

DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE SITIO A PARTIR DE ESPECTROS DE RUIDO COMO ESTUDIO PREVIO A LA INSTALACIÓN DE LA RED LOCAL CARACAS / VARGAS

Raquel Vásquez, FUNVISIS, Angel Díaz, ULA-FUNVISIS y Monika Sobiesiak, FUNVISIS.

Resumen

Estudios de la sismicidad en la región Caracas/Vargas muestran que la mayoría de los sismos registrados se encuentran entre los rangos de magnitudes 2-3.5 e indica una ausencia de eventos de magnitudes inferiores que posiblemente no estén siendo detectados por la red sismológica existente y evidencian la necesidad de instalar una red local que pueda estudiar parámetros importantes como el riesgo sísmico. La red local Caracas/Vargas tendrá 10 estaciones distribuidas alrededor de las principales fallas de la región y la selección de los sitios se realiza a través del análisis de espectros de ruido basados en mediciones de 24 horas, ya que las mismas toman en cuenta todas las posibles fuentes de ruido que pueden afectar la estación durante un día; la finalidad de esta metodología será encontrar aquellos sitios cuyo índice de ruido sea lo más bajo posible en la zona de cobertura de la red y así garantizar una llegada limpia de las ondas sísmicas registradas. Actualmente se encuentra en progreso la generación de los espectros de ruido.

Summary

A study of seismic activity in the Caracas/Vargas region shows the majority of events between magnitude 2 and 3.5. This indicates clearly an absence of smaller events. From this it can be deduced that probably many events have not been detected. This preliminary result of the study of seismic activity in this region clearly emphasizes the necessity of installing a local network to investigate statistical parameters and reliable seismic hazard assessment. The Caracas/Vargas local network will have approximately 10 stations distributed around the main faults of the region and the selection of the sites is made through the analysis of ambient noise spectra based on measurements of 24 hours. This method takes into account all the possible noise sources that can affect the station during a day. At the moment the generation of the noise spectra is in progress.

Palabras claves: Sismología, microsismicidad, red local, espectros de ruido.

Introducción

Estudios en sismología han demostrado que mucha información valiosa puede ser extraída de los estudios de *microsismicidad* (terremotos con $M \leq 3$), (Lay and Wallace, 1995) y de eventos de magnitudes intermedias (magnitudes entre 3 y 5), tal como la estructura geológica de una región determinada, efecto de sitio, campo de esfuerzos locales, cambios dinámicos del campo de esfuerzo y el riesgo sísmico (Lee and Stewart, 1981).

Un elemento crucial en la estimación de la amenaza sísmica, como primer paso para establecer el riesgo sísmico de una región determinada, es la disposición de un catálogo sísmico que se caracterice por contener información recabada de manera homogénea y que tenga un buen nivel de completitud y precisión. Un catálogo con estas características permite llevar a cabo estudios de alta resolución como Tomografía sísmica y del factor Q, que resultaría en un mejor modelo de corteza y estructura tectónica de la región, y la estimación del valor b a nivel zonal que permitiría saber algo acerca de los estados de esfuerzos acumulados actuales de los sistemas de fallas y zonas sísmicas de la región bajo investigación (Sobiesiak, 2000).

Estos catálogos se obtienen a través de monitoreos con sensores de corto período, banda ancha y acelerográficos en conjunto, para tomar en cuenta todo tipo de señales sísmicas que permitan obtener mapas de amenaza sísmica regional y local con un mínimo grado de incertidumbre y que puedan ser transformados posteriormente en normas de construcción sismorresistentes, así como conocer más sobre la estructura tectónica, procesos de ruptura de la fuente y monitoreo de las fallas entre otras.

La *microsismicidad* es crucial en los estudios de amenaza local, sin embargo, en ocasiones los análisis sísmicos en áreas locales muchas veces incluyen eventos con magnitudes negativas, por lo tanto, es importante emplear redes locales (que poseen distancias menores entre estaciones) en estas investigaciones

para garantizar el registro de la energía liberada por esos eventos de pequeña magnitud (Lay and Wallace, 1995).

Los estudios de *microsismicidad* requieren en general un número suficiente de eventos sísmicos, alta densidad de estaciones, una configuración apropiada de la red y una alta precisión en la determinación de hipocentros (Sobiesiak, 2000).

