



PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO PARA OBTENER ESPECTROS ELÁSTICOS CON DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO COMPATIBLES CON LA AMENAZA SISMICA

RESUMEN

Se propone un procedimiento que permite preparar espectros elásticos para diferentes períodos de retorno con base en el análisis estadístico de las intensidades espectrales y un modelo de Poisson sin memoria. Para garantizar la robustez de la base de datos empleada también se utiliza el modelo de Poisson y la sismicidad de la zona para obtener la distribución de las magnitudes. El procedimiento utiliza el concepto de vida útil para aplicar el modelo de Poisson y calcular las aceleraciones a las cuales corresponden los distintos períodos de retorno. Los espectros elásticos así calculados resultan homogéneos y no presentan potenciales desviaciones en los valores de la probabilidad de excedencia de las ordenadas espectrales. Adicionalmente, debido a su formulación, el procedimiento propuesto también permite verificar si la data utilizada para obtener los espectros elásticos se ajusta a la amenaza sísmica del sitio estudiado. Finalmente, en este trabajo se presentan algunas estadísticas de las ordenadas espectrales y de la proporcionalidad entre espectros con distintos períodos de retorno.

Palabras clave: espectros elásticos de diseño, períodos de retorno, comparación, análisis de amenaza sísmica

■ Echezuría, Heriberto
e-mail: heriberto.echezuria@yvsite.com
Universidad Católica Andrés Bello
Caracas, Venezuela 2011

Fecha de Recepción: 23 de Marzo de 2011
Fecha de Aceptación: 13 de Mayo de 2011

STATISTICAL PROCEDURE TO OBTAIN ELASTIC DESIGN SPECTRA WITH DIFFERENT RETURN PERIODS COMPATIBLE WITH THE SEISMIC HAZARD

ABSTRACT

A procedure that allows the preparation of elastic response spectra based on the statistical analyses of the spectral intensities and a Poisson model without memory. To guaranty the robustness of the data base, the Poisson model is also used along with the seismicity of the area, in order to obtain the distribution of the magnitudes. The procedure uses de concept of lifespan in order to apply the Poisson model to calculate the accelerations which correspond to the different return periods. The elastic spectra calculated in such a way are homogeneous and do not have any deviations related to the probability of exceedance of the spectral accelerations. In addition, due to its formulation, the procedure also allows to verify if the data used to obtain the elastic spectra is in agreement with the seismic hazard of the site under study. Finally, in this article some particular statistic corresponding to the different spectral ordinates as well as to the proportionality between spectra with different return periods are presented.

Keywords: elastic design spectra, return period, seismic hazard analysis

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha hecho más común la microzonificación sísmica con la propuesta de espectros de diseño elásticos particulares para la zona en estudio. Como parte del proceso de microzonificación, se utilizan bases de datos de acelerogramas de sismos reales o de estudios de respuesta dinámica de sitios. Dichas bases de datos constituyen una familia de espectros elásticos a partir de los cuales es necesario definir los espectros correspondientes a distintos períodos de retorno con el objeto de aplicarlos en el diseño de las estructuras.

El procedimiento propuesto en este artículo consiste en el análisis estadístico de las ordenadas espectrales de esa familia de espectros para definir los espectros correspondientes a los distintos períodos de retorno. Adicionalmente, el método propuesto permite estimar la

amenaza sísmica del sitio con base en la data utilizada y compararla con la amenaza sísmica convencional del sitio estudiado. Esto permite verificar la robustez de la base de datos seleccionada con respecto a las características de la provincia sísmica.

Una vez constituida, la base de datos para la generación de espectros elásticos luce tal como se ilustra en la Fig. 1 para las poblaciones de Caicara [1] y Cariaco [2] con perfil geotécnico S3. Estas poblaciones son representativas de las zonas sísmicas 1 y 7, respectivamente, de la norma COVENIN 1756-2001 [3]. Es decir, estaremos trabajando con las zonas de menor y mayor sismicidad en Venezuela.

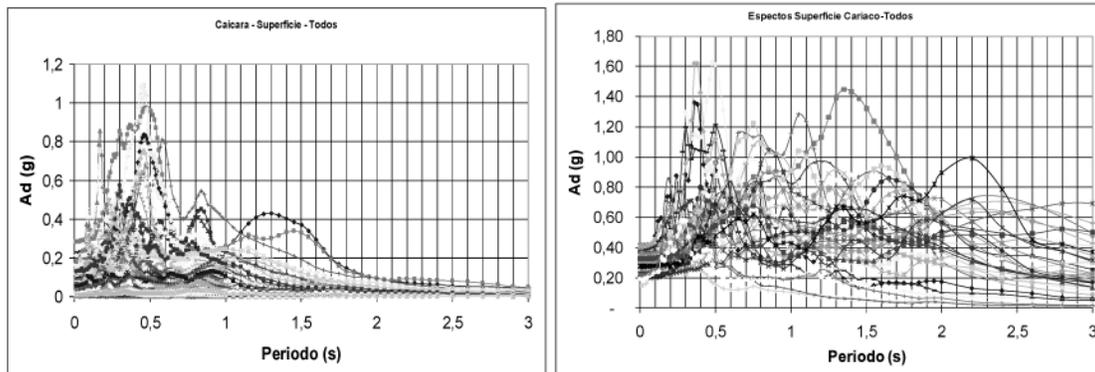


Fig. 1 Familia de espectros de respuesta en superficie para las poblaciones de Caicara (zona sísmica 1) y Cariaco (zona sísmica 7), ambos para perfil geotécnico, S3.

Ahora bien, debido a razones económicas y por la dificultad de obtener acelerogramas en distintos perfiles geotécnicos, la base de datos siempre resulta limitada. Esto contrasta con los estudios probabilísticos de amenaza sísmica, los cuales realizan un análisis exhaustivo de las fuentes sísmicas en el sitio y toman en cuenta tanto la tasa de generación de sismos de cada fuente con la magnitud como la atenuación de las aceleraciones con la distancia de la zona activa de dicha fuente hasta el sitio en estudio.

Si consideramos la ocurrencia de las intensidades como un proceso de Poisson sin memoria, la probabilidad de excedencia anual de una aceleración dada puede ser aproximada al inverso del período de retorno, PR. Es decir, la misma puede ser considerada como la tasa promedio de ocurrencia de dicha aceleración. Esto constituye la base para la aplicación del procedimiento

estadístico aquí presentado pues permite utilizar el modelo de Poisson para obtener las probabilidades de excedencia de las intensidades para, posteriormente, identificar las aceleraciones espectrales a las cuales corresponde dicha probabilidad.

