

**SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO
DE ACELEROGRAMAS PARA
EL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA
PRESA TEATINOS**

**SELECTION AND PROCESSING
OF ACCELEROGRAMAS FOR THE
DYNAMIC ANALYSIS OF THE
TEATINOS DAM**

**SELEÇÃO E TRATAMENTO DE
ACCELEROGRAMAS PARA A
ANÁLISE DINÂMICA DA BARRIGA
DE TEATINOS**

Angela Rocio Chaparro Vargas

Facultad de Ingeniería, Programa de Maestría
en Geotecnia, Universidad Pedagógica
y Tecnológica de Colombia
angelarocio.chaparro@uptc.edu.co

Fecha de recepción: 21 de julio 2017

Fecha de aprobación: 15 de septiembre 2017

Resumen

Los análisis dinámicos de obras de ingeniería representan una herramienta significativa para evaluar el comportamiento de las mismas, frente a eventos sísmicos, y proporcionan resultados cuantitativos útiles en la toma de decisiones oportunas. Por tanto, se requiere que las señales sísmicas o acelerogramas a emplear en dichos análisis representen de la manera más acertada los movimientos de terreno que pueden incidir en el comportamiento de dichas estructuras. El presente artículo, se enfoca en describir la metodología y los criterios empleados para la búsqueda y selección de acelerogramas registrados en la base de datos nacional de eventos sísmicos de la Red Nacional de Acelerógrafos RNAC, así como en la base de datos sísmicos internacionales - PEER (Ground Motion Database). Adicionalmente, se presentan los resultados del procesamiento de los acelerogramas seleccionados que se emplearán en el análisis dinámico de la Presa de Teatinos, partiendo de los resultados obtenidos del análisis de amenaza sísmica efectuado. El objetivo es obtener espectros de respuesta que se asemejen al espectro de amenaza uniforme para un periodo de retorno $T = 475$ años correspondiente al sismo máximo probable S.M.P. Se seleccionaron tres registros sísmicos representativos de cada una de las fuentes sismogénicas más influyentes, es decir, tres acelerogramas de fuente cercana, tres de fuente intermedia y tres de fuente lejana.

Palabras clave: Acelerograma, amenaza sísmica, análisis dinámico, espectro de respuesta.

Summary

The dynamic analysis of engineering works represents a significant tool to evaluate the behavior of these against seismic events and provide useful quantitative results in making timely decisions. Therefore, it is required that the seismic signals or accelerograms to be used in these analyzes represent in the most accurate way the expected ground movements that can affect the behavior of structures mentioned above. This article focuses on describing the methodology and criteria used for the search and selection of accelerogramas recorded in the national database of seismic events of the RNAC Red Nacional de acelerógrafos, as well as in the database of international simian events - PEER (Ground Motion Database). Additionally, the results of the processing of the selected accelerogramas that will be used in the dynamic analysis of the Teatine Dam are presented, based on the results obtained from the seismic hazard analysis carried out. The objective is to obtain response spectra that resemble the uniform threat spectrum for a return period $T = 475$ years corresponding to the maximum probable earthquake S.M.P. Three representative seismic records were selected from each of the most influential seismogenic sources, that is, three accelerogramas from a nearby source, three from an intermediate source and three from a distant source.

Keywords: Accelerograma, seismic threat, dynamic analysis, response spectrum

Resumo

As análises dinâmicas de obras de engenharia representam uma ferramenta significativa para avaliar o comportamento do mesmo diante de eventos sísmicos e fornecer resultados quantitativos úteis na tomada de decisões oportunas. Por tanto, É necessário que os sinais sísmicos ou acelerogramas a serem utilizados nessas análises representem da forma mais precisa os movimentos esperados do solo que podem afetar o comportamento de disseram estruturas. O presente artigo enfoca a descrição da metodologia e critérios utilizados para a busca e seleção de acelerogramas registrados na base de dados nacional de eventos sísmicos da R RNAA Nacional Nacional de Acelerógrafos, bem como no banco de dados de eventos simânicos internacionais - PEER (Ground Motion Database). Além disso, serão apresentados os resultados do processamento dos acelerogramas selecionados que serão utilizados na análise dinâmica da Barragem de Teatina, com base nos resultados obtidos com a análise de risco sísmico realizada. O objetivo é obter espectros de resposta que se assemelham ao espectro de ameaças uniforme para um período de retorno $T = 475$ anos correspondente ao terremoto máximo provável S.M.P. Três registros sísmicos representativos foram selecionados de cada uma das fontes sísmicas mais influentes, ou seja, três acelerogramas próximos da fonte, Três de fonte intermediária e três de fonte distante.