Sismicidad en la Zona Central de Venezuela

La ventana de trabajo se encuentra dentro de la región central de Venezuela, y se delimita entre los 9° y 11° de latitud y los -65° y -68° de longitud, comprendiendo al Distrito Capital, a los Estados Aragua, Miranda, Vargas y parte de los Estados Anzoátegui, Carabobo, Cojedes y Guárico.

La actividad sísmica en la zona de estudio ha sido monitoreada por las estaciones de la Red Sismológica Venezolana de Apertura Continental (RESVAC). En la figura 1 es posible observar que en gran medida la sismicidad en la zona central se encuentra asociada a un sistema de fallas tectónicas principales del tipo rumbo-deslizante dextrales orientados aproximadamente en dirección este-oeste: San Sebastián, Tacagua - El Ávila y La Victoria, que representa el sistema de fallas activas predominantes. También es posible apreciar regiones en donde esta sismicidad se concentra formando cúmulos, como por ejemplo en los alrededores del lago de Valencia y en la zona de cruce de las fallas de San Sebastián y Tacagua-El Ávila al noroeste de Caracas, así como al sur de la isla de La Tortuga. Adicionalmente a este movimiento este-oeste, los mecanismos focales (ver Figura 1) muestran un movimiento de compresión en la dirección norte-sur que es el responsable del surgimiento de la cadena montañosa en la zona central.

En general, la sismicidad es superficial y se concentra en los primeros 40 Km. de profundidad (ver figura 2) y está caracterizada por una alta tasa de microsismicidad y eventos de magnitud intermedia, sin embargo, esta región se caracteriza por albergar varios de los sismos históricos que han azotado a Venezuela en toda su historia (1812, 1900 y 1967 entre otros) (Schubert, 1981).

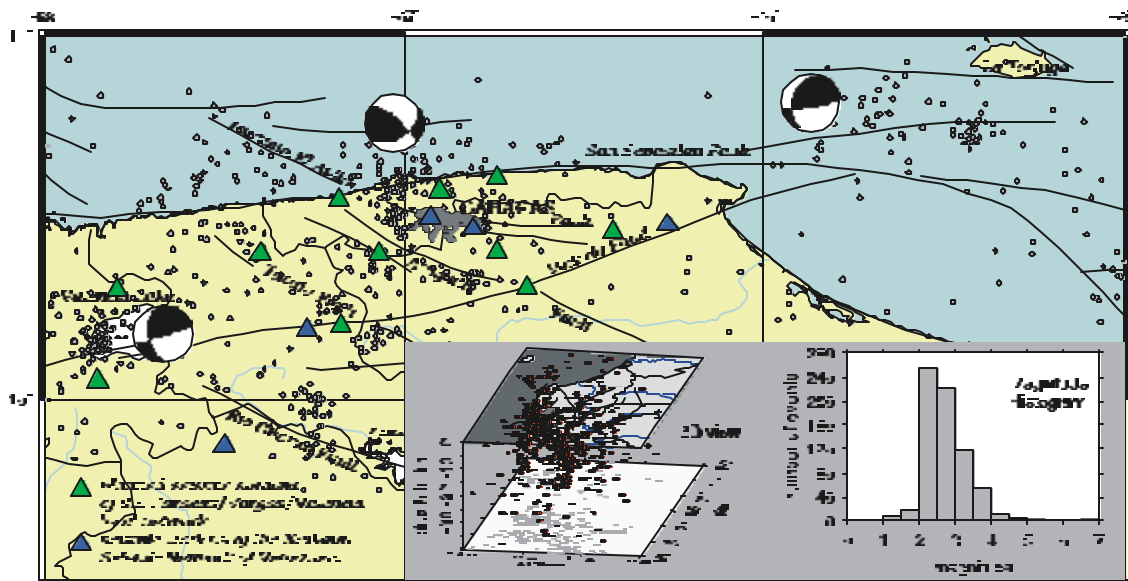


Figura 1: Distribución Espacial de la Sismicidad en la Zona Central de Venezuela, de la red sismológica existente y ubicación preliminar planificada para la Red Local Caracas/Vargas

Con la red de estaciones sismológicas existentes ha sido posible observar estas características de la sismicidad de la zona central, así como obtener una distribución espacial con la profundidad (ver figura 2) en donde se aprecia una tendencia casi vertical de los hipocentros registrados hasta la fecha (Pérez, 1997, Sobiesiak, 2000). Este resultado preliminar es importante pues da una idea acerca de cómo son las orientaciones de las fallas asociadas a esta actividad sísmica con la profundidad también.

