

11. MEDICIONES DE MICROTREPIDACIONES

Como se discutió en el capítulo anterior las microtrepidaciones han sido usadas para la microzonificación preliminar de muchas ciudades alrededor del mundo. Si bien el factor de amplificación aún no ha sido entendido completamente, la forma general de las relaciones espectrales H/V y en especial el pico fundamental de vibración de dichos espectros permiten aportar a la microzonificación de las ciudades en términos del comportamiento dinámico de los suelos.

El propósito de las mediciones de las microtrepidaciones fue caracterizar, en los términos arriba descritos, una zona de la ciudad, correspondiente al área de estudio. No se busca delimitar la zona con las mediciones, ya que esto implicaría una densidad de puntos mucho mayor, incluyendo mediciones detalladas en las zonas vecinas, sino que busca por un lado el entendimiento y apropiación de la metodología para futuras mediciones en la ciudad, y por otro, la caracterización de los suelos en el área de estudio.

Para efectos de comparación de los resultados con el área de estudio, se seleccionaron puntos en otras zonas donde no hay tanta concentración de reportes macrosísmicos y donde se presentan otras formaciones geológicas superficiales.

Una vez se cuenta con los equipos de medición, adquisición, almacenamiento y análisis adecuados y probados, la aplicación de la metodología de Nakamura resulta ser muy fácil y rápida.

11.1 EQUIPO DE MEDICIÓN

En las mediciones se utilizó un sensor de velocidades con periodo natural de 1 segundo y respuesta plana entre 1 y 50 Hz; el sensor se conectó a una unidad convertidora Análoga/Digital, la cual a su vez se conectó con una computadora portable para almacenamiento de los datos. El esquema general se presenta a continuación (Figura 67).

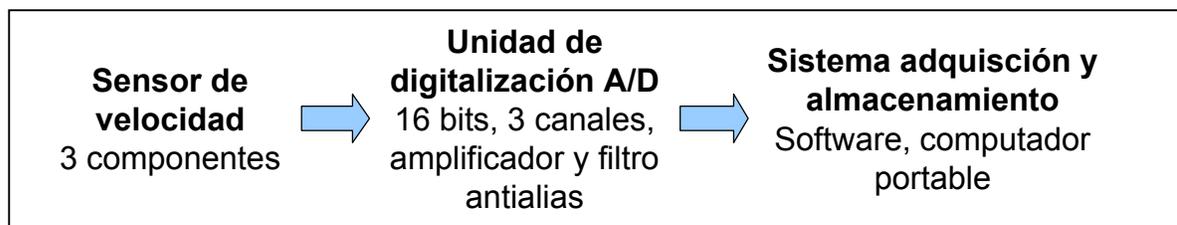


Figura 67. Esquema general para registro de microtrepidaciones.

A continuación se describen las características técnicas de cada uno de los equipos utilizados.

11.1.1 Sensor de velocidad.

Marca: Mark Products, Modelo L4C-3D.

Periodo natural: 1 segundo.

Amortiguamiento: 0,707 crítica.

Dimensiones: Peso total: 9.1 kg, Altura: 18.2 cm y Diámetro 20.3

Constante de transducción:

Componentes vertical y longitudinal: 282,3 Volt/(m/s)

Componente transversal: 281,5 Volt/(m/s)

11.1.2 Unidad de digitalización.

Marca: Nanometrics.

Modelo: RD3, 1989.

Dimensiones: diámetro=15 cm, altura = 27 cm

Alimentación: batería 12V.

Convertidor A/D: 16 bits.

Rango de voltaje: +- 10 V.

Filtro "anti-alias".

Ganancia: se escogió la máxima, 40 db.

11.1.3 Unidad de almacenamiento.

Los datos se almacenan en un computador portable; llegan al puerto serie RS232C²² a través de un cable que viene de la unidad digitalizadora. Dos procesos consecutivos son llevados a cabo en el computador:

1. Adquisición en tiempo real.

Se realizó con el programa *Tera Termpro*, un software que controla las comunicaciones a través del puerto serie del sistema operativo Windows. Los datos que llegan al puerto serie del computador son almacenados en el disco duro, según el formato RD3 (binario) establecido por el fabricante de la unidad digitalizadora (Nanometrics, 1989:38).

2. Conversión de datos (post-adquisición).

Los datos del formato RD3 son convertidos a uno simplificado, formato VibAmb (binario de 32 bits), para facilitar su lectura y análisis posterior. Se realizó en el OSSO²³ una rutina para tales fines. La rutina está escrita en el

²² Protocolo de comunicación del puerto serie.

²³ Desarrollada por Fís. Rafael González, Área de Instrumentación y Desarrollo del OSSO

lenguaje de programación C, con librerías estándar ANSI²⁴, se ejecuta bajo el ambiente operativo Linux. El nombre de la rutina es “rd3conv”.

Los datos son almacenados según el orden de las componentes así: Vertical, Horizontal Norte y Horizontal Este, la correspondencia entre esta nomenclatura con la usada por la Unidad Digitalizadora y la usada en el procesamiento de las señales en el análisis se aclara a continuación:

Componente sensor	Unidad RD3	Procesamiento
Vertical	Canal 1 (ch1)	Z
Horizontal Norte	Canal 2 (ch2)	X
Horizontal Este	Canal 3 (ch3)	Y

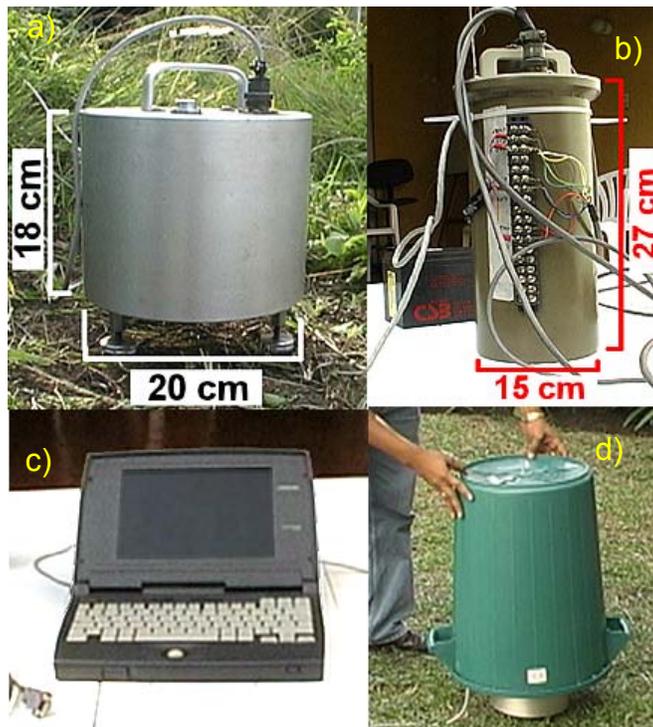


Figura 68. Equipo de mediciones de microtrepidaciones.