Palavras-chave: aceleração, ameaça sísmica, análise dinâmica, espectro de resposta

I. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá, cuenta con el Embalse de Teatinos como la principal fuente para el abastecimiento de agua potable de sus habitantes, éste cuerpo de agua con capacidad de almacenamiento superior a 6.5 millones de metros cúbicos es contenido por una presa conformada en tipo terraplén con materiales de suelo compactado y fragmentos de roca, obra de ingeniería desarrollada en los años 60's e inaugurada para su servicio en 1974, indicando que a la fecha lleva más de 40 años en operación.

Dentro de las acciones a desarrollar para prevenir los daños que pueden presentarse en obras de ingeniería a causa de eventos

sísmicos, se encuentra la realización de análisis dinámicos a través de los cuales es posible estimar la respuesta o comportamiento que presentan frente a estas solicitudes y tomar medidas oportunamente. Para el desarrollo de estos análisis dinámicos, se requiere articular la información que describa las características relevantes de un movimiento del terreno, la cual se encuentra inmersa en los registros de aceleraciones causadas por sísmos que se denominan “acelerogramas”.

El presente documento centra su interés, en consolidar los acelerogramas registrados por acelerógrafos, que sean representativos de movimientos esperados en el terreno y que pueden constituirse como insumo para adelantar el análisis del comportamiento dinámico de la Presa del Embalse Teatinos.



Fig. 1 Fotografía Presa de Teatinos

Fuente: Autor

En la práctica diversos documentos indican los criterios y características que deben cumplir estas señales sísmicas o acelerogramas, así por ejemplo, el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR- 10) señala en la sección A.2.7 las características que deben cumplir los acelerogramas que se empleen en análisis dinámicos, precisando el uso de la componente horizontal de un mínimo de tres (3) acelerogramas diferentes, los cuales deben ser representativos de los movimientos esperados, la norma indica que “deben provenir de eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posibles”

Por otro lado, Bommer y Ruggeri (2002) precisan que la selección de los acelerogramas puede realizarse teniendo en cuenta la similitud con el espectro de amenaza uniforme, pues este representa la envolvente de varios sismos que pueden incidir en el sitio.

II. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo el siguiente procedimiento que condujo a la selección de señales y procesamiento de las mismas con el fin de optimizar la información y en consecuencia agilizar el proceso de cálculo del software de análisis dinámico.

Amenaza sísmica

Teniendo en cuenta que la amenaza sísmica, es el punto de partida para la selección de acelerogramas requeridos en los análisis dinámicos, previamente se adelantó el análisis de amenaza para la zona donde se localiza el Embalse Teatinos. Para efectos de la selección de señales, se adoptó el procedimiento de análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA, por su sigla en inglés), esta metodología contempla posibles escenarios sísmicos que pueden ocurrir en un sitio determinado, considerando incertidumbres en la magnitud del sismo, localización y tiempo de ocurrencia.

Como primer producto del análisis, se determinaron las fuentes más influyentes respecto a la posición del Embalse Teatinos, es decir, los sistemas de fallas geológicas con mayor actividad incidente en la región. Estos se clasifican como fuentes de distancias cercanas (20- 50 Kilómetros) intermedias (50 a 100 Kilómetros) y lejanas (100-200 kilómetros). De igual manera, se obtuvo las curvas de espectros de amenaza uniforme para los periodos de retorno $T=95, 187, 475, 975$ y 2475 años, cada una de estas curvas representa la envolvente de los sismos de diferentes fuentes que pueden presentarse de acuerdo al periodo de retorno referido en el espectro.