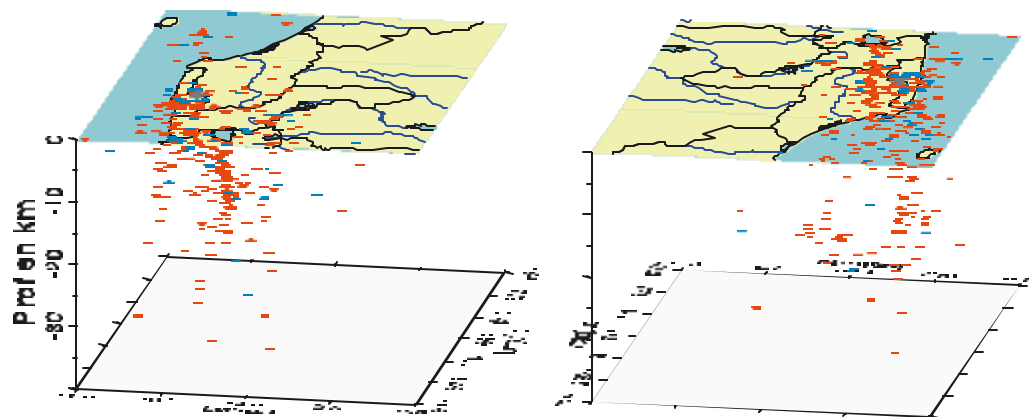


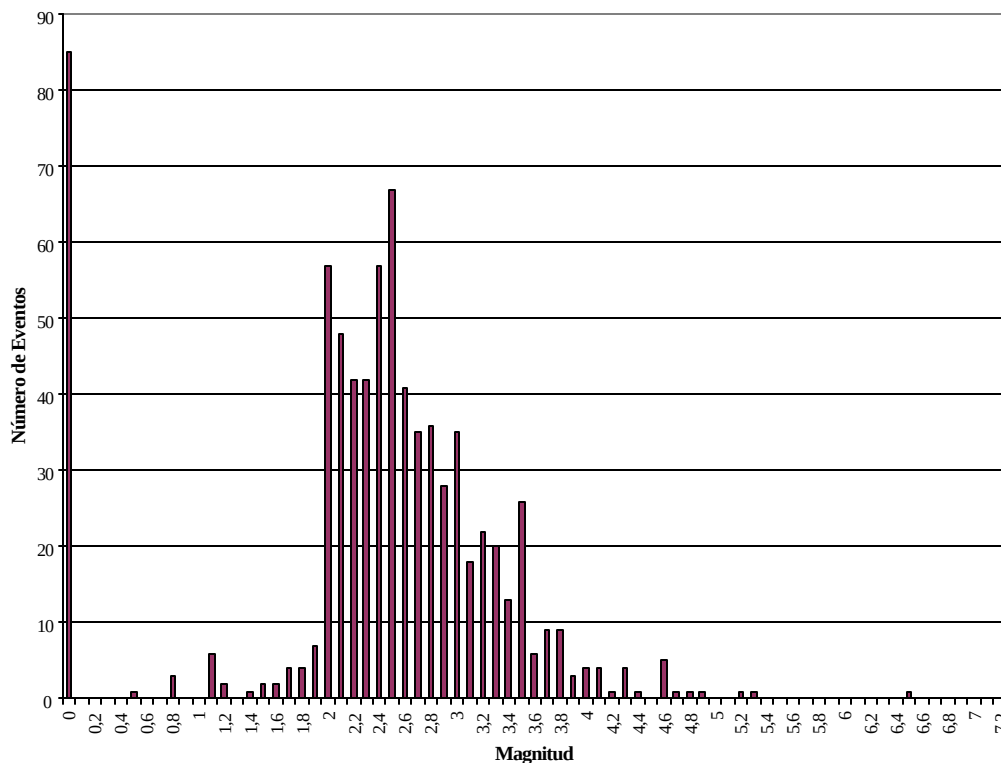
Figura 2: Distribución espacial de la sismicidad en la Zona Central de Venezuela
Base: Funvisis, 1940 hasta Junio 2002

Red Local Caracas/Vargas

Un punto importante del proyecto de modernización de la Red Sismológica Nacional es la instalación de 7 redes locales que respaldarán a la red de estaciones banda ancha en las regiones de mayor concentración poblacional y económica de Venezuela. Cada una de ellas cumplirá tareas específicas asignadas de acuerdo a la región donde sean instaladas, entre ellas la región Caracas/Vargas.