²⁴ ANSI: Compilador estándar C (lenguaje de programación) de American National Standard Institute.

En la Figura 68 se aprecia el equipo de mediciones empleado: en (a) se muestra una foto del sensor L4C-3D; en (b) la unidad digitalizadora RD3 y al fondo la batería; en (c) computador portable para adquisición y almacenamiento y (d) el tarro de plástico empleado para aislar el sensor de vibraciones inducidas por el viento.

11.2 PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN

11.2.1 Tiempo de registro y tasa de muestreo.

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 muestro de 25 Hz, que cumple con el Teorema de Nyquist; 25 Hz es superior al doble. Las microtrepidaciones se registraron por un lapso de tiempo aproximado de 10 minutos. El tiempo es aproximado ya que en la unidad digitalizadora este tiempo no se puede autoprogramar, el grabado se detiene por una orden manual²⁵.

11.2.2 Nomenclatura de archivos.

Los archivos de medición de cada sitio fueron nombrados según la siguiente estructura:

Estructura	Sitio	mes	Día	hora	min	.	Mat
Ejemplo	alc	04	06	12	00	.	Mat

²⁵ La unidad dispone de un reloj interno con una exactitud entre 10^{-3} y 10^{-4} segundos.

11.3 SITIOS DE MEDICIÓN Y REGISTROS

11.3.1 Selección de sitios.

Se seleccionaron sitios de fácil acceso que cumplieran con los requisitos mencionados en § 10.5.6 Para efectos de comparación de los resultados del método se realizaron mediciones en zonas fuera del área de estudio sobre formaciones geológicas superficiales diferentes.

Zona de estudio.

Se seleccionaron 4 puntos de medición que coincidieran con sitios donde se realizaron pruebas de refracción sísmica en los cuales, además, se dispone de reportes macrosísmicos relevantes como es el caso del Edificio Torres de Alcalá (Capítulos 6 y 12). Los sitios de medición se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 18. Sitios de medición de vibraciones ambientales.

Sitio	Ensayo de refracción sísmica	Reportes macrosísmicos
Alcalá	No ^{*1}	Si ^{*2, *3}
Colegio	Si	No
Coliseo	Si	Si ^{*4}
Iglesia	Si	No
Univalle	Si	No

* 1: El parque es muy pequeño. Se trata de una zona verde de pequeña extensión, no ideal para mediciones de refracción sísmica.

* 2: Reportes de vibraciones inducidas durante conciertos en el Coliseo El Pueblo y sentidas en el edificio Torres de Alcalá (Capítulo 12).

* 3: Reportes de daños por sismos (Capítulo 6).

* 4: Se refiere a reportes de vibraciones inducidas en el Coliseo El Pueblo y sentidas en edificaciones a menos de 200 m y a 800 metros de distancia (Capítulo 12).

Fuera de la zona de estudio.

Se seleccionaron dos zonas fuera del área de estudio, sobre formaciones geológicas superficiales diferentes. Estas dos zonas, en comparación con la de estudio tienen pocos o nulos reportes macrosísmicos para los mismos eventos o efectos inducidos de la zona de interés. Una de ellas, el Cono del río Meléndez, también corresponde a depósitos sedimentarios cercanos y topográficamente comparables con el cono de Cañaveralejo. La otra, la colina de San Antonio, a unos 40 metros sobre el nivel de las anteriores formaciones, está conformada por una secuencia de estratos de gravas con intercalaciones de depósitos volcánicos de consistencia dura y edades superiores a 2,9 millones de años (Velásquez & Toro, 2001).

En el cono del río Meléndez se trabajó en los terrenos de la Universidad del Valle por varias razones: (a) terrenos con suficiente extensión para pruebas de refracción sísmica, (b) facilidad de acceso y seguridad para pruebas nocturnas, (c) disponibilidad de registros acelerográficos de sismos en las últimas décadas. Univalle se convirtió en el sitio ideal para la realización de pruebas de los diversos equipos empleados, y para realizar las pruebas de estabilidad de las mediciones nocturnas y diurnas en vibraciones ambientales.

11.3.2 Descripción y registros.

En la Figura 69 se aprecia la localización de los puntos de medición.

a) Mediciones en la Zona de estudio.

Se realizaron mediciones en cinco zonas descubiertas (verdes).

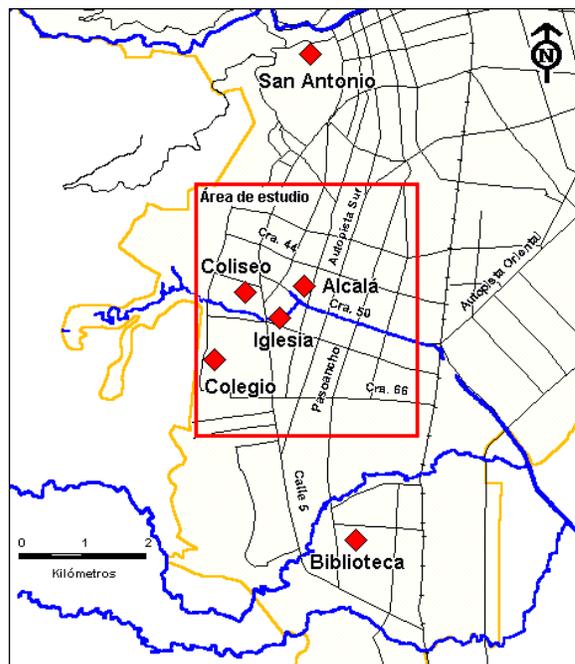


Figura 69. Sitios de medición de microtrepidaciones

Alcalá (alc).