Búsqueda y selección de señales de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia RNAC

En el portal web del Servicio Geológico Colombiano, está disponible para consulta, los registros de la actividad sísmica del país, específicamente, en la base de datos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia. En la interfaz de resultados de eventos se presentan los registros indicando fecha, hora, magnitud, profundidad, coordenadas del epicentro e información sobre la estación acelerográfica: código, coordenadas, aceleración máxima registrada y distancia hipocentral. Autores como Bommer y Acevedo (2004) sugieren como criterios de selección en orden de prioridad: la magnitud, seguido de la distancia, el tipo de suelo y mecanismo de ruptura.

Para acceder a los registros se debe ingresar a la página web del Servicio Geológico Colombiano, posteriormente, al vínculo de Red Nacional de Acelerógrafos RNAC y en la pestaña “consulta general de acelerogramas” se despliega el formulario de

consulta en donde es posible seleccionar el nombre del departamento, municipio, las fechas del periodo de búsqueda (inicial y final), localización espacial “latitud y longitud”, magnitud y profundidad (mínima y máxima). Una vez seleccionado el evento, se despliega el listado de estaciones que registraron el sismo; allí, es posible observar información relevante como el nombre de la estación, localización, geología en la que está implantado el acelerógrafo (roca o suelo), topografía (plana u ondulada), distancia hipocentral y epicentral, aceleración registrada en la componente horizontal E-W, N-S y en componente vertical V. Con esta información es posible seleccionar los registros más convenientes de acuerdo a los criterios de búsqueda.

Cada estación tiene asociado un archivo del registro sísmico, el cual se descarga en formato “.anc”. El archivo puede abrirse en el bloc de notas y contiene información de las aceleraciones presentadas en las tres componentes E-W, N-S y V en toda la duración del evento.

Búsqueda y selección de señales de ambientes tectónicos internacionales similares.

Teniendo en cuenta que en la base de datos de la RNAC no se encuentra suficiente número de registros que permitan cumplir lo señalado en las recomendaciones descritas en documentos como en la NSR10, se hace necesario recurrir una base de datos con registros reales de eventos sísmicos internacionales. Para este caso, se decidió consultar en la base de datos “Pacific Earthquake Engineering Research Center” PEER Ground Motion Database, administrada por la Universidad de California, Berkeley.

En la plataforma se encuentran disponibles dos bases de datos, la primera NGA WEST2, que contiene un catálogo amplio de registros de sismos corticales de ambientes tectónicos activos. La segunda, NGA EAST, cuyo objetivo principal es el desarrollo de un modelo de movimiento del terreno para la región de Centro y Este de Norteamérica para su uso en análisis de amenaza sísmica probabilística PSHA.

En el desarrollo de este proyecto, se realizó la consulta en la base de datos NGA WEST2. El acceso a la información requiere del registro como usuario, posteriormente en una ventana desplegable es posible cargar el espectro objetivo, en este caso corresponde al espectro de amenaza uniforme, el cual debe ingresarse como un archivo de valores separados por comas csv. Una vez completado, de manera exitosa, el cargue del espectro, se continúa con la búsqueda, para lo cual se despliega un formulario donde se debe diligenciar el tipo de falla, magnitud, distancia hipocentral, velocidades de onda de corte registradas, duración del evento, entre otros.

Como resultado, se obtiene el listado de registros que presentan las características indicadas en el proceso de búsqueda. Es posible pre-visualizar el espectro de respuesta de cada registro y compararlo con el espectro de amenaza cargado al inicio de la consulta para obtener mayor orientación sobre el más conveniente a descargar. Cada registro permite descargar un comprimido en donde se encuentran 10 archivos correspondientes al reporte general del evento y las historias de aceleración, velocidad y desplazamiento en las tres componentes EW, NS y V.