Estudios de completitud del catálogo sísmico en la zona central de Venezuela revelan una insuficiencia de registros microsísmicos (Granado, 2000). En el Histograma 1 es posible observar una ausencia de eventos sísmicos de magnitud inferior a 2 que posiblemente no están siendo detectados por la red sismológica existente. Los microsismos son fundamentales para realizar importantes estudios sismológicos en la región, como las posibles interacciones entre la actividad sísmica y deslizamientos inducidos. Este hecho motivó el mejoramiento de la cobertura de dicha área, densificando el arreglo de las estaciones en la zona con la puesta en marcha del proyecto piloto Red Local Caracas/Vargas.

La meta de este proyecto será obtener la distribución espacial y temporal de la sismicidad registrada en la región central de Venezuela (Caracas/Vargas) con los datos adquiridos por la red local y la red nacional, tomando en cuenta los registros ya existentes y el monitoreo de la sismicidad de fondo, microsismicidad y sismicidad intermedia con la finalidad de estudiar la estructura sismo-tectónica de la región, así como obtener una alta precisión en el cálculo epicentral que pueda asociar la sismicidad registrada a las fallas activas de la zona, lo cual hasta el momento es difícil por la cercanía existente entre las diversas fallas geológicas y la red poco densa (un ejemplo de esto lo presenta la sismicidad al sur de la isla de La Tortuga pues hasta la fecha el cálculo hipocentral de los mismos no es lo suficiente preciso como para establecer con certeza cuál es la falla que los origina en cada caso: San Sebastián o La Tortuga). Otro aspecto importante del proyecto es que la red local podrá estudiar con más precisión la sismicidad cercana a la ciudad capital de Caracas generado por la zona de intersección de las fallas de Tacagua – El Ávila y San Sebastián.



Histograma 1: Magnitudes Vs Número de Eventos en la Zona Central de Venezuela.
Base: Funvisis, 1940 hasta 15-06-2002

En la figura 2 es posible observar los sitios probables donde se colocarán las estaciones sismológicas de la Red Local Caracas/Vargas, así como la red existente hasta la fecha. El proyecto se encuentra en progreso y aún se están estableciendo los sitios más adecuados para instalar las estaciones (aquellos cuyos índices de ruido sean los más bajos posibles en el rango de la microsismicidad). En la Tabla 1 se puede observar los lugares visitados hasta el momento, y sus coordenadas geográficas.

Metodología

El proceso de selección de los sitios más adecuados para la instalación de la Red Local Caracas/Vargas se basa en el estudio de parámetros importantes como geología, topografía, condiciones climatológicas, accesibilidad a los sitios, posibilidad de transmisión de los datos y las fuentes de ruido sísmico de los lugares de interés previamente seleccionados. Un punto importante de este trabajo consiste en el estudio de los niveles de ruido en la determinación de la calidad de estos lugares a través del análisis de espectros para determinar el comportamiento del ruido y seleccionar aquellos que presenten una buena relación *Señal/Ruido*.

Los espectros se realizaron a partir de mediciones hechas con sismómetros Guralp de corto período con tres componentes (modelo CMG-40T-1), similares a los que se utilizarán en la Red Local Caracas/Vargas. El modo de registro fue continuo y la tasa de registro fue igual a 100 muestras por segundo.

El proceso consistió inicialmente en hacer pruebas de sólo 30 minutos, que posteriormente fueron extendidas a 24 horas para poder tomar en cuenta todos las fuentes de ruido que pueden afectar la estación durante un día completo y su posterior cambio de formato ORION (Nanometrics, Inc) a formato ASCII.

Desde el punto de vista matemático, los datos iniciales ya transformados se ajustan a una función arbitraria $f(t)$ a la cual se le pueda aplicar una transformada de Fourier de la forma:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w) e^{iwt} dw \quad (1)$$

$$F(w) = |A(w)| e^{i\phi(w)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-iwt} dt \quad (2)$$

Que finalmente genera un espectro de ruido (ver Figura 3), al representar funciones de tiempo transitorias como funciones en el dominio de la frecuencia. En la ecuación (2) w es la frecuencia angular, $A(w)$ es la amplitud de cada componente armónico y $\phi(w)$ es la correspondiente fase de cambio. Los espectros de Fase y Amplitud son necesarios para proporcionar una serie completa de tiempos.