Sitio: Parque contiguo al edificio Torres de Alcalá II. Cra. 47 B con Calle 8 B. El parque dista 1770 m del piedomonte y está ubicado sobre el antiguo lecho del río Cañaveralejo.

Ubicación sensor: Fue posible ubicar el sensor distanciado 4 metros de los árboles; no se conocen las dimensiones de las raíces de éstos. El punto de medición está aproximadamente a una cuadra de la Carrera 50 y a una de la Calle 9, de alto tráfico, sin presencia de buses.

Se realizaron 4 mediciones de 10 minutos (Tabla 19).

Tabla 19. Mediciones de microtrepidaciones en Alcalá (alc)

Registro medición	Punto	Tipo
Alc04061200.mat	Parque contiguo a Torres de Alcalá	Diurna
Alc04061115.mat	Parque contiguo a Torres de Alcalá	Diurna
Alc04060150.mat	Parque contiguo a Torres de Alcalá	Nocturna
Alc04170210.mat	Parque contiguo a Torres de Alcalá	Nocturna

Colegio (clp).

Sitio: Cancha de Fútbol (del costado W) del Colegio Politécnico Municipal, barrio Los Chorros. Entre carreras 62 y 63 con Calle 1A. El colegio dista sólo 200 metros del piedemonte y se encuentra 830 metros al sur del río Cañaveralejo.

Ubicación sensor: se ubicó en el centro de la cancha de futbol del extremo SW del predio del Colegio.

Se realizaron 2 mediciones de 10 minutos (Tabla 20).

Tabla 20. Mediciones de microtrepidaciones en Colegio Politécnico (ptd)

Registro medición	Punto	Tipo
Ptd05021255.mat	Cancha de fútbol	Diurna
Ptd05021240.mat	Cancha de fútbol	Diurna

Coliseo El Pueblo (clp)

Sitio: En la zona verde en las afueras del Coliseo El Pueblo, 320 metros al norte del río Cañaveralejo y distante 910 del piedemonte.

Ubicación sensor: Las mediciones se realizaron coincidiendo con los ensayos de refracción sísmica RS# 7 y RS#15.

Se realizaron dos mediciones de 10 minutos (Tabla 21).

Tabla 21. Sitio medición de microtrepidaciones Coliseo El Pueblo (clp)

Registro medición	Punto	Tipo
clp05021415.mat	Costado E Coliseo	Diurna
clp05021405.mat	Costado E Coliseo	Diurna

Iglesia Santa Isabel.

Sitio: Barrio Nueva Tequendama, parque contiguo a la iglesia Santa Isabel. El parque limita por el S con el río y está distanciado del piedemonte 1250 metros.

Ubicación Sensor: Extremo E del parque, coincidiendo con el ensayo RS#8.

Se realizaron dos mediciones de 10 minutos (Tabla 22).

Tabla 22. Mediciones de microtrepidaciones, iglesia Santa Isabel (isa)

Registro medición	Punto	Tipo
isa05101335.mat	Centro del parque	Diurna
isa05101350.mat	Centro del parque	Diurna

b) Zona de Meléndez.

Univalle (unv).

Sitio: Terrenos no urbanizados, no intervenidos, detrás de la Biblioteca Mario Carvajal. Ubicado al sur del río Meléndez y a 510 del piedemonte.

Ubicación sensor: Se hicieron mediciones en cuatro puntos diferentes. Tres de ellos coincidentes con los puntos de disparo del arreglo de refracción sísmica (Capítulo 9), y uno en cercanías de la Avenida Pasoancho, vía con alto tráfico.

Se realizaron siete mediciones de 10 minutos (Tabla 23).

Tabla 23. Mediciones de microtrepidaciones, Univalle (unv)

Registro medición	Punto	Tipo
Unv04061340.mat	Univalle 1	Diurna
Unv04061400.mat	Univalle 2	Diurna
Unv04061415.mat	Univalle 3	Diurna
Unv04170310.mat	Univalle 1	Nocturna
Unv04170340.mat	Univalle 1	Nocturna
Unv04191125.mat	Univalle 1	Diurna
Unv04191100.mat	Univalle 4	Diurna

La ubicación más precisa de los cuatro puntos de medición en Univalle se aclara en la Figura 70.

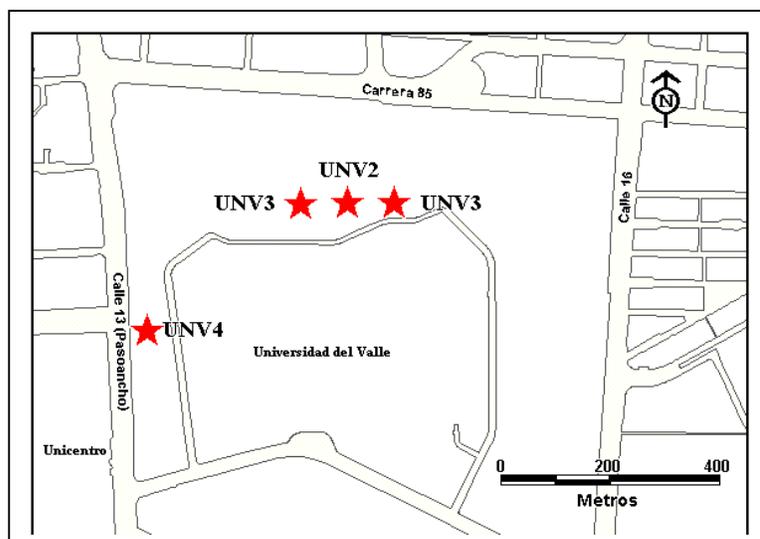


Figura 70. Ubicación puntos de medición de microtrepidaciones en Univalle.

c) San Antonio.

San Antonio (san).

Sitio: Parque San Antonio contiguo a la Iglesia del mismo nombre.

Ubicación sensor: Hacia el centro del parque en frente de la iglesia de San Antonio distanciados 20 metros aprox.

Se realizaron cuatro mediciones de 10 minutos (Tabla 24).

