

Caracterización dinámica preliminar de suelos de San Juan de Pasto mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura

San Juan de Pasto Dynamic Preliminary's Ground Characterization, Using the Micro Trepidation Method Proposed by Nakamura

Fecha de recepción: 30 de marzo de 2009
Fecha de aprobación: 15 de septiembre de 2009

Hugo Edmundo Coral Moncayo*
Andrés Geovanny Hillón Sarmiento**
Edith Lorena Narváez Mera***

Resumen

Teniendo en cuenta la amenaza sísmica a la que se encuentra sometida la ciudad de San Juan de Pasto, es de vital importancia conocer la respuesta o comportamiento de sus suelos frente a las ondas sísmicas. Para ello se realizaron estudios de análisis dinámico de suelos, que permitieron obtener la caracterización dinámica de 23 sitios de la ciudad. El cálculo de periodos de resonancia se realizó mediante métodos numéricos (Zeevaert, NSR-98), además del método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura. Mediante el programa ProShake se obtuvieron periodos de resonancia para los 23 sitios, además de los espectros elásticos de respuesta. Finalmente, con los resultados obtenidos se realizó un diagnóstico preliminar en lo referente al uso de la NSR-98, calculando espectros elásticos de diseño mediante la formulación de la NSR-98, y espectros de diseño en función de las condiciones locales y de los diferentes niveles de intensidad sísmica; espectros que se muestran en una gráfica comparativa.

Palabras clave: Nakamura, Resonancia, Espectro.

Abstract

Taken into account the seismic threat that is subject the city of San Juan de Pasto, it is necessary to know its soil's answer and behavior to seismic waves. To that end some studies about the ground dynamic analysis were carried out, which enabled us to obtain the 23 sites' soils dynamic characterization, distributed throughout the city. The resonance periods' calculation, was carried out using numerical methods (Zeevaert, NSR-98) plus the micro-tremor method proposed by Nakamura. By PROSHAKE resonance periods were obtained for the 23 sites, in addition to the elastic response spectra. Finally with the results obtained, a preliminary diagnosis is made regarding the use of the NSR-98, calculating elastic design spectra through the formulation of the NSR-98 and design spectra, based on local conditions and different levels of seismic intensity, showing a graphic comparison of these spectra for the sectors under analysis.

Key words: Nakamura, Resonance, Spectra.

* Ingeniero Civil, Magíster en Geotecnia, Ph.D. Universidad Politécnica de Cataluña, Docente Universidad de Nariño. Ingesuelos1@gmail.com

** Ingeniero Civil, Investigador Universidad de Nariño. ic_aghs@hotmail.com

*** Ingeniera Civil, Investigadora Universidad de Nariño. narvaez_lorena@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

El desconocimiento del comportamiento dinámico de los suelos supera ampliamente la incertidumbre que hay en el caso estructural, por sí misma muy significativa. El suelo se puede representar como un sistema de grados de libertad múltiples, cuya respuesta ocurre en diferentes modos de oscilación, cada uno con su propia forma y frecuencia [1].

Cuando el sismo que llega al sitio de la construcción es rico en frecuencias similares a las naturales del suelo, principalmente en el caso del modo fundamental, y el modo fundamental de la edificación es similar al del suelo ocurre un triple proceso de acoplamiento que genera las máximas fuerzas de inercia en la construcción. Con el estado actual del conocimiento se puede obtener el periodo de resonancia de la estructura T_0 y el periodo de resonancia del suelo T_s ; se busca que nunca sea $T_0 = T_s$, para que no se amplifiquen los efectos del sismo [2].

El análisis dinámico de los suelos es una herramienta fundamental, ya que a través de él podemos conocer la respuesta o comportamiento de los suelos frente a las ondas sísmicas; esta respuesta dinámica está íntimamente ligada con la frecuencia natural de vibración del suelo. Para conocer las frecuencias naturales de vibración de los suelos se han utilizado ampliamente las mediciones de vibración ambiental o microtrepidaciones, debido a que en corto plazo y con un solo instrumento sismológico se puede tener mucha información; esto, indiscutiblemente, genera bajos costos de operación y la obtención de registros en cualquier momento y lugar [3].

El objetivo de la investigación que aquí se reporta fue realizar la caracterización dinámica preliminar de suelos en sectores previa y geotécnicamente seleccionados de la ciudad de San Juan de Pasto, por rangos de periodos y niveles de amplificación, obteniendo el periodo predominante y su función de transferencia aproximada, mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura.

II. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de San Juan de Pasto es la capital del departamento de Nariño; está situada al sur de Colombia, sobre el Valle de Atriz, a los $01^{\circ} 12' 49''$ de latitud norte y $77^{\circ} 16' 52''$ de longitud oeste; su altura sobre el nivel del mar es 2559 m y dista de Bogotá 795 km [4]. En la zona urbana y suburbana del municipio es posible reconocer las siguientes litologías: depósitos de caída piroclástica, depósitos de flujos piroclásticos, lavas, depósitos volcánoclasticos, depósitos aluviales, depósitos fluviolacustres y depósitos coluviales, productos en su mayoría de la actividad volcánica Terciaria y Cuaternaria de los diferentes centros eruptivos que rodean la zona, principalmente el complejo volcánico Galeras y el volcán Morasurco [5].

III. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La selección de los sitios de estudio se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de estudios geotécnicos en la zona. Para aplicar las diferentes metodologías se eligieron 23 sitios de la ciudad de San Juan de Pasto, tanto en valle como en ladera; cada uno de los estudios seleccionados presenta el número de exploración, espesor del estrato, profundidad de la muestra analizada, descripción, humedad, altura del nivel freático, granulometría referente al pasante de los tamices N.º 4 y N.º 200, límites, índice de plasticidad, clasificación U.S.C, penetración estándar N_{spt} , resistencia sin drenar, peso unitario seco y húmedo, cohesión y, para algunos casos, ángulo de fricción interna.

Los estudios y las perforaciones disponibles se concentran en los primeros metros del subsuelo, con máximos a 13.75 m, como en el caso del Estadio Libertad; la profundidad media es de 7.40 m, en donde se han identificado materiales como limos, arenas, arcillas y mezclas de estos, además de cenizas provenientes del volcán Galeras.

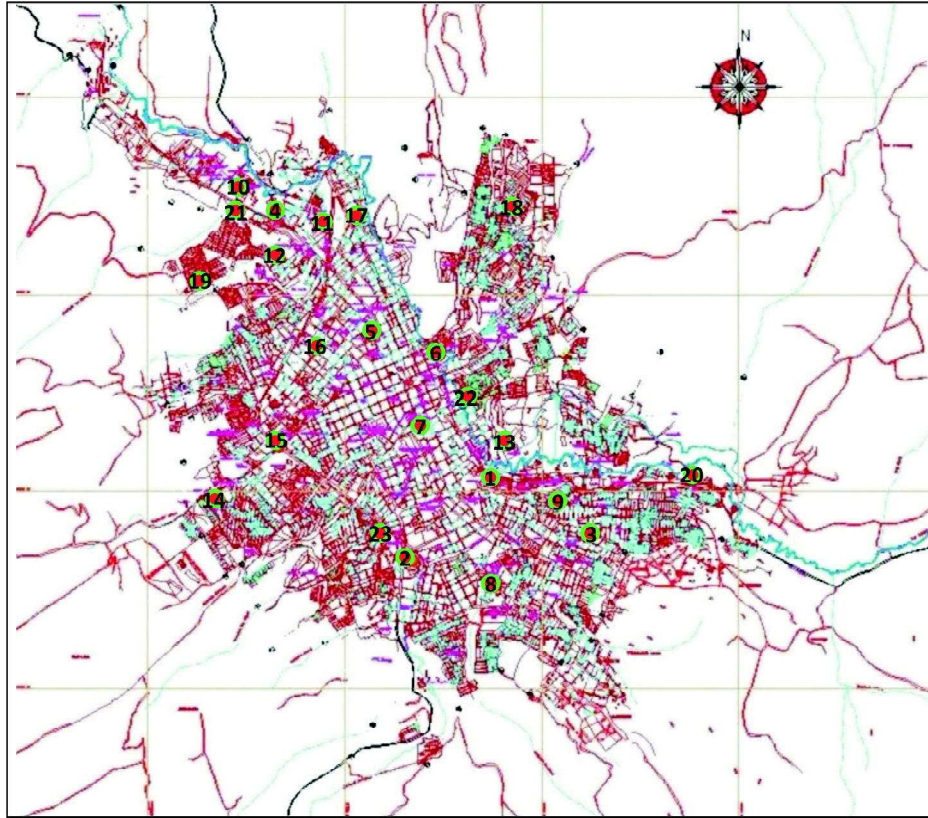


Figura 1. Localización geográfica sectores de medición [10].

A. Estimación de parámetros dinámicos a partir de pruebas estáticas

El procedimiento empleado para obtener los parámetros dinámicos en las zonas de estudio es el siguiente:

1. Obtención de las columnas de suelo representativas de las zonas de estudio, teniendo en cuenta la recopilación de la información geotécnica existente.
2. Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos en las zonas de estudio.

- Revisión bibliográfica de las correlaciones de velocidad de ondas de corte con el ensayo de

penetración estándar según diversos estudios.

- Mediante el uso de correlaciones y los ensayos de la información geotécnica, se obtuvo la velocidad de ondas de corte V_s y el módulo de corte dinámico máximo, $G_{máx}$, para cada estratigrafía.