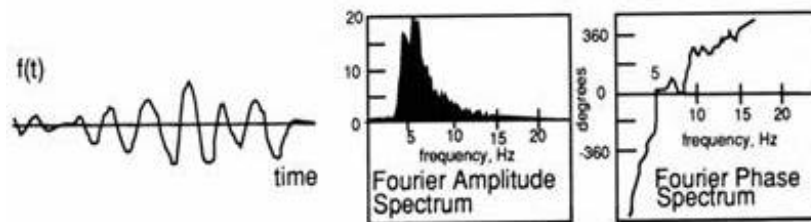


Figura 3: Esquema de datos en función del tiempo y sus equivalentes espectros de Fourier (Lay and Wallace, 1995)

Como la integral (1) es una suma, entonces una serie de tiempos de movimientos arbitrarios del suelo pueden ser expresados como una suma de funciones periódicas. Esto es posible si los alineamientos de la amplitud y la fase de los términos armónicos sean escogidos apropiadamente y la suma se haga sobre la distribución continua de las funciones armónicas (Lay and Wallace, 1995).

En la práctica estas transformaciones se realizaron a través del software *PWS.FOR* (Rendón, 2000) y los datos en el dominio de la frecuencia fueran graficados en el programa *GMT (Generic Mapping Tools)* para su posterior análisis.

Resultados

La selección de los sitios más adecuados para la red local, cuya función es el registro de eventos de pequeña magnitud o microsismos ha sido un proceso largo y complicado por la gran cantidad de población que habita la zona de cobertura de la red que representa una fuente de ruido importante, por la inseguridad que esto implica para el equipo ha instalar y una densa topografía sumado a la inestabilidad del terreno. La ubicación preliminar de los lugares antes mencionados se basaron en estas y otras consideraciones ya mencionadas antes, sin embargo, los espectros de ruido varias veces no arrojaron resultados alentadores en cuanto a la calidad de los mismos

El algunos casos ha sido necesario cambiar la ubicación de alguno de estos sitios por la cercanía que poseen con ríos, quebradas y carreteras, como el caso de Araira (ver Figura 4) que aunque se encuentra alejado de centros poblacionales, posee un bajo nivel de ruido en el rango de frecuencia inferior a 2 Hz pero vemos como éste aumenta bruscamente en las altas frecuencias (mayor a 2 Hz) originado posiblemente por una carretera cercana a aproximadamente 50 metros del lugar de la medición. El tráfico automotor puede ocasionar una aumento de 10 a 20 dB de los niveles de ruido normales (Bormann, 2001).

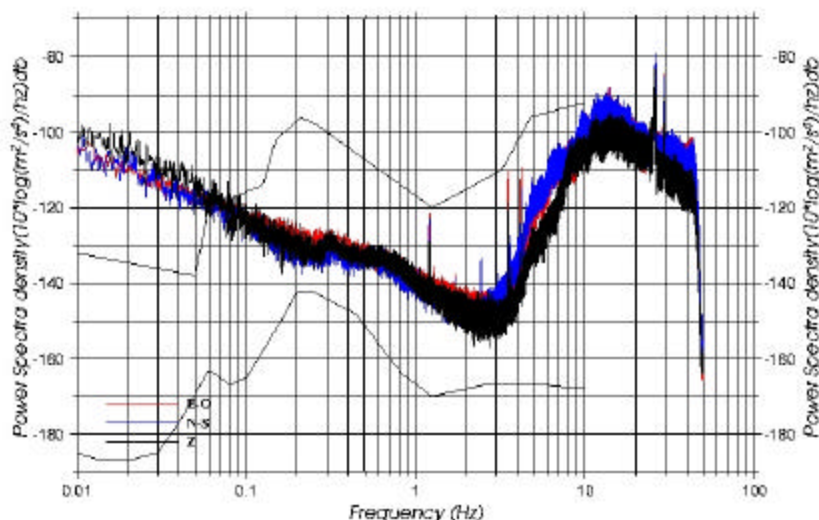


Figura 4: Espectro de una medición de 15 horas en Araira. Fecha: 05-06-2002.