Tabla 24. Mediciones en Parque San Antonio (san)

Registro medición	Punto	Tipo
San05101130.mat	San Antonio 1	Diurna
San05101145.mat	San Antonio 1	Diurna
San05101210.mat	San Antonio 2	Diurna
San05101225.mat	San Antonio 2	Diurna

11.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las señales en formato VibAmb fueron analizadas con el paquete MatLab, un entorno de cálculo técnico de MathWorks Inc (1984-1998: vr. 5.2). Todo el procesamiento y análisis de las señales fue realizado a través de rutinas escritas en MatLab para este proyecto. El procesamiento y análisis de las señales se realizó en dos fases:

- 1) Tratamiento básico y preparación de las señales.
- 2) Procesamiento y cálculo.

11.4.1 Fase 1: Tratamiento básico y preparación de las señales.

Esta etapa corresponde a la preparación de las señales para su posterior análisis; se realizaron los siguientes tres pasos:

Paso 1: Conversión de unidades de voltaje a unidades de velocidad.

El sensor mide velocidad de desplazamiento de las partículas de suelo y lo transduce en voltaje. Por lo tanto para obtener el valor de velocidad de la partícula hay que multiplicar el valor en voltios, V , a la salida del sensor por una constante que depende de la constante de transducción (T) del sensor en

$V/(m/s)$; del grado de precisión numérico de la unidad digitalizadora, n , en bits y del voltaje de entrada de la unidad digitalizadora o *full scale range*, FSR , en voltios. Dicha constante se calcula de la siguiente forma:

$$1LSB = \frac{FSR}{2^{n-1}} \text{ (Texas Instruments, 1995)}$$

donde LSB es el *byte* significativo mas pequeño. Al dividir LSB por la constante de transducción del sensor T , se obtiene la constante de conversión de unidades de voltaje a unidades de velocidad así:

$$C = \frac{LSB}{T},$$

donde T es 202,54 $V/(m/s)$ para la componente vertical; 282,3 $V/(m/s)$ para la longitudinal; 281,5 $V/(m/s)$ para la transversal y $LSB = 20/2^{16-1}$.

Paso 2: Selección de señales útiles.

Durante la adquisición de datos es posible que se registren picos con amplitud del orden de 100 a 10,000 veces la amplitud normal de las microtrepidaciones; éstos picos, generados por excitaciones puntuales y fuerte cercanas al sensor (\dot{z}), o por ruido electrónico, no son de interés para los estudios de microtrepidaciones. Incluir este tipo de señales deforma o sesga los análisis posteriores, por ejemplo cuando se calcula la transformada discreta de Fourier. Para obviar esto se hizo una selección de la parte útil de los registros, excluyendo los picos de amplitudes anómalos. De esta manera de un registro (10 minutos de duración en promedio) se seleccionaron varias señales (*señal seleccionada*) de menor duración. Los registros que presentaron muchos de estos picos fueron descartados para el análisis. De tal manera que se utilizaron las señales más largas y se descartaron aquellas de menos de 100 segundos. Las señales seleccionadas, extraídas de cada registro, se identificaron con una letra (p. ej. a, b, c) adicional a la estructura original, de la siguiente manera:

Sitio	Mes	Dia	Hora	Min	Señal seleccionada	.	Mat
Alc	04	06	12	00	a	.	Mat

La parte a) de la Figura 71 muestra un pico hacia los 319 segundos del registro con las señales de microtrepidaciones hacia el cero en el eje de las velocidades; la parte b) que corresponde a la señal seleccionada (los primeros 318 segundo) muestra ampliado el contenido normal de las microtrepidaciones. El ejemplo de la figura corresponde al registro alc04170210, medido en Alcalá. Del registro se seleccionaron dos señales útiles, alc04170210a y alc04170210b.

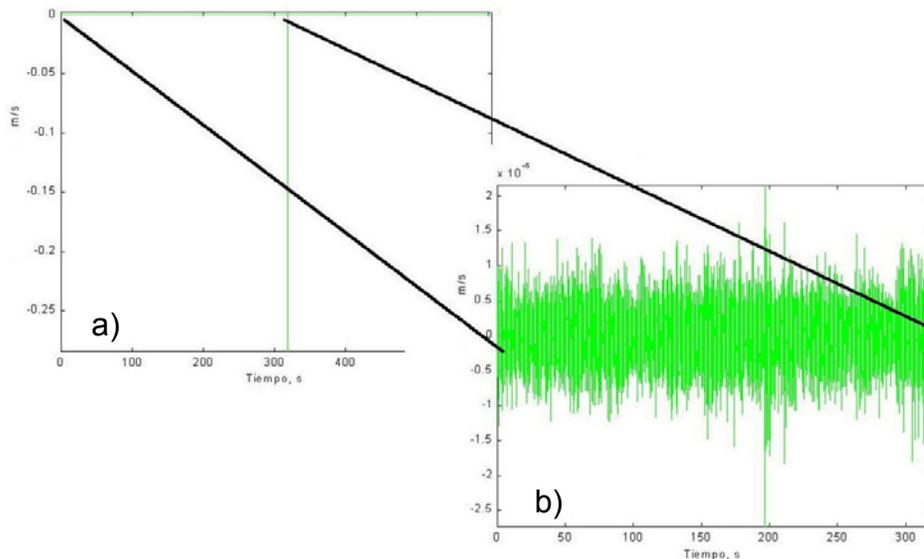


Figura 71. Ejemplo de selección de señal de vibraciones ambientales

En la Figura 71 se muestra el caso típico de una registro descartado ya que presenta gran densidad de picos inducidos por tráfico alto y muy cercano, de buses y carros. En la parte a) se muestran aproximadamente los primeros 5 minutos de un registro adquirido en el parque frente al Edificio Marañón, en la parte b) lo que sería la parte útil pero que sólo tiene una duración de 7 segundos.

Paso 3: Corrección de línea de base.

Todas las señales registradas presentaron un desplazamiento negativo. Éste es en gran parte causado por los circuitos electrónicos de acondicionamiento de la

señal y de amplificación, ya que presentan un ligero desplazamiento en DC inherente a los circuitos, lo que se conoce como *offset*.