B. Periodo de resonancia del suelo en vibraciones causadas por fuerzas cortantes

Es posible tratar el fenómeno de vibración del suelo estratificado como un movimiento de vibración libre de varios grados de libertad, formado por los diferentes estratos geológicos. La vibración libre, producto de cada sacudida sísmica, sería amortiguada por rozamiento, que hace que dure solamente lo que permite dicho amortiguamiento.

1) Métodos numéricos

El análisis se realiza siguiendo cualquiera de los métodos numéricos existentes; en este estudio se utilizó el método de velocidades de corte ZEEVAERT [2] y el método numérico ProShake [6]. Teniendo en

cuenta la teoría planteada, se procedió a calcular los modos de vibración del suelo para cada uno de los perfiles estratigráficos de los sectores en análisis. Mediante el uso del método de velocidades de corte, se obtuvo un rango de periodos de 0.05 s a 0.23 s, para los 23 sitios de estudio.

Tabla 1. Resultados obtenidos con el método de las velocidades de corte para los 23 sitios en estudio

N°.	Lugar	FRECUENCIA (Hz)			FRECUENCIA(Hz)
		1 ^{er} modo de vibración	2 ^{do} modo de vibración	3 ^{er} modo de vibración	1 ^{er} modo de vibración 4.38
1	Estadio Libertad	0.23	0.08	0.05	6.54
2	Hospital Departamental	0.15	0.05	0.03	13.93
3	Barrio La Paz	0.07	0.02	0.01	4.46
4	Barrio Pandiaco	0.22	0.07	0.04	12.77
5	Parque Infantil	0.08	0.03	0.02	7.77
6	Plaza del Carnaval	0.13	0.04	0.03	6.77
7	Sector Potrerillo	0.15	0.05	0.03	12.33
8	Sector Dos Puentes (Instituto Pedagógico)	0.08	0.03	0.02	16.94
9	Barrio El Tejar	0.06	0.02	0.01	19.90
10	Universidad de Nariño - Facultad de Ingeniería	0.05	0.02	0.01	5.01
11	Sector Torres Valle de Atriz	0.20	0.07	0.04	8.53
12	Sector Aquines	0.12	0.04	0.02	11.80
13	Sector Nueva Aranda	0.08	0.03	0.02	14.61
14	Colegio Bethlemitas	0.07	0.02	0.01	15.91
15	Colegio Libertad	0.06	0.02	0.01	7.62
16	Colegio San Francisco Javier - Primaria	0.13	0.04	0.03	6.11
17	Empopasto - Planta Centenario	0.16	0.05	0.03	6.74
18	Empopasto - Planta Avenida Mijitayo	0.15	0.05	0.03	12.83
19	Institución Educativa Municipal - Inem	0.08	0.03	0.02	7.78
20	Sector Morasurco	0.13	0.04	0.03	10.25
21	Servicio Nacional de Aprendizaje - Sena	0.10	0.03	0.02	10.37
22	Universidad de Nariño - Facultad de Artes	0.10	0.03	0.02	15.21
23	Sector Nuevo Javeriano	0.07	0.02	0.01	

Fuente: cálculo del periodo del suelo, con el método de las velocidades de corte. ZEEVAERT Pags. 96 y 97. Dinámica de Suelos y Estructuras - Colindres - Limusa

La aplicación del método numérico (ProShake) se fundamenta en el “Modelo Lineal Equivalente”, es decir, en la concepción teórica no lineal, que busca una equivalencia energética de disipación en el modelo lineal a través de un proceso de linealización, que consiste en ajustar los valores de G y D (Módulo de cizalla y factor de amortiguamiento, respectivamente) de cada una de las capas del perfil estratigráfico analizado, para un nivel de deformación por corte media, inducida en esta por la excitación sísmica.

Una vez caracterizados los 23 perfiles seleccionados de la zona en estudio, con sus propiedades físico-mecánicas y dinámicas deducidas, se aplicó el programa ProShake. Inicialmente se procedió a simular y estimar los efectos sísmicos locales en los sectores de estudio seleccionados, usando como señal de entrada pulsos de Ricker de frecuencias predominantes 2, 5 y 7 Hz. Posteriormente se utilizaron sismos de magnitud local 2.5, 4, 5, 6 y 6.8, tomados de la “European Strong Motion Database” [7].

Dada la gran cantidad de información que reporta el programa, se procedió a seleccionar aquellos parámetros de interés para el estudio, como reporte de los diferentes perfiles con sus características, las curvas de módulos de corte normalizado y factor de amortiguamiento para cada material de cada uno de

los perfiles; registros de señales de entrada y aceleraciones, calculados en la parte superior de los estratos de diferentes sitios; espectros de respuesta en superficie y en roca de los diferentes perfiles, y funciones de transferencia en superficie para los 23 perfiles.