La seguridad de una estación es un punto importante a la hora de la selección, es por esto que un lugar probable para la instalación de una de las estaciones es el IVIC (Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas), en el Km 16 de la carretera Panamericana, Edo. Miranda. Sin embargo, el espectro generado de las mediciones indica altos niveles de ruido, sobretodo en las componentes E-O y N-S (ver Figura 5). El bajo nivel de población y posibles fuentes de ruido en la gran extensión del territorio que ocupa el IVIC, alejado además de otros centros poblados podría indicar una selección poco adecuada del sitio de la medición dentro del mismo (cercano a torres alta tensión, cuyos campos electromagnéticos son una fuente importante de ruido también).

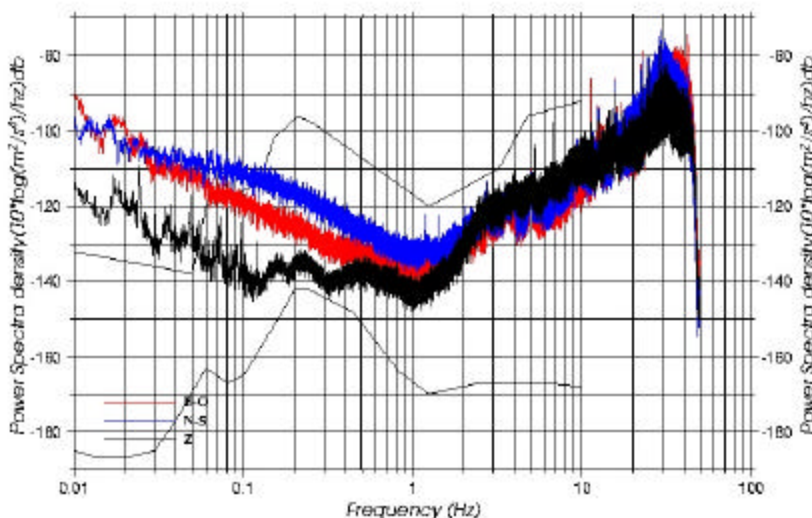


Figura 5: Espectro de una medición de 24 horas en IVIC (Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas). Fecha: 03-11-2001.

La abrupta topografía también ha dificultado encontrar un lugar adecuado para instalar las estaciones en la costa, al norte de la ciudad de Caracas. La propagación de las ondas sísmicas en la cimas de montañas como el Ávila, con grandes pendientes, así como en valles profundos es muchas veces impredecible y posee una desfavorable influencia sobre las ondas y sus amplitudes por la infinidad de reflexiones que sufren en su viaje hacia la cima, o desde la cima hasta los valles (Bormann, 2001). Quizás esto sea la razón de los altos niveles de ruido en la medición de Castillo de Cumbres, ubicada en el “Camino de los Españoles”, Parque Nacional El Ávila (ver Figura 6), sobretodo en la componente Z.

En la Figura 6 también es posible observar las variaciones de los niveles de ruido durante el día y la noche, ocasionado por el cambio de las mareas terrestres y las diferencias de temperatura, siendo este cambio más pronunciado en las componentes N-S y E-O.