La identificación de las intensidades correspondientes a cada período de retorno se realiza mediante el análisis estadístico de las colas de las funciones densidades de probabilidades de las ordenadas espectrales para cada período de oscilación, T_i , seleccionados para definir el espectro elástico.

2. MÉTODO PROPUESTO PARA ESTABLECER LOS ESPECTROS ELÁSTICOS CON DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO

A continuación se describe el método propuesto basado el proceso de Poisson. La formulación conceptual original fue hecha por el autor en un trabajo anterior [4]. Partiendo del hecho de que podemos considerar el proceso de ocurrencia de las intensidades como un proceso de Poisson sin memoria, la probabilidad de exceder un valor cualquiera, a , de una aceleración espectral un número de veces determinado, k , durante un lapso de tiempo determinado, t , se calcula utilizando la siguiente expresión [5]:

$$F_{(ai \geq a)} = 1 - [(e^{-\lambda t}) (\lambda t)^k / k!] \quad \dots(1)$$

Donde: $F_{(ai \geq a)}$ es la probabilidad de exceder el valor de una aceleración cualquiera, a ; $(e^{-\lambda t}) (\lambda t)^k / k!$ corresponde al proceso de Poisson, es decir, la probabilidad de no exceder un número de veces determinado, k , la aceleración, a , en el lapso de tiempo, t ; con, λ , igual a la probabilidad de excedencia anual de la aceleración, a . Nótese que para calcular la probabilidad de excedencia $F_{(ai \geq a)}$ se debe fijar $k=0$.

Una vez calculada la probabilidad de excedencia para el período de retorno de interés, dada por la ecuación (1), con λ igual al inverso de dicho período de retorno, es posible utilizar las funciones densidades de las aceleraciones espectrales para hacer una análisis estadístico a la inversa e identificar a cuál aceleración corresponde la probabilidad asociada con dicho período de retorno.

En la Fig. 2 se muestran las curvas de distribución de probabilidades acumuladas (CDF) en función de los períodos de retorno, para vidas útiles de 30, 60 y 100 años. Nótese en esa misma figura que la influencia de la vida útil comienza a ser cada vez menor para valores altos del período de retorno.

De acuerdo con la Fig. 2, para valores del período de retorno por encima de los 475 años el proceso de Poisson proporciona probabilidades acumuladas entre 80% y 88%, si consideramos vidas útiles entre 60 y 100 años. Adicionalmente, cuando estamos por encima de los 475 años se reduce significativamente la influencia de la vida útil en la función de probabilidades acumuladas del proceso de Poisson. Véase la Fig. 2. En consecuencia, es posible realizar los cálculos para la aplicación del modelo con una vida útil entre 50 y 60 años. Esos valores de la vida útil resultan compatibles con la mayoría de los proyectos de ingeniería.

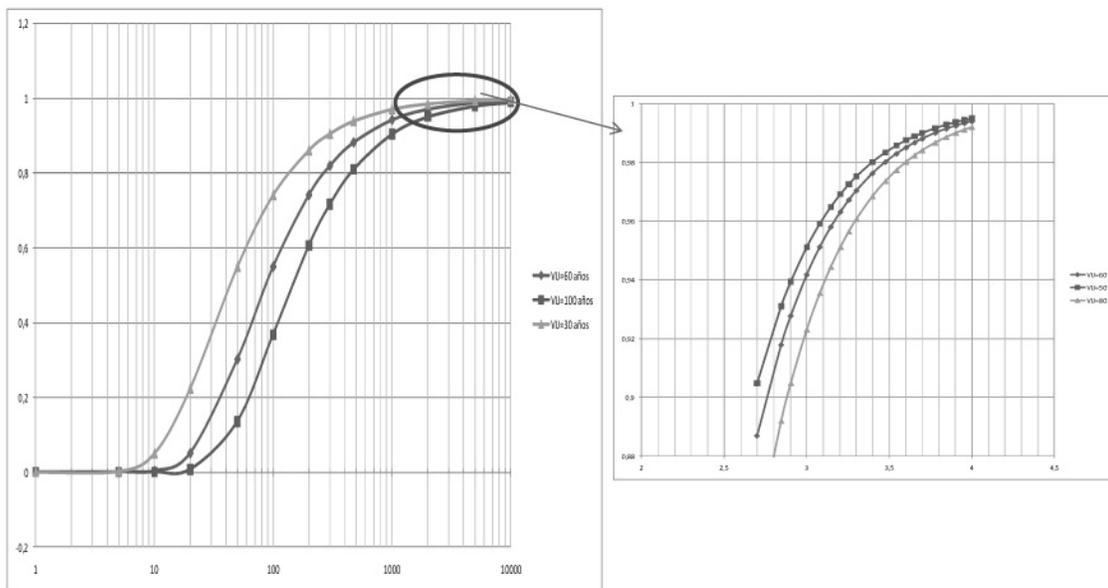


Fig. 2. Distribuciones de probabilidades acumuladas (CDF) en función del PR para un proceso de Poisson con vidas útiles, t , iguales a 30, 60 y 100 años, respectivamente. En la Fig. 2.a el eje de las abscisas está en escala logarítmica. En la Fig.2.b se muestra un detalle de la cola superior de la distribución de probabilidades por encima del 80% con el eje de las abscisas transformado en lineal al utilizar el logaritmo de la variable.

Ahora bien, considerando que los 475 años corresponden a una distribución de probabilidades acumulada por encima del 84% en promedio, el análisis estadístico para definir los espectros con períodos de retorno mayores estará cada vez más cercano a la cola superior de la función de probabilidades acumulada, CDF. En este sentido es bueno destacar que el autor ha realizado el tratamiento de las colas de las ordenadas espectrales

con tres métodos diferentes [6], a saber, i) utilizando el histograma crudo de las ordenadas, ii) realizando un cambio de variables y normalizando la función de probabilidades acumulada de las ordenadas a un proceso de Poisson y iii) con un cambio de variable y ajustando la distribución de probabilidades acumulada de las ordenadas espectrales a una función exponencial con ajustes de regresión lineal. Esto se ilustra en las Figs. 3 y 4 para las poblaciones de Caicara y Cariaco, respectivamente.