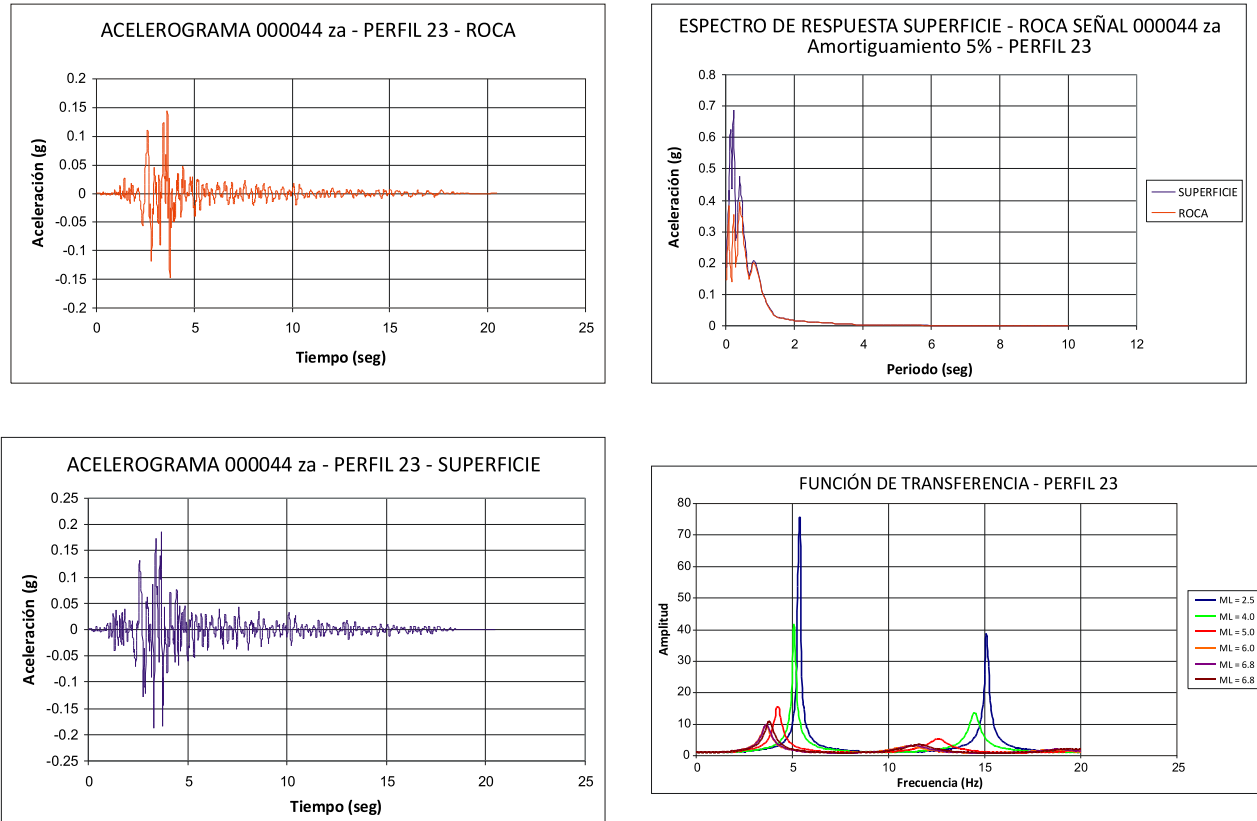


Figura 2. Resultado obtenido de la aplicación del programa ProShake para el acelerograma 000044za y el perfil del sector Torres Valle de Atriz [10]

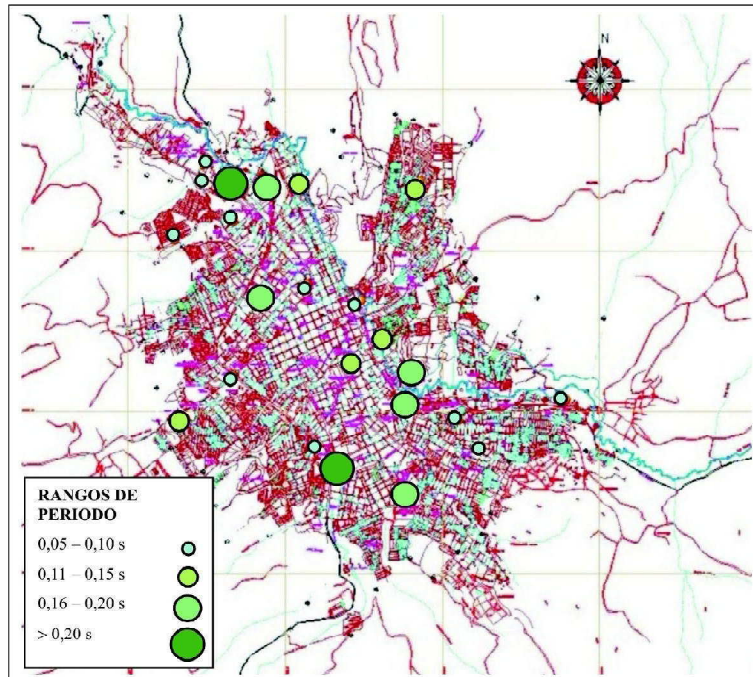


Figura 3. Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake – Pulsos de Ricker [10]