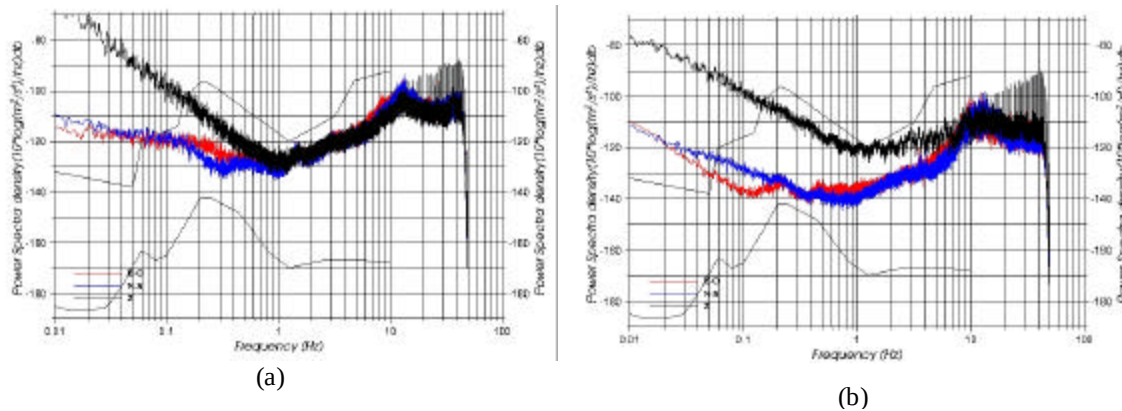


Figura 6: Castillo de Cumbres, Parque Nacional el Ávila. (a) Espectro de 8 horas realizado durante el día (8 a.m. a 4 p.m.) (b) Espectro de 8 horas realizado durante la noche (8p.m. a 4 a.m.). Fecha: 02-11-2001

El ruido sísmico posee grandes variaciones dependiendo de la estación del año y las diferencias entre el día y la noche (el ruido durante el día puede aumentar en un orden de entre 10 y 12 dB con respecto a la noche) (Bormann, 2001). Venezuela, por ser un país tropical, no posee cambio de estaciones como Invierno y Verano, por lo tanto, no sufrimos de cambios bruscos de temperatura que puedan afectar dramáticamente el ruido de las estaciones, sin embargo, las condiciones climatológicas locales como viento, lluvia y tormentas eléctricas son una fuente importante de ruido a considerar. Un ejemplo de esto lo presenta la medición hecha en Tinaquillo (ver Figura 7), en donde se puede ver claramente el aumento de los niveles de ruido con lluvia y sin ella para la componente Z.

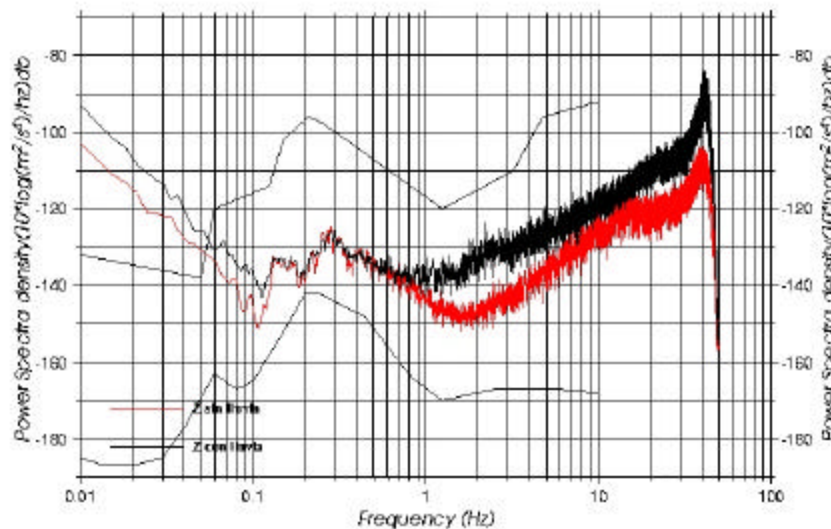


Figura 7: Espectro de 1 hora en Tinaquillo, con lluvia y sin lluvia. Fecha: 17-09-2002

Conclusiones y Recomendaciones

Como se mencionó anteriormente, encontrar aquellos lugares en los que se pueda lograr un equilibrio entre bajos niveles de ruido y alto grado de seguridad para las estaciones de la red representa un gran reto para el proyecto.

Basados en los resultados del análisis de los espectros de ruido, algunos de los 10 lugares previamente seleccionados han demostrado no ser muy adecuados por sus altos niveles de ruido, sin embargo, hay

atenuantes que deben ser consideradas también, como el caso de IVIC, en donde un cambio del lugar de la medición dentro del mismo instituto podría arrojar mejores resultados.

Lugares altamente poblados y de gran tráfico de vehículos como Junquito no son recomendados para instalar estaciones por el gran nivel de ruido que esto generaría en los registros de las ondas sísmicas.