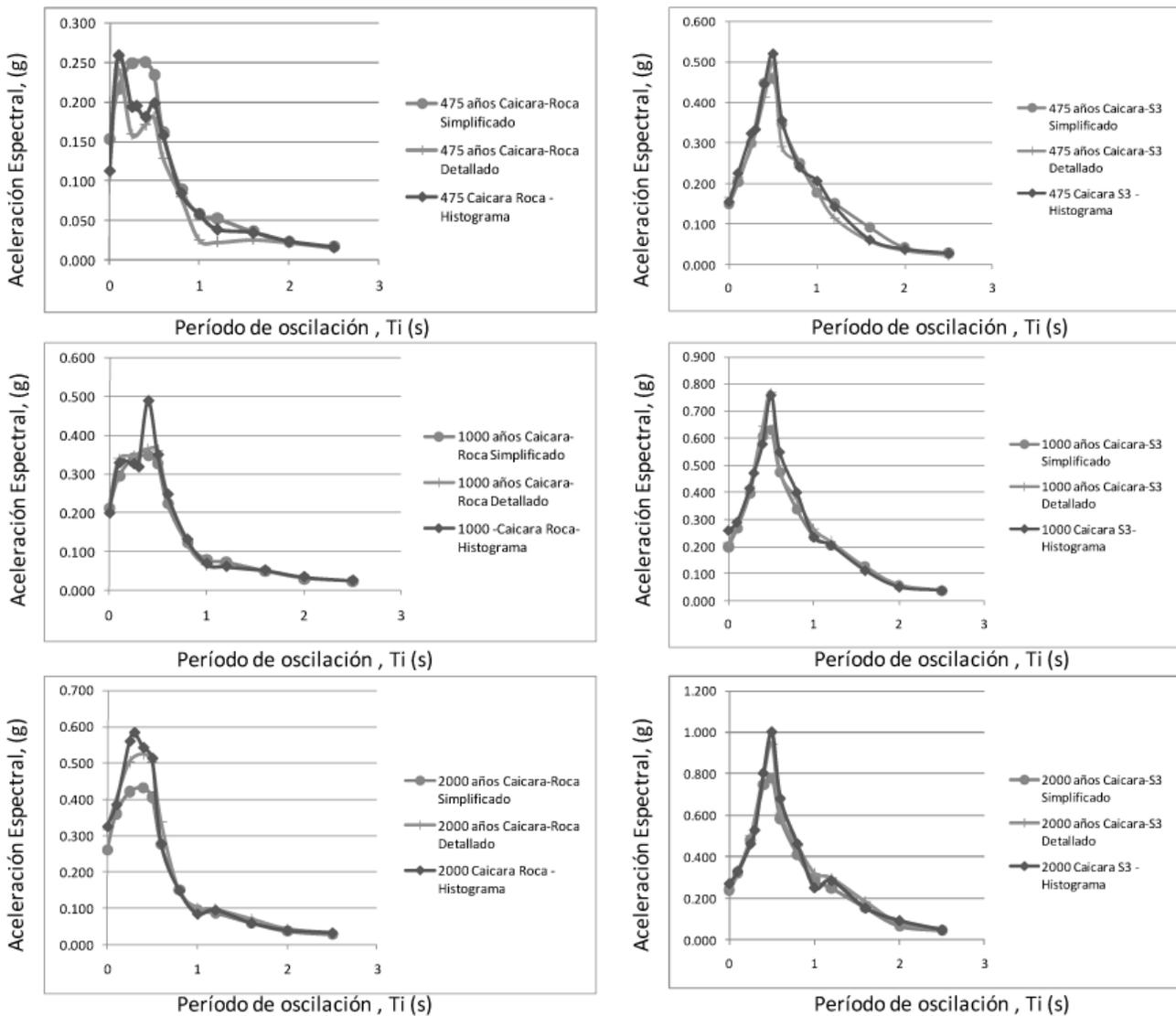


Fig. 3 Comparación de espectros obtenidos con los tres métodos de análisis estadístico para roca y perfil S3 en Caicara.