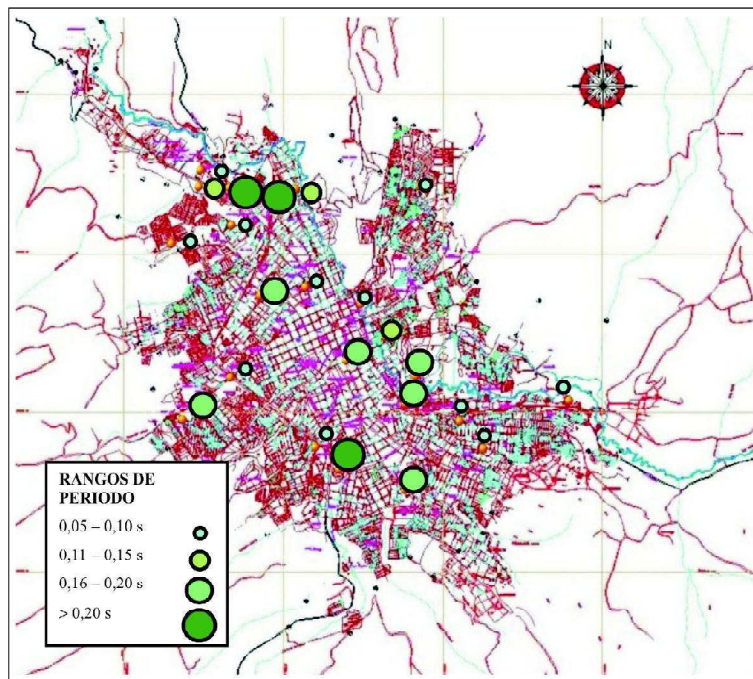


Figura 4. Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake – Sismos diferentes valores de magnitud local [10]

2) Métodos empíricos: microtrepidaciones – metodología de Nakamura

La metodología de Nakamura (1989) está basada en la suposición de que el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical de las microtrepidaciones es una aproximación de la función de transferencia de los suelos [9].

La metodología propuesta buscó básicamente eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, para describir la función de transferencia en función de las ondas internas.

Medida de microtrepidaciones: Para desarrollar una campaña de ruido sísmico basta con tener un sensor de velocidad o aceleración que registre las 3 componentes, una unidad de digitalización A/D o almacenamiento interno y un sistema de adquisición y almacenamiento (*software, laptop*).

En las 23 zonas de estudio de la ciudad se realizaron dos campañas de ruido sísmico: la primera con un sismómetro Guralp, modelo CMG-40T, y unidad de digitalización Nanometrics, y la segunda con un acelerómetro ETNA, marca kinematics.

Las frecuencias de interés con fines de ingeniería incluyen el rango < 10 Hz, donde se encuentran los modos principales de vibración de los suelos; de tal manera que se escogió una tasa de muestreo de 25 Hz, que cumple con el Teorema de Nyquist; 25 Hz es superior al doble. Las microtrepidaciones se registraron por un lapso promedio de 4 minutos. En el caso de los registros adquiridos con el sismógrafo, el tiempo de grabado se programó y se realizó automáticamente; con el acelerómetro la orden de inicio y final de registro se realizó por orden manual.

Se seleccionaron sitios de fácil acceso, como parques, jardines, zonas verdes, canchas de fútbol, localizados a lo largo y ancho de la ciudad. La selección de los sitios se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de información geotécnica suficiente para aplicar las metodologías descritas en el presente documento, además de que estén ubicados tanto en el valle como en la ladera, cubriendo la mayoría de las unidades geotécnicas presentes en la ciudad.

Las mediciones se realizaron en horas diurnas y nocturnas; el 48% de las muestras fueron realizadas entre la 1 y las 4 a. m.; el 17% tienen registros tanto diurnos como nocturnos, y el 35% restante se tomaron en horas diurnas; las mediciones de las horas diurnas corresponden a los sitios con menor tránsito vehicular.

Las señales obtenidas en las campañas fueron analizadas con el software J-SESAME [7]. El procesamiento y el análisis de las señales fueron realizados a través de rutinas escritas en Fortran, ejecutadas bajo entorno JAVA, contenidas en dicho *software*. Para cada señal se ejecutaron los siguientes pasos:

1. Lectura de las señales de entrada
2. Corrección línea base, por el método de los mínimos cuadrados
3. Para la selección de ventanas se usó el procedimiento automático y manual, con una duración de 10 segundos, para una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo, y de 20 segundos, para una tasa de muestreo de 100 muestras por segundo. Se seleccionaron ventanas donde la señal del registro se observa con amplitudes constantes; aquellas que presentaron amplitudes de registro altas, posiblemente ocasionadas por agentes externos a vibración normal de suelo, fueron desechadas. Para evitar el efecto de “leaking” o truncado, se usó la función coseno del 5%; este efecto está asociado con el uso de la FFT. La transformada de Fourier supone que la señal analizada se repite de manera infinita en el tiempo, lo que implica que la señal incluirá siempre periodos completos. Ese no es el caso de las señales con duración finita, como las de las microtrepidaciones, de tal manera que cuando algún periodo queda truco, la suposición de FFT no es válida y eso afecta los resultados.