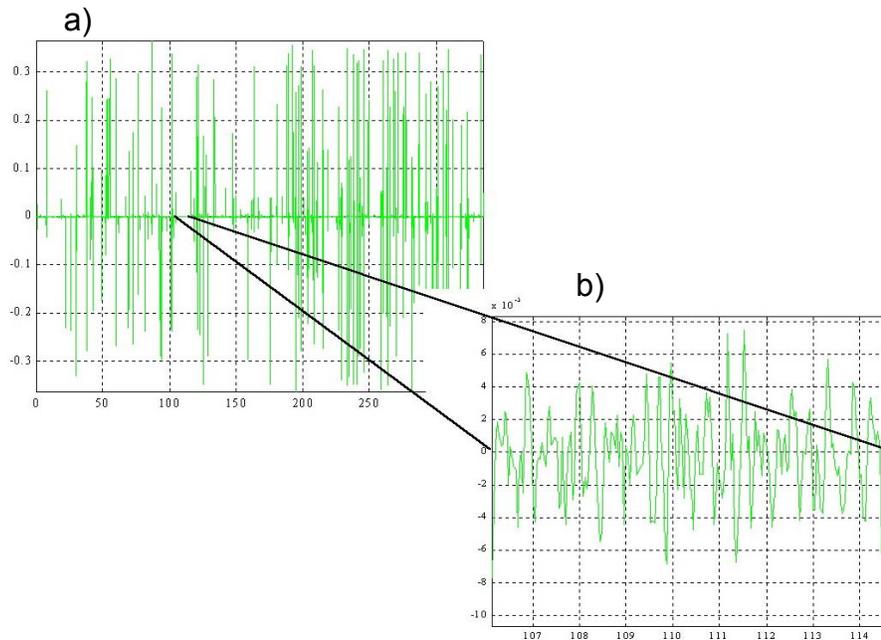


Figura 72. Ejemplo de señal muy ruidosa descartada

Esto fue corregido, según se explicó en el § 10.5.7, por el método de los mínimos cuadrados. En la **Figura 73** se puede apreciar una señal antes y después de la corrección de línea de base.

11.4.2 Fase 2: Procesamiento y análisis.

Esta fase corresponde al procesamiento de la señal a través de filtros, análisis espectral y cálculo de la relación espectral de Nakamura, H/V. Los pasos realizados fueron:

Paso 1: **Suavizado de las señales (filtro Hanning).** Para evitar el efecto de truncado²⁶ las señales fueron tratadas por “ventaneo”²⁷ con el filtro de Hanning (§ 10.5.7). Se escogió una ventana de 2048 muestras con un traslape del 50%.

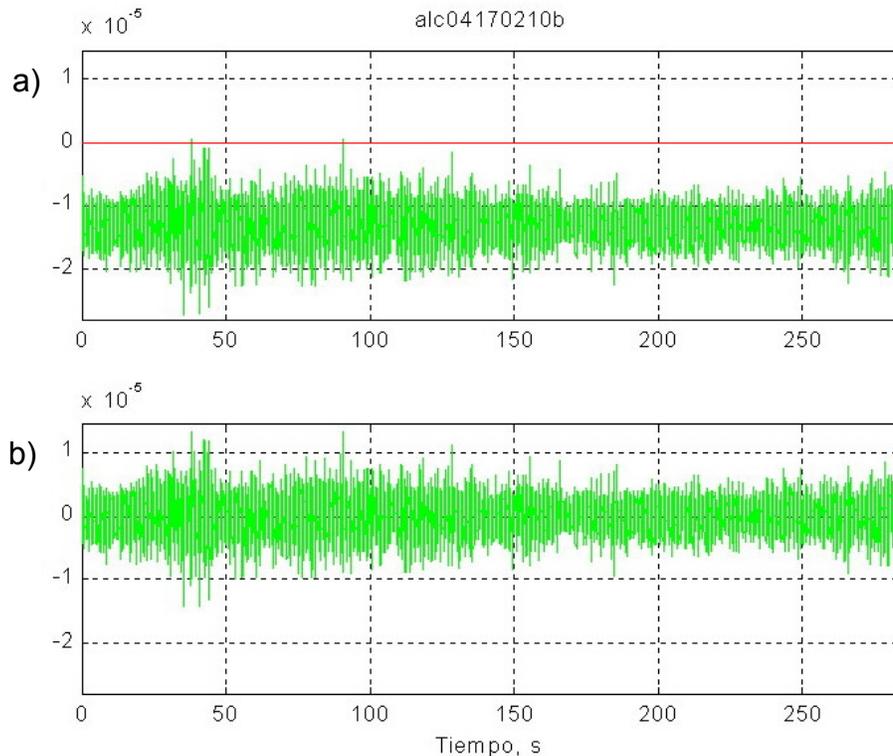


Figura 73. Corrección de la línea base (a) antes y (b) después

Paso 2: Cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Se calculó la transformada rápida de Fourier a ventanas de 2048 muestras de longitud (previamente suavizadas con el filtro de Hanning), y luego se promediaron. El número total de ventanas varía en cada caso dependiendo de la longitud de la señal seleccionada.

²⁶ En inglés *leaking*.

²⁷ Del inglés *windowing*.

Paso 3: Promedio de los espectros horizontales.

Se realizó un promedio, coordenada a coordenada, de los 2 espectros horizontales de cada señal seleccionada.

Paso 4: Cálculo de la relaciones H/V.

El promedio de los espectros horizontales se dividió entre el espectro vertical para obtener la relación espectral H/V.

Paso 5: Suavizado de los espectros H/V.

Para generar espectros H/V, sin frecuencias sobrepuestas, éstos fueron suavizados con el Triángulo de Pascal de orden 10 (§ 11.5.7).

Rutinas en MatLab.

Se desarrollaron rutinas (MatLab) para ejecutar (y mecanizar) los diferentes pasos descritos anteriormente. Éstas se listan en la Tabla 25 en la cual se incluye un resumen de los pasos del procesamiento y análisis de las señales. Algunas de las rutinas incluyeron el uso de funciones existentes en MatLab, de tal manera que las rutinas aportadas tienen como propósito agilizar el procesamiento de los datos.

Tabla 25. Pasos de procesamiento y análisis de señales: rutinas de MatLab.

Fase-->paso	Descripción	Rutina en Matlab²⁸
1-->1	Conversión unidades de voltaje a velocidad	volt2vel
1-->2	Selección parte útil	Cortica
1-->3	Corrección de la línea de base	Baseline
2-->1	Suavizado señal	Vibamb
2-->2	Transformada rápida de Fourier	“ ”
2-->3	Promedio espectros horizontales	“ “
2-->4	Calculo relación espectral HV	“ “
2-->5	Suavizado espectro HV	“ “

²⁸ Escritas por la autora. Incluye funciones pre-existentes en MatLab.