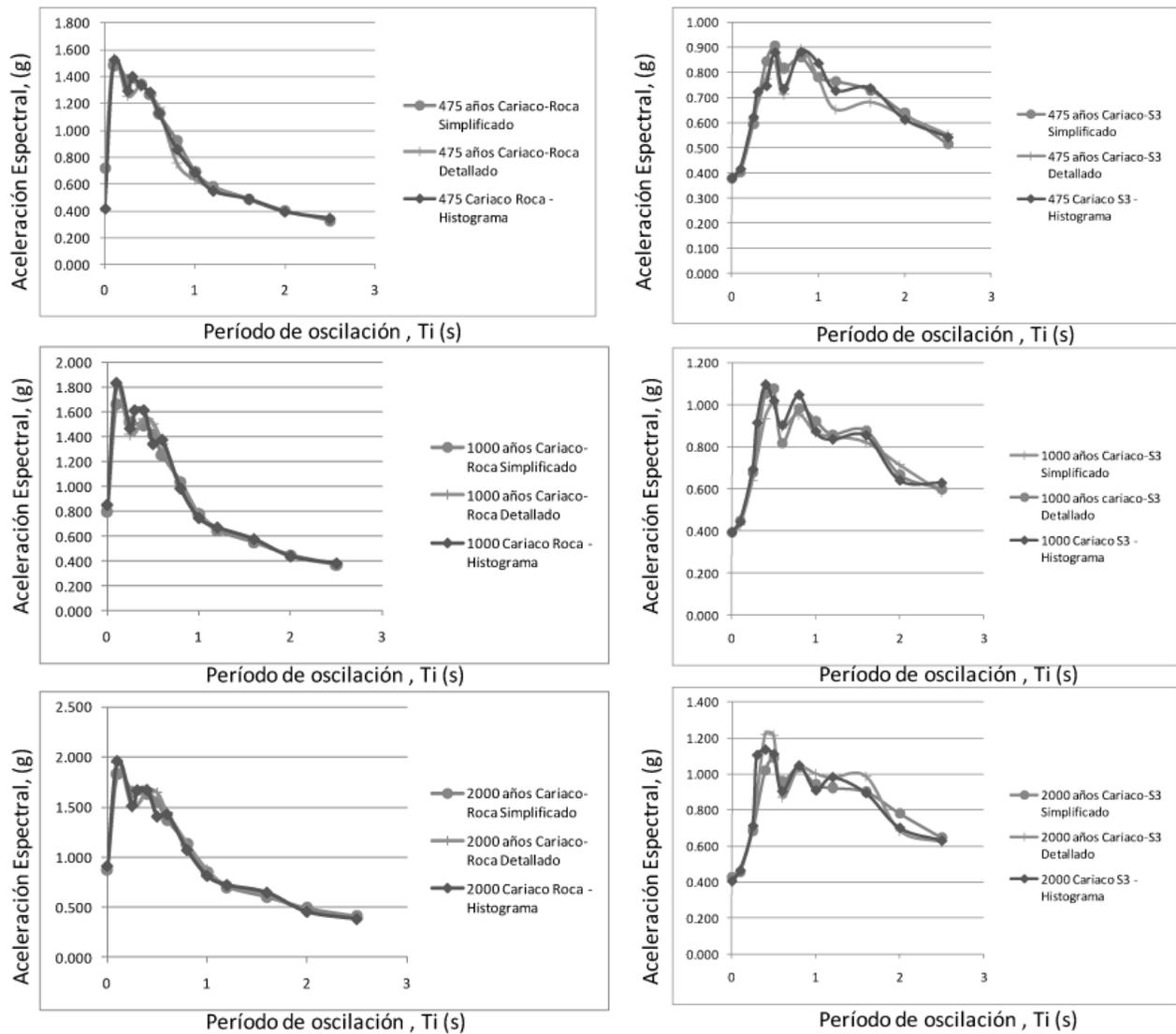


Fig. 4 Comparación de espectros obtenidos con los tres métodos de análisis estadístico para roca (a) y perfil S3 (b) en Cariaco.

Como se observa, los tres métodos de análisis de las colas de las distribuciones de probabilidades producen valores muy parecidos de las aceleraciones correspondientes a los períodos de retorno. Esto permite concluir que el tratamiento de las colas es bastante robusto en relación con la definición de las intensidades correspondientes a los períodos de retorno considerados [6].

2.1 Preparación de la Base de datos

En general las bases de datos utilizadas para proponer espectros elásticos deben tener en consideración

aspectos tales como: a) que los registros provengan de fuentes similares a las que se consiguen en la provincia sísmica en estudio, es decir, los mecanismos generadores de sismos deben ser congruentes, b) que las distancias entre el sitio donde fueron obtenidos los registros y las fuentes también sean representativos de las condiciones en la provincia sísmica en estudio, c) que la base de registros sísmicos a utilizar tome en cuenta la recurrencia de cada una de las fuentes en la amenaza del sitio en estudio y d) que el número de eventos por magnitud a emplear en el estudio se ajuste

a la distribución de probabilidades de las magnitudes de las distintas fuentes.

Ahora bien, cuando se constituyen las bases de datos para la preparación de espectros de respuesta elásticos existe la tendencia a utilizar las magnitudes medias a altas de cada fuente. Esto resulta en la sobreestimación de los espectros así propuestos. Es bueno destacar, además, que el número de acelerogramas *per se* tampoco es suficiente para definir una base de datos adecuada.

Para que el número de eventos a utilizar en cada magnitud sea representativo de la amenaza local debemos apoyarnos en la siguiente expresión dada por McGuire y Arabaz [7] donde se toma en cuenta la sismicidad y los posibles límites superior e inferior para las leyes de recurrencia:

$$F_M(m) = 1 - \exp[-\beta(m - m_0)] / 1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)] \quad (2)$$

donde:

$F_M(m)$ es la función de distribución acumulada de la magnitud, β , es la pendiente de la ley Gutenberg-Richter con límites superior m_{\max} e inferior m_0 y m es la magnitud en consideración.

Alternativamente, se puede emplear el modelo de Poisson dado en la ecuación (1) [8] para establecer la distribución de probabilidades acumuladas de las magnitudes y de allí definir el número de eventos a considerar en el estudio de respuesta dinámica. En este caso hay

que utilizar el parámetro, λ , como la tasa promedio de ocurrencia de cada magnitud de acuerdo con la ecuación (3) abajo.

$$\lambda_m = 10^{(a - bm)} = e^{(a - bm) \ln 10}$$

donde, a y b son los parámetros de la ley de recurrencia mostrados en la Fig. 5. Nótese la relación entre b y β en la ecuación (3).

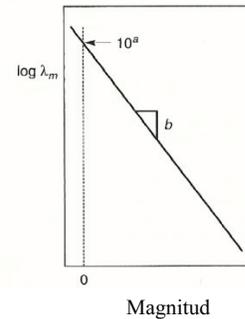
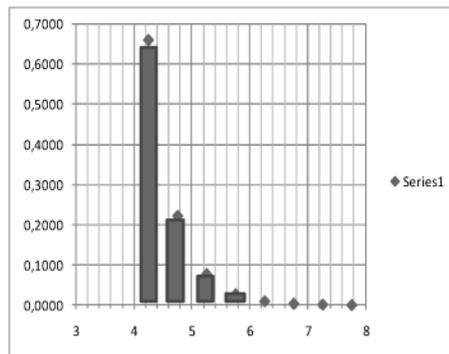
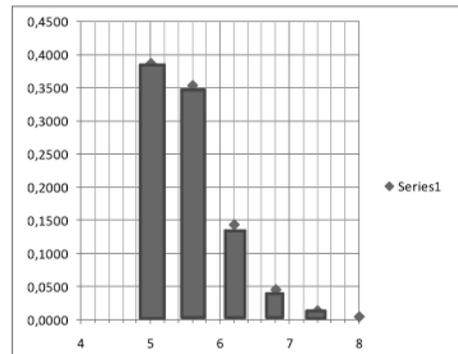


Fig. 5. Ley de recurrencia sísmica indicando el significado de los parámetros a y b .

Las expresiones anteriores resultan en distribuciones exponenciales para las magnitudes, tal como se ilustra en la Fig. 6.



A)



B)

Fig. 6 Funciones densidades típicas de las magnitudes para dos fuentes con diferentes sismicidades. A) Considerando límite inferior e inferior para las magnitudes y B) Considerando solamente límite inferior para las magnitudes.