En cada ventana seleccionada se obtiene el Espectro FFT para cada componente, suavizándolo con el método Konno-Ohmachi: 40; se fusionan las componentes horizontales, y se obtiene la relación espectral H/V; como se cuenta con varias ventanas dentro de una misma señal, se calcula la media de los espectros, además del promedio de la relación espectral

H/V, necesario para el cálculo de la Frecuencia Fundamental. Sin embargo, las señales de microtrepidaciones no presentan picos fundamentales tan precisamente definidos, como es el caso, por ejemplo, de señales armónicas. Producto del tratamiento y suavizado de las señales, el pico puede aparecer achatado o desplazado con respecto al conjunto de la señal de mayores amplitudes. Para

definir homogéneamente el valor del pico fundamental, se decidió, en todos los casos, leer las frecuencias correspondientes al máximo pico, siempre y cuando este coincida en por lo menos dos componentes con una desviación estándar menor al 5%. En caso de duda o picos muy disímiles, se considera como un indicativo para revisar las señales, la selección de ventana útil o su suavizado.

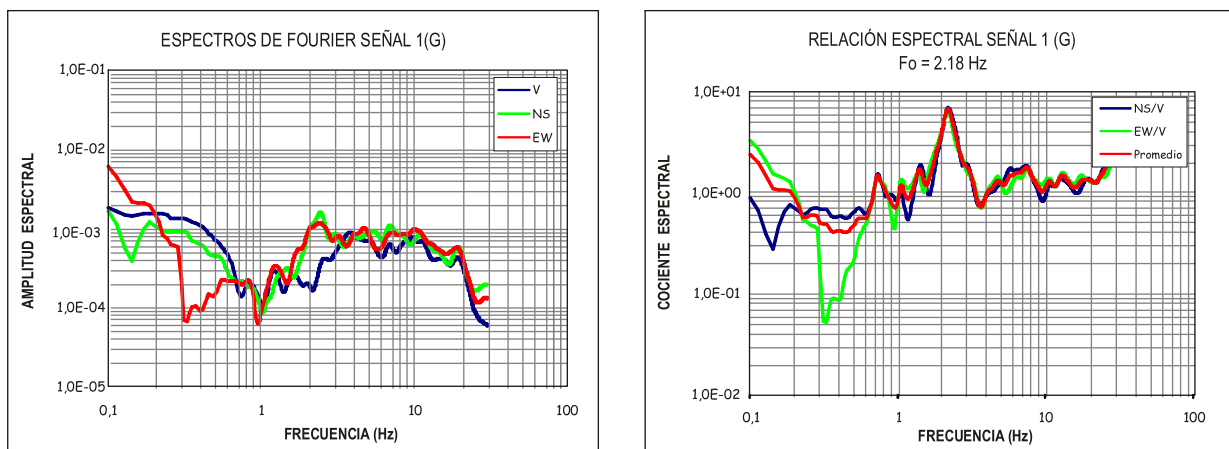


Figura 5. Espectros de Fourier y relación espectral sector Colegio Bethlemitas – Señal Guralp [10]

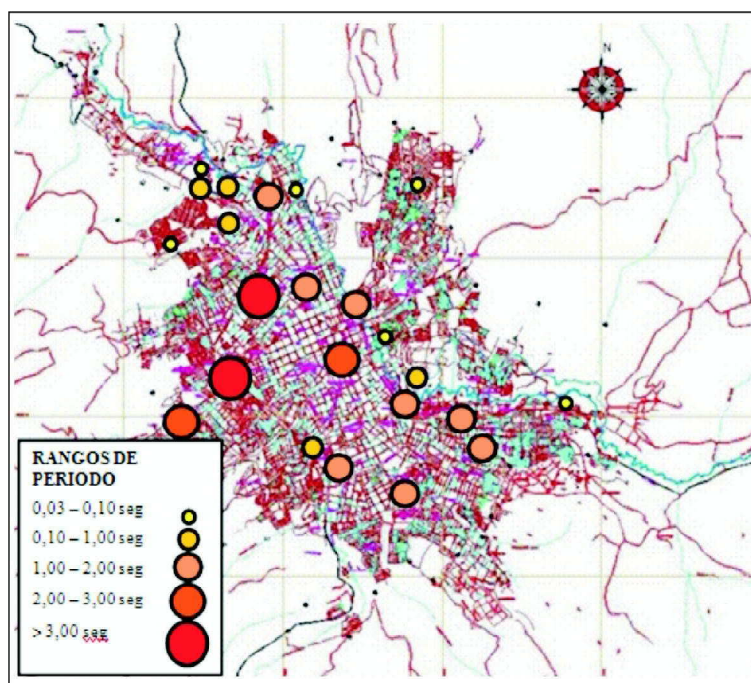


Figura 6. Distribución de los periodos resultantes a partir de análisis de microtrepidaciones [10]