El procedimiento para obtener la relación espectral H/V se ilustra en la Figura 74.

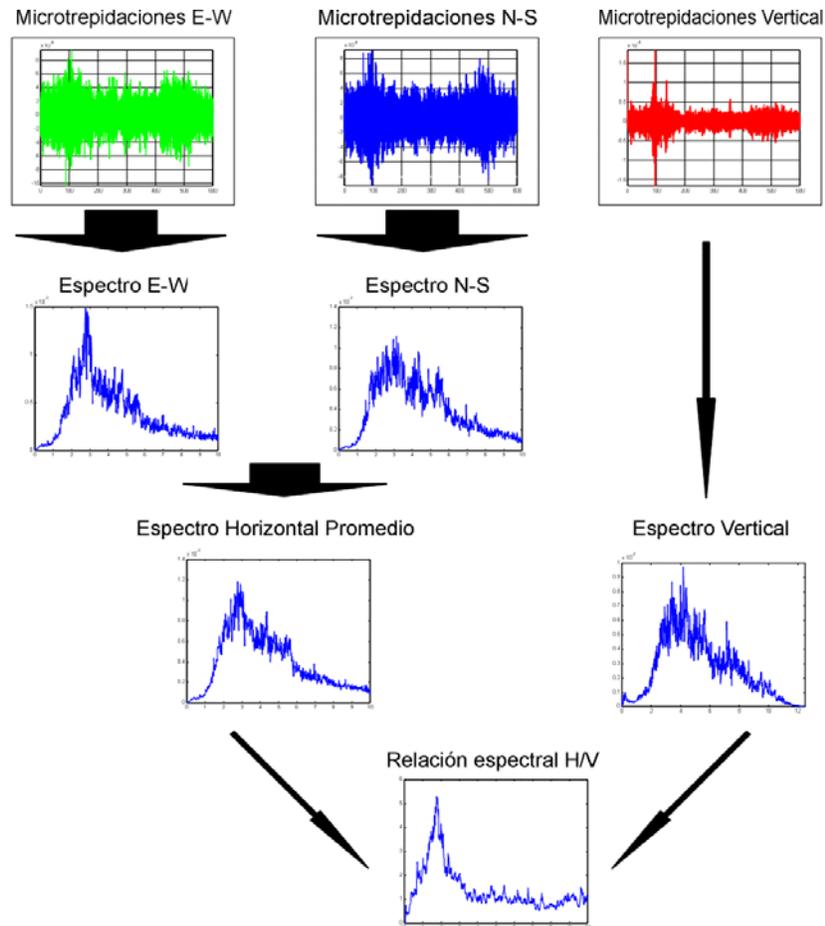


Figura 74. Procedimiento para obtener la relación espectral H/V.

11.5 RESULTADOS.

Las señales seleccionadas, las cuales se listan en la primera columna de la Tabla 26, fueron analizadas según los pasos descritos en los anteriores numerales. Una vez obtenidos los espectros de frecuencias H/V para cada señal seleccionada, éstos se analizaron en términos de su contenido espectral, frecuencia y el factor de amplificación de cada una.

11.5.1 Periodos fundamentales.

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. Como no se encontró en la literatura, cómo han resuelto los autores el problema de definir homogéneamente el valor del pico fundamental, se decidió, en todos los casos, leer las frecuencias correspondientes al 70% del rango de las máximas amplitudes. Para ello se utilizó la notación f_1 (frecuencia de inicio), f_2 (frecuencia final) y f_0 (frecuencia de la amplitud máxima) (Figura 75). Con este procedimiento se tiene un control razonable sobre la comparabilidad de señales de microtrepidaciones en un mismo sitio y, en caso de duda o picos muy disímiles, es un indicativo para revisar las señales mismas, su selección o su suavizado.

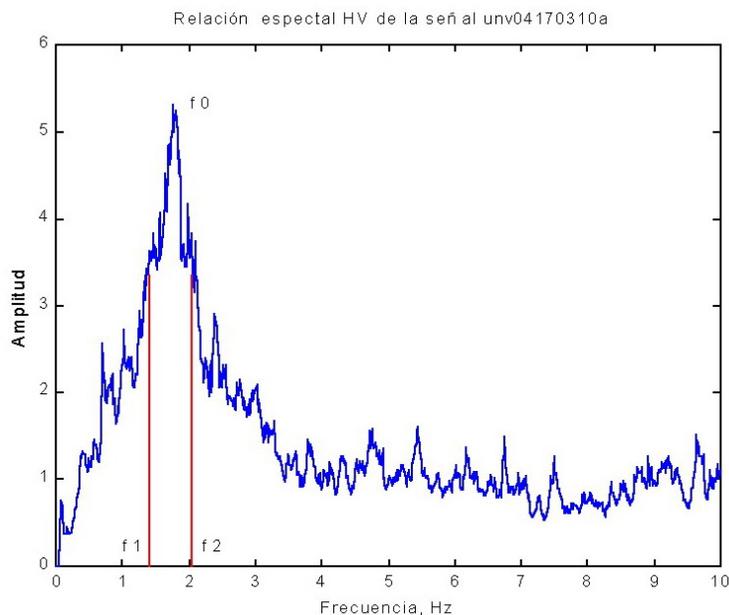


Figura 75. Ejemplo de lectura del pico fundamental y su rango

En la Tabla 26 se muestran los valores de frecuencias fundamentales para las señales seleccionadas en los diversos sitios de medición. Se incluyen, además, los tiempos originales de inicio (ti) y fin (tf) de las señales en los registros, la duración en segundos de las señales seleccionadas (L) y las tres frecuencias que definen el pico fundamental de vibración, f0, f1 y f2.

El espectro promedio H, el V y la relación espectral H/V de Nakamura de todas las señales seleccionadas, se presentan en el Anexo B.

Tabla 26. Señales seleccionadas, duración, frecuencia fundamental y frecuencias de corte.