Lo importante de este razonamiento es la necesidad de guardar la debida proporcionalidad entre los números de registros para las magnitudes empleadas y las distancias al sitio. Si consideramos únicamente las magnitudes altas el resultado del análisis no corresponderá con lo

esperado en el sitio de acuerdo con la sismicidad de la provincia.

Para ilustrar cualitativamente el impacto del número de eventos en una base de datos compararemos la base de datos empleada en Caicara, mostrada en la Tabla

1, y una base de datos idealizada para el suroriente de Venezuela estimada por el autor, la cual es mostrada en la Tabla 2.

Nótese que, si evaluamos la cantidad de eventos en los rangos de magnitudes utilizados en la base de datos de Caicara veremos que para el rango de magnitudes 5,0

$< M < 6,2$ tenemos 15 eventos que constituyen el 44% de la base. Por el contrario, para el rango de magnitudes $6,2 < M < 7,6$ se tienen 19 eventos que constituyen el 56% de los datos. En otras palabras, hay más sismos de magnitudes altas que de magnitudes bajas, lo cual está en contradicción con lo sugerido por la Fig. 6 y la Tabla 2.

Tabla 1. Sismos empleados en el estudio de Caicara

	No sismos	% particip	Tipo de Fuente Sísmica	Magnit, M	Dist, R, (km)
Fuente A	10	29,41	Área sísmica cercana-intermedia	5,23 - 6,19	11,5 - 46,5
Fuente B	12	35,29	Subducción lejana	6,2 - 7,6	282 - 780
Fuente C	5	14,71	Fallas transcurrentes intermedias	5,0 - 6,2	46,9 - 55,5
Fuente D	7	20,59	Falla transcurrentes lejanas	6,2 - 7,13	70,7 - 87,9
Total Sismos	34	100,00			

Tabla 2. Número de eventos por magnitud para constituir bases de datos con 60 y 30 eventos, respectivamente, en el suroriente de Venezuela.

Rango M		n = 60	Porcent	n = 30	Porcent
4,75	5,25	36	0,60	18	0,61
5,35	5,85	15	0,26	8	0,26
5,95	6,45	5	0,08	3	0,08
6,55	7,05	2	0,03	1	0,03
7,15	7,65	1	0,01	1	0,02
7,75	8,25	1	0,01	0	0,00
8,35	8,85	0	0,0	0	0,00
8,95	9,45	0	0,0	0	0,00
Total		60		30	

Por otra parte, en el caso de Cariaco tenemos que el 100% de los eventos están en el rango de magnitudes

$6,1 < M < 7,3$. Es decir, sólo hay magnitudes altas. Véase la Tabla 3.

Tabla 3. Acelerogramas empleados en Cariaco

	No sismos	% particip	Tipo de sismo	Magnit, M	Dist, R, (km)
MC	5	29,41	Muy Cercanos	6,9 - 7,3	1,0 - 4,0
C	8	47,06	Cercanos	6,1 - 6,9	5,0 - 15,0
I	4	23,53	Intermedios	6,6 - 6,9	16,0 - 55
Total Sismos	17	100,00			

En la Fig. 7 se muestran los gráficos de amenaza en Roca (perfil S1) para distintos períodos de oscilación, T_i , para la población de Caicara. En esa figura, además de incluir la amenaza obtenida con la utilización de la norma COVENIN 3621 [9] también se incluye el resultado de un estudio de amenaza particular en perfil roca o S1

para dicha población [1]. Primeramente, se observa que la amenaza obtenida con la norma COVENIN es siempre mayor que la correspondiente al estudio del sitio. Esto no es de extrañar para zonas de baja sismicidad ya que las normas nacionales son generalmente conservadoras.