IV. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR EN LO REFERENTE
AL USO DE LA NSR-98 (ESPECTROS DE DISEÑO)

A partir de los valores mínimos “críticos” de velocidad de ondas de corte (V_s), establecidos para cada perfil en estudio, calculados de acuerdo con las correlaciones respecto al valor de penetración estándar N_{spt} , se determinan los valores de coeficiente de sitio de acuerdo con la NSR-98 (capítulo A.2.4), y una vez obtenido el máximo valor de $S_a(g)$ del espectro de respuesta en superficie promedio de las señales de entrada para cada uno de los perfiles en análisis, mediante el *software* ProShake, se tienen los parámetros necesarios para calcular el valor de $A_a(g)$ con base en el valor de coeficiente de importancia

(capítulo A.2.5 NSR-98) y establecer un espectro de diseño a partir de la formulación prescrita en la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente para cada perfil en estudio.

Posteriormente se procedió a calcular los espectros en función de las condiciones locales, con base en cada nivel de intensidad sísmica para cada perfil en estudio. Los niveles de intensidad sísmica están definidos de acuerdo con el valor de $A_a(g)$. Inicialmente se calculan los espectros para cada uno de los valores de A_a definidos. También se calculan los espectros para el nivel de intensidad sísmica recomendado en la ciudad de San Juan de Pasto, de acuerdo con la NSR-98 ($A_a = 0.30 g$) [11].

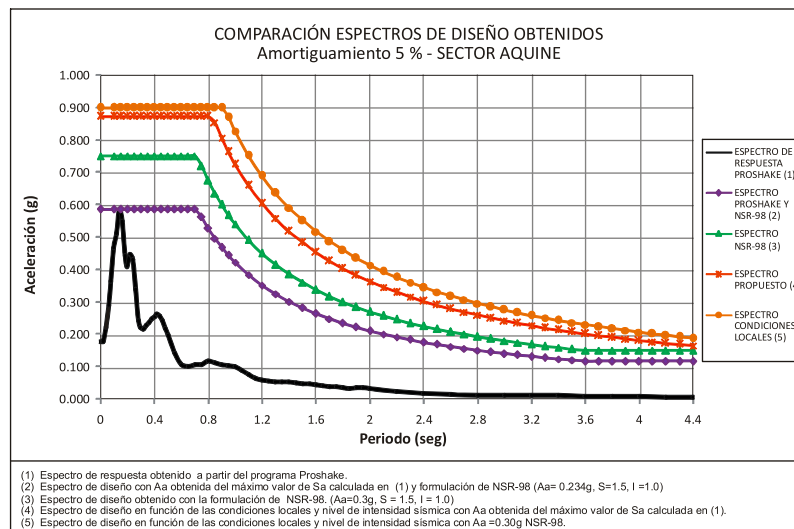


Figura 7. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Aquine [10]

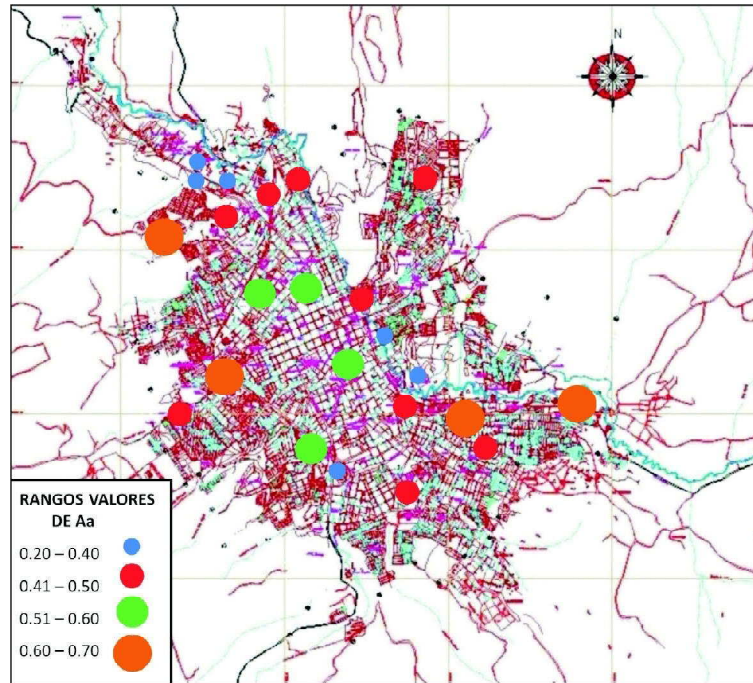


Figura 8. Distribución de las Aceleraciones Pico Efectivas en los 23 sectores en estudio [10]