Sitio	Señal seleccionada	ti	tf	L	f0	f1	f2
Alcalá	Alc04061200a	0	160	160	0,60	0,65	0,95
	Alc04061200c	222	573	351	0,60	0,40	0,80
	Alc04061215a	0	325	325	0,55	0,45	0,95
	Alc04170150b	70	600	530	0,60	0,40	1,00
	Alc04170210a	0	318	318	0,59	0,40	1,10
	Alc04170210b	320	600	280	0,68	0,40	1,10
Coliseo	Clp05021415a	0	380	380	0,88	0,60	1,30
	Clp05021415b	382	554	172	0,88	0,80	1,30
	Clp05021405a	0	266	266	0,88	0,70	1,50
	Clp05021405b	268	575	307		0,60	1,45
Colegio	Ptd05021255a	57	495	438	1,85	1,30	2,20
Iglesia	Isa05101350b	86	580	494	0,55	0,46	0,63
	Isa05101335a	0	324	324	0,5	0,48	0,70
	Isa05101335b	325	631	306	0,63	0,47	0,7
Univalle	Unv04191100a	0	390	390	1,70	1,67	1,90
	Unv04191100b	392	519	127	1,85	1,80	1,90
	Unv04191125a	0	600	600	1,50	1,30	1,90
	Unv04170340aa	0	470	470	1,75	1,60	1,90
	Unv04170340b	480	621	141		1,60	1,85
	Unv04170310a	0	600	600	1,76	1,40	2,04
	Unv04061415c	76	430	354	1,65	1,40	1,85
	Unv04061400c	184	595	411	1,95	0,40	2,50
	Unv04061340a	0	523	523	1,75	1,60	1,96

Sitio	Señal seleccionada	ti	tf	L	f0	f1	f2
San Antonio	San05101225b	38	599	561	*	*	*
	San05101210b	112	587	475	*	*	*
	San05101145a	0	584	584	*	*	*
	San05101130a	0	415	415	*	*	*

* La relación espectral es plana.

11.5.2 Factor de amplificación.

El cálculo de las amplitudes a partir de los espectros H/V obtenido presentó una alta sensibilidad al tratamiento dado a las señales. Mientras que el periodo no mostró variabilidad al tratamiento, las amplitudes se hacían mayores con ventanas de análisis de menos muestras y viceversa. Las variaciones en la amplitud según el tamaño de las ventanas podía ser de 6 a 12. No se encontraron referencias sobre un tratamiento que mostrara estabilidad en las amplitudes, por lo cual se decidió analizar, sólo con fines demostrativos, las amplitudes relativas con un solo tratamiento.

Los valores calculados corresponden a la amplitud máxima del pico fundamental de vibración, con una ventana de 2048 muestras. Los resultados se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Amplitudes resultantes de las mediciones de Nakamura

Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0	Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0	Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0
Alcalá		San Antonio		Politécnico	
Alc04061200a	6,7	San05101225b	2,5	Ptd05021255a	3,0
Alc04061200c	6,1	San05101210b	2,1	Iglesia	
Alc04061215a	7,0	San05101145a	3,8	Isa05101350b	5,4
Alc04170150bb	3,6	San05101130a	6,5	Isa05101335a	6,1
Alc04170210a	4,1	Univalle		Isa05101335b	4,3

Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0	Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0	Sitio/señal seleccionada	Amplitud de f0
Alc04170210b	4,4	Unv04191100a	6,8		
Coliseo		Unv04191100b	13,2		
Clp05021415a	5,2	Unv04191125a	4,6		
Clp05021415b	7,3	Unv04170340aa	6,0		
Clp05021405a	4,6	Unv04170340b	9,8		
Clp05021405b	4,2	Unv04170310a	5,4		

11.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.6.1 Factor de amplificación.

La revisión del “estado del arte del estudio de las microtrepidaciones” y los resultados obtenidos muestran un claro desacuerdo con respecto a la utilidad de la amplitud y los espectros H/V, en general, y la del pico fundamental en particular (Capítulo 10).

En este trabajo se encontró que el procesamiento de las señales influye drásticamente en los valores de las amplitudes. Éstas son afectadas por (1) el suavizado de la señal – para evitar el efecto de truncado – y (2) por el suavizado de los espectros. En el primero, cuando se utilizan ventanas con menor número de muestras se obtienen amplitudes menores y viceversa. En el segundo, al hacer un promedio de una amplitud con las vecinas, los valores muy altos se disminuyen drásticamente.

Aún cuando el número de mediciones ejecutadas no permite ser concluyente, las amplitudes mostraron una tendencia a valores mayores en mediciones diurnas y menores en nocturnas, excepto por el punto Univalle, que corresponde al más alejado de vías, donde se registraron valores máximos y mínimos sin diferenciar la hora de medición.

Safak (1991), Giraldo (1999) y Camacho (2000) anotan la importancia del tratamiento aplicado a las señales. En este contexto y por la sensibilidad de la amplitud a los diferentes tratamientos utilizados y al nivel de ruido durante las mediciones – mas no del periodo - los resultados obtenidos corroboran lo encontrado por diversos autores: la relación de amplitudes de depósitos inconsolidados con respecto a roca o suelos muy rígidos no se entiende todavía. Mientras que los valores de Alcalá, Iglesia y Coliseo son similares, Coliseo presentó el menor valor y Univalle el máximo, lo que no es comparable con las frecuencias en cada uno de los sitios (Tabla 28).

Tabla 28. Tabla de amplitudes de f_0 con respecto al sitio San Antonio.

Sitio	Amplitud de f_0	Relativa a San Antonio
Alcalá	5,3	2,3
Iglesia	5,3	2,3
Coliseo	3,0	1,3
Colegio	5,3	2,3
Univalle	7,6	3,3
San Antonio	2,3	1,0

11.6.2 Periodos fundamentales.

Los rangos de frecuencias registrados en las mediciones para un mismo sitio fueron promediados y se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29. Periodos resultantes de las mediciones de microtrepidaciones.

Sitio	p_0, s	p_1, s	p_2, s
Alcalá	1,7	1,1	2,2
Iglesia	1,8	1,4	2,1
Coliseo	1,1	0,9	1,4
Colegio	0,5	0,5	0,7

Univalle	0,6	0,5	0,8
San Antonio	--*	--*	--*

* El punto San Antonio no presenta pico fundamental de vibración. La relación espectral H/V es plana para el rango de observación (1-10 Hz), con amplitud alrededor de dos.

En el área de estudio los periodos picos predominantes oscilan entre 1,0 y 1,7 con un rango entre 0,9 y 2,2.