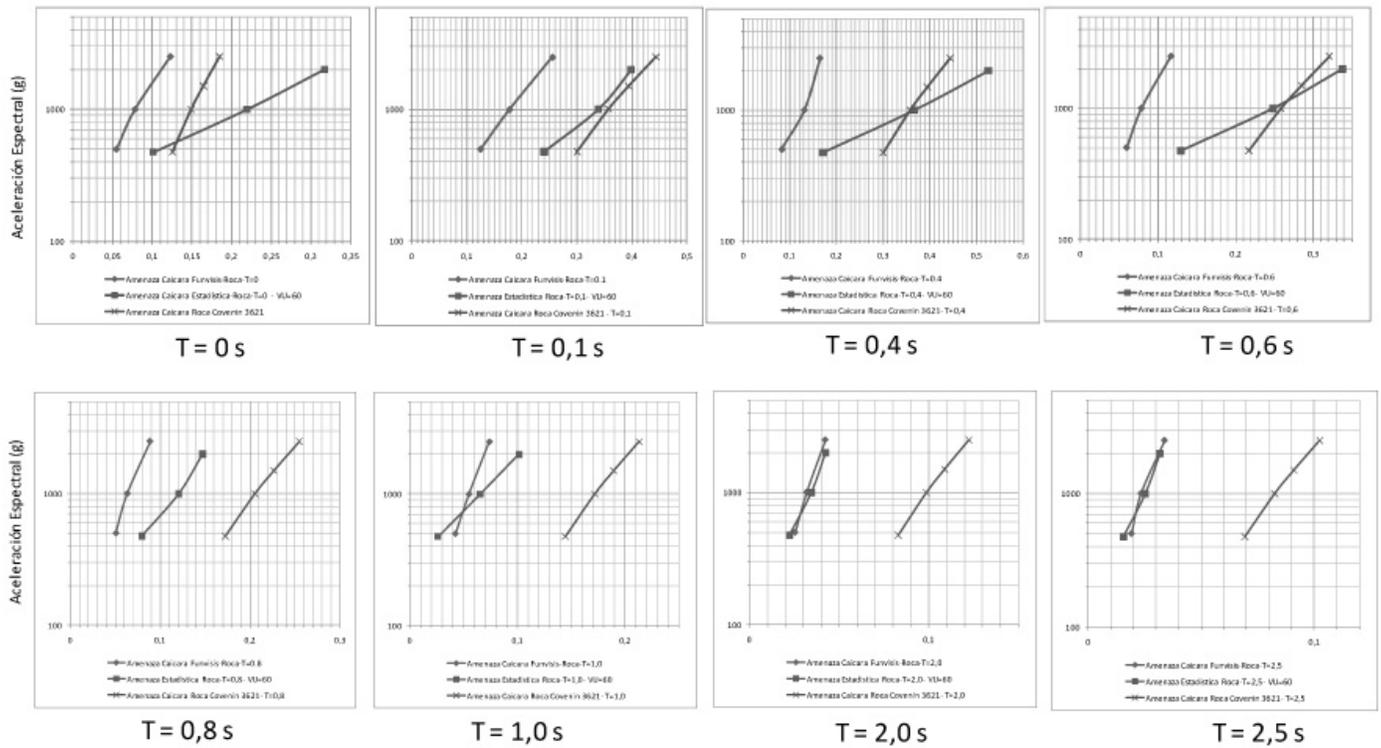


Fig. 7. Amenaza en roca para Caicara calculada a partir de las estadísticas del modelo propuesto y la base de datos utilizada para períodos, T_i , de [0 s; 0,1 s; 0,4 s; 0,6 s; 0,8 s; 1,0 s; 2 s y 2,5 s] respectivamente. La misma se compara con la obtenida de la norma COVENIN 3621 y un estudio particular para el sitio.

También se observa en la Fig. 7 que las curvas de amenaza en roca obtenidas con el modelo aquí propuesto y la base de datos utilizada para preparar los espectros de Caicara tienen mayor pendiente que aquellas calculadas con las normas COVENIN 3621 para los períodos de oscilación por debajo de los 0,6 segundos. Esto significa que los resultados de las ordenadas espectrales para esos períodos de oscilación resultan inadecuadamente conservadores con respecto a la amenaza real del sitio. En otras palabras, la amenaza calculada con la base de datos es mucho más conservadora que la dada por la norma COVENIN que ya es suficientemente conservadora.

Por otra parte, en la Fig. 7 también se observa que la pendiente de la amenaza calculada con el procedimiento aquí propuesto tiende a parecerse a aquellas pendientes obtenidas con la norma COVENIN y con el estudio para el sitio para los períodos de oscilación por encima de los 0,6 s. Sin embargo, continúa siendo conservadora ya que su posición relativa se mantiene a la derecha de la amenaza real del sitio. Las curvas de amenaza obtenidas con la base de datos para los espectros se acercan más a la amenaza real del sitio para los períodos de oscilación por encima de los 2 s.

Recuérdese que la base de datos de Caicara tiene la proporcionalidad de sismos invertida, es decir hay más

sismos de magnitudes altas que de magnitudes bajas. En la opinión del autor, de haberse guardado una mejor proporción entre los números de eventos en la base de datos de Caicara la amenaza calculada con la base de datos no habría resultado tan conservadora.

En otro trabajo [6] el autor pudo constatar la influencia del número de eventos en las estadísticas de las ordenadas espectrales. Esto se hizo para la base de datos de Caicara cuyos espectros para los mismos períodos de retorno se calcularon con 17 y con 34 sismos, respectivamente. Los resultados mostrados en las Tablas 4 y 5 indican que tanto la media como la dispersión son bastante cercanos para ambos cómputos y, que para

finés prácticos, puede afirmarse que no es el número de eventos solamente los que definen la calidad del cómputo. La variación de la cantidad de eventos de 34 a 17 se hizo en forma aleatoria.

En otras palabras, no es necesariamente el número de eventos lo que permite obtener representatividad de la data con la amenaza del sitio sino la adecuada proporcionalidad de los números de registros para las distintas magnitudes. Adicionalmente, y aunque no fue parte de la investigación hasta ahora, es necesario incluir las distancias para cada rango de magnitudes. Esto debe ser probado estadísticamente con nuevos estudios.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de las ordenadas espectrales de las aceleraciones en roca utilizadas en los estudios de respuesta dinámica en las poblaciones de Caicara, con 17 sismos.

PERIODO	MEDIA	SIGMA	CV=MED/SIG	RANGO	RANGO/SIG
0	0,052	0,094	1,811	0,399	4,253
0,1	0,069	0,110	1,599	0,439	3,985
0,25	0,099	0,167	1,682	0,713	4,273
0,4	0,099	0,179	1,796	0,744	4,166
0,5	0,091	0,173	1,903	0,816	4,712
0,6	0,058	0,096	1,652	0,412	4,310
0,8	0,035	0,050	1,429	0,168	3,364
1	0,023	0,031	1,326	0,125	4,082
1,2	0,023	0,035	1,556	0,169	4,813
1,6	0,017	0,025	1,507	0,105	4,200
2	0,011	0,014	1,326	0,060	4,191
2,5	0,007	0,010	1,363	0,045	4,509
3	0,105	0,174	1,650	0,712	4,100

Tabla 5. Parámetros estadísticos de las ordenadas espectrales de las aceleraciones en roca utilizadas en los estudios de respuesta dinámica en las poblaciones de Caicara, con 34 sismos.

PERIODO	MEDIA	SIGMA	CV=MED/SIG	RANGO	RANGO/SIG
0	0,057	0,092	1,632	0,463	5,010
0,1	0,088	0,123	1,403	0,489	3,970
0,25	0,094	0,148	1,581	0,713	4,811
0,4	0,087	0,156	1,781	0,744	4,784
0,5	0,080	0,148	1,855	0,816	5,522
0,6	0,057	0,099	1,738	0,524	5,285
0,8	0,035	0,053	1,522	0,295	5,615
1	0,024	0,032	1,344	0,176	5,450
1,2	0,021	0,030	1,412	0,169	5,624
1,6	0,015	0,020	1,383	0,105	5,134
2	0,010	0,012	1,225	0,060	4,965
2,5	0,007	0,009	1,251	0,045	4,891
3	0,092	0,154	1,678	0,717	4,660

3. ESPECTROS ELÁSTICOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO PROPUESTO

En esta sección mostraremos los resultados de aplicar el modelo de Poisson en la forma antes descrita con las bases de datos utilizadas para estudios sísmicos en las poblaciones de Caicara y Cariaco.

En la Fig. 8 se incluye el mismo gráfico mostrado en la Fig. 1 con los espectros elásticos para 475, 1000, 2000 y 5000 años respectivamente para Cariaco y Caicara en

perfil S3. Esto ilustra el planteamiento dado en el inicio de este trabajo sobre la definición de los espectros elásticos con distintos períodos de retorno a partir de la familia de espectros del sitio. Por otra parte, en las Fig. 9 y 10 se muestran separadamente los espectros calculados con el método propuesto para las poblaciones de Caicara y Cariaco para roca y perfil S3, respectivamente.