Sería recomendable repetir algunas de las mediciones tomando en cuenta puntos importantes como: (1) enterrar y tapar los equipos durante largos períodos de medición por las consecuencias que los factores climáticos como viento y lluvia pueden tener sobre el registro del ruido; (2) dejar reposar al sensor al menos una hora antes de comenzar el proceso de registro para permitir que su masa interna esté en un estado absoluto de inmovilidad producto de su transporte al sitio; (3) Durante el período de registro, ninguna persona debe estar o caminar cerca del sensor. Se debe estar alejado al menos 10 metros del equipo, estar sentado y absolutamente quieto; (4) La medición debe ser hecha lo más alejado posible de fuentes de ruido importantes como carreteras, ríos, cascadas, lagos, aeropuertos, océano, maquinaria pesada, ciudades, grandes árboles, líneas de corriente eléctrica, etc; (5) Es recomendable hacer diversas mediciones para estudiar variaciones del ruido durante el día y la noche; (6) Es importante llevar un registro de sucesos trascendentes que pudieran afectar al registro como el paso tráfico, paso de ganado, etc (7) Si la medición es de corto tiempo, y siempre que sea posible, colocar el sensor sobre una superficie rocosa; (8) Asegurar una buena nivelación del sensor, así como su correcta orientación con respecto a las coordenadas gráficas (N-S, E-O); (9) Es imprescindible que la hora interna del equipo de medición esté sincronizada con respecto a la hora local o mundial.

Bibliografía.

Bormann, P., 2001. New manual of seismological observatory practice. GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany.

Granado, C., 2000. Determinación de la magnitud de completitud y parámetros de la relación Gutenberg-Richter para catálogos sísmicos venezolanos en el período 1990-1999. Tesis para obtener el título de pregrado. FUNVISIS, Caracas.

Lay, T. and Wallace, T.C., 1995. Modern Global Seismology. Academic Press, New York, Volume 58, 521 pp.

Lee, W.H.K. and Stewart, S.W., 1981. Principles and Applications of micro earthquakes networks. Academic Press, New York.

Pérez, O., Sanz, C., Lagos, G., 1997, Microseismicity, tectonics and seismic potencial in southern Caribbean and northern Venezuela, Journal of Seismology, pages 15-28.

Peterson, J., 1993. Observations and modeling of seismic background noise. U.S.Geol. Survey Open-File Report, 93-322. 95 pp.

Schubert, C., 1981, Los terremotos en Venezuela y su Origen, Editorial Cuadernos Lagoven. 72 pages.

Rendón, H., 2000, Site Survey Report Secondary Seismic Stations AS118 (Puerto La Cruz – Venezuela), FUNVISIS, 36 pages.

Sobiesiak, M., 2000. Seismicity in the Central Coastal Region of Venezuela and the Caracas/Vargas Local Network. Taller Internacional “Estudios de métodos y acciones para contrarrestar los efectos producidos por terremotos en Caracas (1999-2001). Serie Técnica N° 1, 176-180. Caracas.

Tabla 1.- Ubicación de los sitios escogidos como posibles estaciones sismológicas de la Red Local Caracas/Vargas.

Estación	Lugar	Coord. GPS	Medición	Situación
Test	FUNVISIS El Llanito	N 10,46963° W 66,80990°	-----	Por Instalar
Salmerón	Vía Araira Salmerón	N 10,45842° W 66,41983°	24 horas	Por Procesar
Kempis	Kempis	N 10,40610 W 66,74570°	30 minutos	Procesado Por Analizar
Naiguatá	Naiguatá	N 10,60981° W 66,74570°	Red Temporal	Por Procesar
La Pereza	Embalse La Pereza	N 10,43986° W 66,74102°	Red Temporal	Por Procesar
Santa Lucía	Pueblo de Santa Lucía	N 10,3083° W 67,0361°	24 horas	Lugar por Ubicar
Ocumarito	Ocumare del Tuy	N 10,11594° W 66,79905°	24 horas	Por Procesar
Galipán	San José de Galipán	N 10,57400° W 66,90335°	24 horas	Procesada Problemática
Castillo Cumbres	Castillo de Cumbres	N 10,54307° W 66,95157°	Red Temporal	Por Procesar
Macarao	Macarao (Alcabala)	N 10,42742° W 66,03927°	Red Temporal	Por Procesar
Junquito	El Junquito	N 10,47233° W 67,01328°	Red Temporal	Por Retirar y Procesar
IVIC	IVIC	N 10,3997° W 66,9852°	Red Temporal	Procesada Remedición
Oricao	Club Oricao	N 10,5502° W 67,1836°	Red Temporal	Por Procesar
Morocopo	Morocopo Tejerías	N 10,2033° W -67,1759°	Red Temporal	Por Retirar y Procesar