El periodo promedio en Alcalá de 1,7 segundos dió cercano al inferido por Villafañe (1995) de 1,5 segundos a partir de análisis de columnas estratigráficas de suelo y análisis de laboratorio.

Los puntos de medición Iglesia y Alcalá, distanciados 1000 m, presentan rangos y picos fundamentales muy similares, mientras que Coliseo, aunque muy cerca de los anteriores (a 700 m de Iglesia) muestra periodos ligeramente más cortos, entre 0,7 y 1,4 segundos. Las diferencias en el periodo entre estos puntos puede ser debido a una menor profundidad a basamento en Coliseo –mayor cercanía al piedemonte-, o a una influencia geomorfológica, en los puntos Alcalá e Iglesia, por el alineamiento del río Cañaveralejo (§ 5.6).

El punto Colegio presenta periodos de vibración entre 0,5 y 0,7 segundos lo cual podría estar estrechamente ligado a una profundidad a basamento mucho menor que los otros sitios de medición. Este es el sitio más próximo al piedemonte.

Fuera del área de estudio, en el sitio de medición San Antonio, la relación espectral H/V no muestra ninguna frecuencia predominante para el rango de observación entre 0 y 10 Hz. La amplitud de la relación espectral H/V entre 0 y 10 Hz está alrededor de 2 es decir, no hay amplificación. Esto es esperable en terrenos rocosos o suelos duros y consolidados donde no se presenta lo que se conoce como “efecto de sitio”.

Por su parte los datos de Univalle fueron comparados con registros acelerográficos disponibles allí. La información proviene de dos acelerógrafos²⁹ instalados en los bajos de la Torre de Ingeniería de la Universidad. En la Tabla 30 se muestran datos relevantes de los registros, incluido su periodo dominante.

Tabla 30. Aceleraciones registradas en Univalle por sismos

Epicentro	Fecha	Prof. (Km)	Mb.	Epicentro (km)	Periodo dominante (s)	Ref.	Equipo
Cucurrupe	1974:08:24	84	5,7	71,87	0,4	*1	Montana
Tumaco	1979:12:12	24	6,4	400,12	0,5 a 1,0	*1	"
Versalles	1980:06:25	154		82,41	0,5	*1	"
Popayán	1983:03:31	22	5,5	146,50	0,6	*1	"
I. Gorgona	1988:09:03	33	5,7	194,82	0,6	*1	"
Pereira	1995:02:08	70	4,9	72,00	0,45 a 0,67	*2	Guralp
Armenia	1999:01:25	35	5,9	149,30	0,38 a 0,76	*2	"
Calima	1999:01:31	31	4,0	40,30	0,32 a 0,4	*2	"

Ref: *1 Córdoba & Gómez (1987) *2 Archivo digital OSSO (1987-2001)

La Torre de Ingeniería, sobre el cono de Meléndez, dista 5,0 km de la zona de estudio. Los periodos predominantes registrados para los nueve sismos son similares al rango a los periodos de vibración - 0,5 a 0,7 - calculados a partir de la metodología de Nakamura (1989) aun cuando deben estar afectados por los modos de vibración de la estructura.

En general se conoce que los periodos largos o frecuencias bajas indican depósitos profundos mientras que depósitos superficiales blandos y delgados correlacionan con frecuencias altas o periodos cortos (p. ej. Toral *et al*, 1997). La interpretación de los resultados de los periodos de vibración medidos está necesariamente ligada con los factores geotécnicos, la consolidación de los depósitos y su espesor. Según los resultados obtenidos de las mediciones de

²⁹ El primer acelerógrafo, tipo Montana, fue instalado y operado por el Instituto Geofísico de los Andes – IGFA. El segundo instalado y operado por el OSSO es un sensor digital marca Guralp.

refracción sísmica (Capítulo 9) en ninguno de los puntos de exploración se encontró basamento.

En la Figura 76 se aprecia la distribución de los periodos de vibración de los suelos resultantes de la aplicación de la metodología de Nakamura.

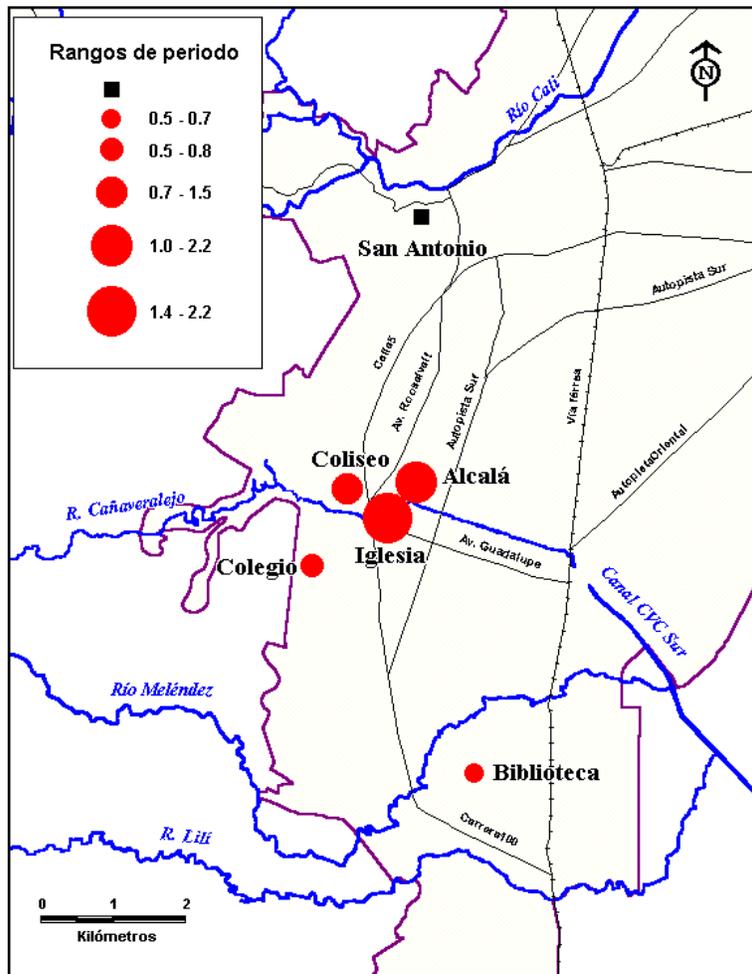


Figura 76. Distribución de los periodos resultantes