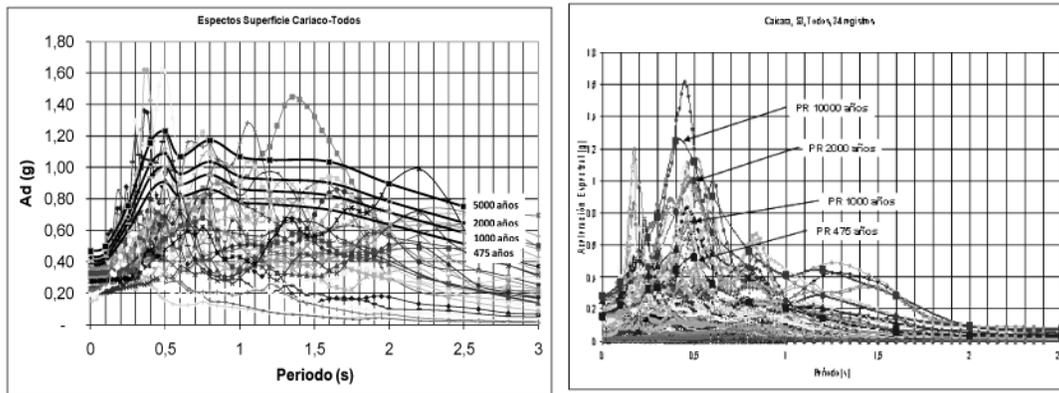


Fig. 8. Familia de espectros de respuesta en superficie para las poblaciones de Cariaco (a) y Caicara (b) en perfil S3. Se incluyen los espectros para 475, 1000, 2000 y 5000 años de período de retorno calculados con el método propuesto.

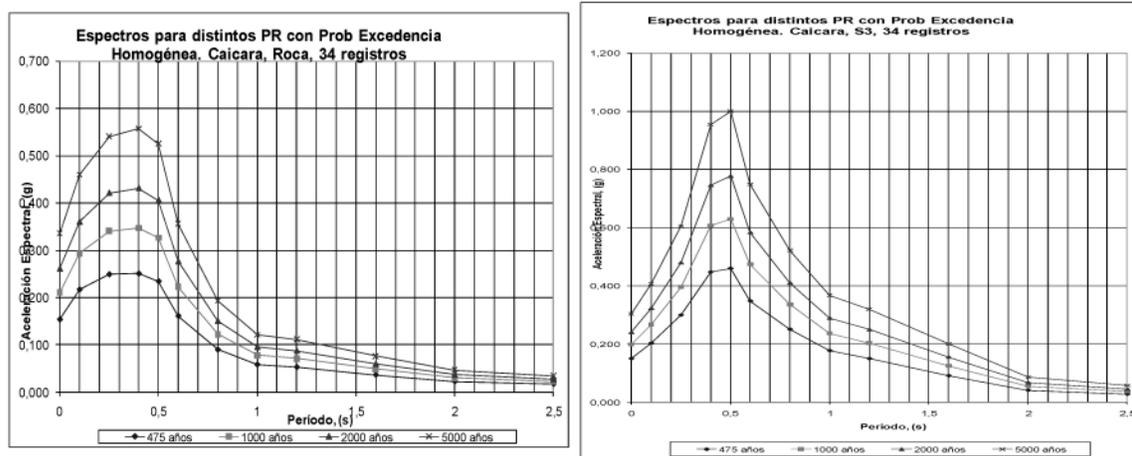


Fig. 9. Espectros de respuesta para PR de 475, 1000, 2000 y 5000 años, en roca (perfil S1) y en la superficie del terreno para perfil S3 en la población de Caicara.

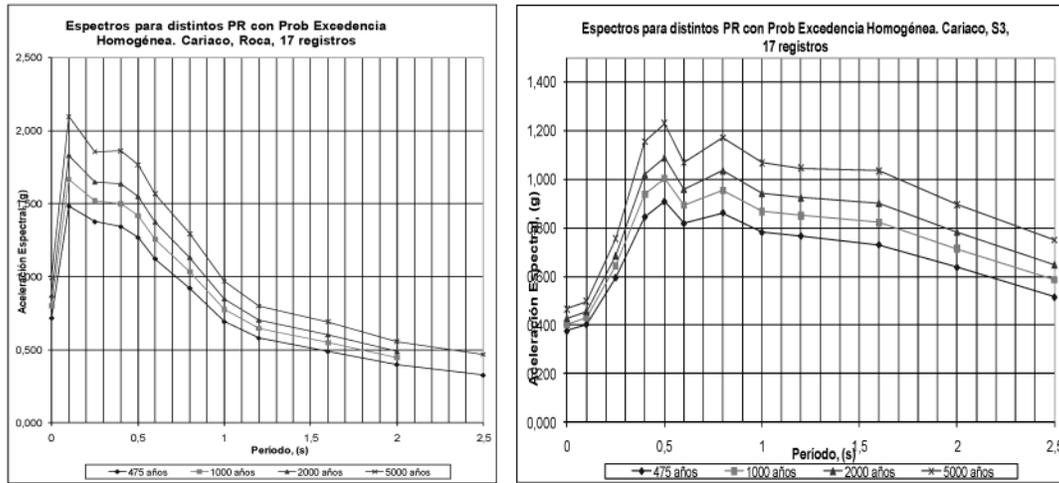


Fig. 10 Espectros de respuesta para PR de 475, 1000, 2000 y 5000 años, en roca (perfil S1) y en la superficie del terreno para perfil S3 en la población de Cariaco.

Como se aprecia en las Figs. 3 y las Figs. 8 a 10, el modelo predice adecuadamente la posición de los espectros a partir de la base de datos, lo cual es independiente de la forma en que la misma ha sido constituida.

Por otra parte, es muy común en la práctica de la ingeniería sísmica el uso de la proporcionalidad entre espectros de distintos períodos de retorno. A tal efecto, en la Tabla 6 se muestran los promedios de los cocientes resultantes de dividir los valores de las ordenadas de dos espectros elásticos con distintos períodos de retorno para Caicara y Cariaco.

Nótese que los cocientes de las ordenadas de los espectros parecen estar influenciados por la zona sísmica,

resultando mayores para la zona sísmica menos activa. De la misma manera, parece haber alguna influencia del tipo de perfil geotécnico, particularmente en la zona sísmica 1 (Caicara). En la zona sísmica 7, aunque los valores de la media de los cocientes parecen bastante cercanos, la dispersión es mayor para el perfil S3 que para roca, lo cual no es de extrañar.

