribuyen a la determinación del “efecto de sitio” reconocidas en la literatura, se pueden clasificar en las siguientes dos categorías (p. ej. Sauter, 1989; Aki, 1988; Field, 2001):

- (1) Conformación del subsuelo. Densidad de los suelos, velocidad de la onda S, amortiguamiento, espesor de los depósitos no consolidados, profundidad a basamento y geometría (geometría de las cuencas), contraste de velocidades entre basamento y el paquete de suelos, periodo de vibración.
- (2) Forma del terreno. Geometría de las asperezas topográficas, posición del sitio en el valle, ancho del valle. Estas variables se relacionan directamente con características de la fuente: ángulo de incidencia, tipo de ondas sísmica, longitud de onda.

Según sus características todos estos factores pueden contribuir o no, a la amplificación selectiva de las ondas en los depósitos sedimentarios con respecto a basamento.

En la primera categoría, conformación del subsuelo, existen una diversidad de parámetros y factores que pueden influir en los movimientos del terreno en superficie y en la definición del efecto de sitio, pero los costos y tiempos que implicaría tener información suficiente y confiable de cada uno de ellos hace

necesario la selección de parámetros que mejor describan la física del efecto de sitio, caracterizan el subsuelo y provean información útil para la construcción de edificaciones.

Según presentó Aki (1988), el parámetro que más contribuye al efecto de sitio es la velocidad superficial de la onda S. Recientemente algunos autores (p. ej Borchardt, 1993, 1994; Borchardt & Glassmoyer, 1995) han encontrado que los primeros 30 metros de profundidad de suelo, son suficientes para estudiar el movimiento de terreno en superficie a través de la medición de la velocidad de onda S (ver discusión en Field *et al*, 2001), de tal manera que las diferentes zonas con igual respuesta sísmica son definidas con base en este parámetro, es decir la velocidad promedio en los primeros 30 metros, C_{30} .

No obstante, investigaciones realizadas por Rodríguez-Marek *et al.* (2000) estipulan que la caracterización de los suelos solamente por C_{30} no es suficiente y que es necesario incluir como parámetros principales la rigidez de los depósitos sedimentarios y la profundidad a basamento, o la profundidad a un cambio significativo de la impedancia³; y como parámetros secundarios la cohesividad de los suelos, y la edad geológica.

La revisión de estos dos artículos recientes muestra que la discusión, sobre los factores que controlan el efecto de sitio (sin tener en cuenta los otros efectos de topografía, direccionalidad y geometría de la cuenca sedimentaria), está abierta. Se debe tener en cuenta que cada uno de los resultados presentados se obtuvieron de múltiples registros de aceleraciones en roca y suelo de pocos sismos (México, 1985; Loma Prieta, 1989; Northridge, 1994).

El periodo de vibración natural de los suelos también puede ser una variable importante cuando coincide con el periodo de vibración de los edificios, como se

³ Es una medida de la resistencia a la propagación de las ondas. Es el producto de la densidad y velocidad (p. ej. Aki, 1988)

ilustró para el sismo de 1967 en Caracas (Rodríguez-Marek, *et al* 2000), o cuando coincide con el periodo de vibración de las ondas S del sismo (p. ej. Sauter, 1989). La amplificación de los movimientos del terreno en superficie está significativamente afectada por el periodo natural de vibración del sitio (Rodríguez-Marek *et al*, 2000). De hecho la máxima amplificación teórica en suelo (cociente entre aceleración pico en suelo y en roca) ocurre en la frecuencia de resonancia (no amortiguada) del suelo para las ondas S y tiene un valor alrededor de $F = C_s/4H$ (p. ej. Dobry *et al*, 2000).

Ha sido reconocido recientemente que además de los efectos no lineales del suelo como la licuación y la falla del terreno, los suelos pueden presentar un comportamiento no lineal (p. ej. Field *et al*. 1997 según Field *et al*, 2001) bajo características específicas del movimiento del terreno en roca (duración, frecuencia, aceleración) y de los depósitos de suelo. En estos casos los suelos no se comportan siguiendo la Ley de Hooke (Capítulo 3). Según Rodríguez-Marek (2000), el efecto de no linealidad está relacionado con el índice de plasticidad, y factores como el grado de cementación y la edad geológica. Esto es todavía un tema de investigación sobre el cual no hay consenso científico. Una síntesis del estado de la discusión se presenta en Field *et al* (2001).

Las preguntas planteadas en este proyecto para lograr una aproximación al entendimiento del fenómeno “efecto de sitio” en el cono de Cañaveralejo son:

- ¿Qué tipo de proceso hidrogeológico podía haber creado en el Cono depósitos significativamente diferentes a los de los demás conos fluviales del área urbana de Cali?
- ¿Cuáles son las condiciones estructurales y geomecánicas relevantes de los suelos del Cono?
- ¿Cuáles son las componentes espectrales – frecuencias o períodos – transmitidos o amplificados por los suelos del Cono?

- ¿Qué condiciones estructurales o materiales pueden explicar la magnitud del fenómeno de las vibraciones inducidas en el Cono?
- ¿Los resultados de las preguntas anteriores son suficientes y robustos para definir los depósitos del área de estudio como una microzona?

Una aproximación a las respuestas de estas preguntas sería un aporte en relación con la práctica normal de la geotecnia en la región, ya que además de medir parámetros geofísicos y dinámicos en un sitio, también quiere aportar a la solución del problema buscando construir un modelo cuantitativo y explicativo que relacione los efectos observados con sus causas geológicas y geotécnicas, y que provea eventualmente parámetros para la planificación y el diseño.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de este proyecto estuvieron enfocados hacia abarcar y entender el problema, resolviendo las preguntas planteadas, hasta donde las limitaciones de disponibilidad de tiempo, datos, instrumentos y presupuesto lo permitieron.

Las limitaciones son inherentes a cada metodología utilizada (refracción y reflexión sísmica, mediciones de microtrepidaciones, mediciones de vibraciones inducidas), pero también a la cobertura urbana (pocos lugares adecuados para tendidos de refracción de larga cobertura), cantidad de energía para ensayos (imposibilidad de utilizar explosivos), e integración de equipos de medición.

1.5 OBJETIVOS

General.

- Contribuir al entendimiento del comportamiento de las ondas sísmicas en los depósitos del río Cañaveralejo.

Específicos.

- Medición y evaluación de características relativas de periodo y amplificación de ondas, mediante registro y análisis de microtrepidaciones.
- Medición y evaluación de parámetros geofísicos y dinámicos de los suelos: velocidad de ondas de compresión y de cortante (P y S).
- Medición de la profundidad a basamento.
- Elaboración de un modelo de los depósitos en el área de Cañaveralejo, que explique la manera como transmite ondas sísmicas a partir de los datos históricos, geológicos, geotécnicos, topográficos, y geofísicos, mediante recopilación, generación, análisis y síntesis de información.