V. CONCLUSIONES

1. El método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura aporta valiosa información en poco tiempo y a bajos costos. Sin embargo, para estudios de microzonificación sísmica es importante contar con información complementaria obtenida a partir de otras metodologías.
2. A partir del análisis de las microtrepidaciones se obtuvo un mapa de distribución de periodos en la ciudad, de acuerdo con los 5 rangos de periodos de vibración fundamental establecidos; el primer rango (0.03-0.10 s) representa el 26.10% del total; el segundo (0.10-1.00 s) representa el 21.70%; el tercero (1.00-2.00 s) representa el 34.80% del total, lo que significa que es el que más se repite dentro de los sectores en estudio; y el cuarto (2.00-3.00 s) y el quinto (> 3.00 s) representan el 8.7% cada uno del total.
3. Con base en los perfiles estratigráficos obtenidos de los resúmenes de los estudios geotécnicos seleccionados para el presente trabajo, no es posible asociar un periodo de vibración fundamental a un sector en específico, por lo que es apropiado densificar los registros de microtrepidaciones con base en una zonificación geotécnica preliminar.
4. A partir del análisis con el programa ProShake – Sismos diferentes valores de magnitud local, se obtuvo un mapa de distribución de periodos en la ciudad, anotando cuatro rangos de periodos de vibración fundamental establecidos: 0.05-0.10 s, 0.11-0.15 s, 0.16-0.20 y mayores de 0.20 s; el primero y el tercer rango son los que más se repiten dentro de la ciudad.
5. De acuerdo con los resultados obtenidos con el procesamiento de microtrepidaciones y con el

programa ProShake, la vulnerabilidad de las estructuras existentes en la ciudad de San Juan de Pasto es alta, especialmente para aquellas de uno y dos pisos.

6. Los resultados de periodos fundamentales para cada uno de los sectores, obtenidos a partir del análisis de los registros de microtrepidaciones mediante el método de Nakamura y el programa ProShake, presentan notables diferencias, causadas posiblemente por factores externos como la baja densificación de registros y el desconocimiento de la profundidad del basamento rocoso.
7. Las aceleraciones Pico Efectivas (A_a), calculadas a partir del máximo valor de S_a del espectro de Respuesta obtenido del programa ProShake y de la formulación de NSR-98, se encuentran en un rango entre 0.20g y 0.70g, anotando que más del 70% de los sitios de la ciudad de Pasto en análisis están por encima del valor prescrito en la NSR-98.

REFERENCIAS

- [1] A. Sarria, "Sismos y maremotos: Un antiguo reto para la humanidad (parte I)". *Revista de la Técnica y de la Construcción Noticreto*, Bogotá (15, jul., 2005), pp. 54-62.
- [2] R. Colindres Selva, *Dinámica de suelos y estructuras*. Unidad 4, pp. 86-97. México: Limusa, 1993.
- [3] M. L. Bermúdez, S. Pachón, S. Martínez, A. Ojeda, "Estimación del T_s en el área Metropolitana de Bucaramanga". En: *Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología: Avances de la sismología en los últimos veinte años*. Bogotá, Universidad Nacional, Ingeominas, 2002.
- [4] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. *Atlas de Colombia*. CD-ROM, 1996.
- [5] I. Muñoz Quijano, *Estudio geológico detallado del área urbana y suburbana del municipio de Pasto*. Tesis (Geóloga). Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Manizales. 1998. 96 p.
- [6] H. Coral Moncayo, *Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Barcelona, 2002.
- [7] N. Ambraseys, P. Smit, R. Berardi, D. Rinaldis, F. Cotton and C. Berge-Thierry. *Dissemination or European Strong-Motion Data*. CD-ROM collection. European Council, Environment and Climate Research Programme, 2000.
- [8] Y. Nakamura, K. Tomita and J. Saita. *Characteristics of Ground Motion and Structures Around the Damaged Area of the Northridge Earthquake by Microtremor Measurement* (preliminary report ver. 2). Rail Technical Research Institute, Tokyo, 1994.
- [9] J-SESAME, *User Manual and software*, version 1.08 (2004).
- [10] S. A. Hillón and M. E. Narváez. *Caracterización dinámica preliminar de suelos en sectores de la ciudad de San Juan de Pasto mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura*. Tesis Pregrado. Universidad de Nariño, Pasto, 2008.
- [11] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Normas colombianas de diseño y construcción sísmo-resistente NSR-98*. Cuarta edición. Bogotá, 2003.