Finalmente, de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 7, los cocientes entre espectros son mayores en la zona 1 que en la zona 7, tanto para el perfil de roca como para el perfil S3. Todo esto sugiere que la intensidad y el perfil geotécnico son importantes al querer asignar valores de proporcionalidad entre espectros de distintos períodos de retorno.

Tabla 6 Comparación de los cocientes entre espectros de distintos períodos de retorno

CAICARA S3			
	1000/475	2000/1000	5000/2000
Media	1,62	1,25	1,15
Sigma	0,254	0,091	0,051
CV	0,157	0,073	0,044

CAICARA ROCA			
	1000/475	2000/1000	5000/2000
Media	1,97	1,37	1,22
Sigma	0,397	0,132	0,072
CV	0,201	0,096	0,059

CARIACO S3			
	1000/475	2000/1000	5000/2000
Media	1,17	1,08	1,05
Sigma	0,112	0,048	0,029
CV	0,096	0,045	0,028

CARIACO ROCA			
	1000/475	2000/1000	5000/2000
Media	1,18	1,08	1,05
Sigma	0,059	0,025	0,015
CV	0,050	0,023	0,014

4. CONCLUSIONES

Se propone un nuevo procedimiento para definir los espectros elásticos para distintos períodos de retorno a partir de bases de datos de acelerogramas reales o provenientes de estudios de respuesta dinámica de perfiles geotécnicos. Este nuevo método se basa en la consideración de las intensidades sísmicas como un proceso de Poisson sin memoria.

El método propuesto para establecer los espectros elásticos utiliza un lapso de tiempo representativo para la vida útil de las instalaciones, el cual puede tomarse entre 50 y 60 años. Para aplicar el método, primero se calcula la probabilidad de excedencia las aceleraciones espectrales durante la vida útil utilizando el modelo de Poisson para los distintos períodos de retorno deseados. Seguidamente se estiman las aceleraciones a las cuales corresponden dichas probabilidades utilizando la función densidad de probabilidades de las aceleraciones para cada período de oscilación, T_i . De esta manera se identifican las aceleraciones que definen la ubicación de los distintos períodos de retorno seleccionados.

El método propuesto también permite estimar la amenaza sísmica a partir de las estadísticas de las colas de las ordenadas espectrales. De esta manera, se puede establecer si la base de datos empleada para los estudios de respuesta dinámica es representativa de la amenaza del sitio mediante la comparación de las mismas.

Por otra parte, el procedimiento propuesto permite definir la base de datos a emplear en los estudios para la elaboración de espectros a fin de que la misma sea compatible con la amenaza sísmica del sitio estudiado. Dicho método permite la adecuada selección del número de eventos para cada magnitud y distancia. De esta manera se evita la sobre estimación de las ordenadas espectrales para cada período de retorno.

Es bueno destacar que el método planteado para establecer los espectros elásticos para distintos períodos de retorno es independiente de la completitud de la base de datos. No así la compatibilidad de los espectros resultantes con la amenaza. En otras palabras, si la base de datos es la adecuada, los resultados dados por el método de preparación de los espectros de distintos períodos de retorno serán compatibles con la amenaza del sitio. Mientras que si la base de datos no es representativa, el método de obtención de los espectros trabaja adecuadamente pero los espectros no serán representativos de la zona estudiada.

Los análisis de la proporcionalidad entre espectros de distintos períodos de retorno sugieren la influencia

del tipo de perfil geotécnico, particularmente en la zona sísmica 1 (Caicara). Para la zona sísmica 7 los valores de la media resultan bastante cercanos, aunque la dispersión es mayor para el perfil S3 que para roca. En consecuencia, la intensidad y el perfil geotécnico son importantes al querer asignar valores de proporcionalidad entre espectros de distintos períodos de retorno.

5. AGRADECIMIENTOS

Primeramente deseo agradecer a mi esposa María Iciar Varela por su paciencia y entendimiento durante el tiempo empleado en el análisis de la información para este artículo. De la misma manera se agradece a los ingenieros Jorge González y José Alviar la facilitación de archivos resultantes de los cálculos de los estudios de respuesta dinámica para Cariaco y Caicara, respectivamente, utilizados en este trabajo. Similarmente, se agradece a Geohidra Consultores y a la Constructora Odebrecht, el haber permitido la utilización de los informes preparados para la amenaza sísmica del Tercer Puente sobre el Río Orinoco. Finalmente, el autor agradece al ingeniero Rafael Loboguerrero por su apoyo en la elaboración de varios de los espectros utilizados en el trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] Geohidra Consultores, *Estudio de amenaza sísmica y caracterización dinámica preliminar para el tercer puente sobre el río Orinoco entre las poblaciones de Caicara y Cabruta. Estados Guárico y Bolívar. Venezuela*, DGP00648-4, Abril 2007.
- [2] González J., *Microzonificación Sísmico-Geotécnica con base en Análisis Dinámico y Propagación de Ondas: Aplicación a la Región de Cariaco, Edo Sucre*, Trabajo Especial de Grado para Magister Scientiarum, Universidad Central de Venezuela, Agosto 2002.
- [3] Norma COVENIN 1756-2001, *Edificaciones Sísmorresistentes*, Funvisis, Caracas, Venezuela, 2001.
- [4] Echezuría, H. "Preparación de espectros elásticos para diferentes períodos de retorno a partir de estudios de respuesta dinámica de perfiles geotécnicos", *Revista Técnica Y&V*, No 12, Junio, 2010, pp 40-50.

- [5] Devore, Jay L., *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Brooks/Cole, 1982.
- [6] Echezuría, H., "Análisis estadístico de las colas de las distribuciones de probabilidades de las ordenadas espectrales para la preparación de espectros elásticos con diferentes períodos de retorno" *Revista Técnica Y&V*, Enero 2011.
- [7] Mc Guire, R.K. and W. J. Arabaz "An introduction to probabilistic seismic hazard analysis" en S.H. Ward, ed. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol. 1, pp 333-353.
- [8] Kramer, Steven., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
- [9] Norma COVENIN 3621, Instalaciones industriales sismorresistentes, FONDONORMA, Caracas, Venezuela, 2002.