Procesamiento de las señales seleccionadas.

Es importante precisar que las señales provenientes de la base de datos de la RNAC presentan las unidades de aceleración en cm/s^2 , mientras que los registros de la base de datos de la PEER en g. Para efectos de estandarizar las unidades de los registros descargados tanto de la base de datos nacional como internacional, se define realizar la conversión a valores g.

El procesamiento de las señales se realizó con el apoyo del software PRISM, el cual es un programa libre para el análisis de respuesta sísmica de sistemas de grado único de libertad, desarrollado por el departamento de ingeniería y arquitectura de la universidad INHA, Corea del Sur. Inicialmente se ingresan los registros bien sea en formato .txt provenientes de la RNAC o en formato NGDC/NGA provenientes de la base de datos PEER y se complementa la información solicitada como unidades de aceleración, primera línea de lectura del archivo, intervalo de paso de tiempo y número de datos en cada línea. Con esta acción, se carga el acelerograma crudo, posteriormente se aplica filtro Butterworth paso-banda que viene por defecto en el programa, el cual ajusta el ruido implícito en la señal causado por fenómenos naturales o por el tratamiento de los datos, se realiza corrección por línea base que consiste en el desplazamiento del cero del registro respecto al cero real de aceleración y se altera por un factor de escala para obtener el valor de aceleración pico en roca PGA similar al del espectro de amenaza definido en el análisis de amenaza sísmica.

Posteriormente, se procede a obtener el espectro de respuesta elástico de esta señal

para una relación de amortiguamiento del 5%, el cual se compara con el espectro de amenaza uniforme. De acuerdo al grado de similitud entre los dos espectros puede descartarse el registro o confirmarse que es el más apropiado para emplearse en el análisis de respuesta dinámica. Para agilizar el procesamiento del acelerograma, en el software de análisis dinámico, las señales seleccionadas son sometidas a un procedimiento de recorte en los tramos con valores de aceleración inferiores al 5% del valor de PGA y diezmado a intervalos de tiempo mayores que generalmente corresponden al doble del intervalo inicial. Se verifica entonces, que, con los ajustes realizados, el acelerograma no presente variaciones significativas especialmente en la comparación del espectro de respuesta referente al espectro de amenaza, con lo cual se

puede considerar que la señal se encuentra lista para usarse en el análisis de amenaza sísmica.

III. DESARROLLO Y RESULTADOS DEL TRABAJO

A. Fuentes sismogénicas influyentes.

Como actividades previas, y luego de realizar el análisis de actividad sísmica para un área aferente a Teatinos, delimitada por un polígono cuadrado de 400 kilómetros de lado cuyo centro corresponde a la localización del embalse, que permitió determinar los parámetros de recurrencia para las fuentes sismogénicas aledañas mostrados en la Tabla 1, se obtuvo las curvas de amenaza por fuente como se observa en la Fig. 2.

Tabla 1 Parámetros de recurrencia obtenidos de la caracterización sísmica de fuentes

Falla	M_0	M_u	λ	β	α	Profundidad Promedio eventos (m)	Buzamiento ^o
Espíritu Santo	3	5.1	0.45	1.581	4.014	12.04	90
Palestina	3.5	5.6	1.11	2	7.077	23.31	90
Cimitarra	3	5.9	1.07	1.475	4.652	20.25	90
Salinas	4.5	5.8	2.76	3.925	18.421	29.55	45
Suarez	4	5.7	0.45	1.833	6.629	3.30	-60
B/manga Sta. Marta Sur	4	5.8	3.25	2.992	13.615	37.98	90
Frontal Cordillera Oriental	4	7.5	5.62	1.672	8.411	14.38	-60
Benioff	3	6.6	6.58	1.607	6.734	140.93	16.08
Benioff B/manga	4	6.2	43.07	3.134	16.811	150.41	16.08
Ibague	3	6.2	1.15	1.29	4.039	25.76	90.
Magdalena	3.5	5.5	0.87	2.069	7.234	23.95	90.

Fuente: Autor

Es importante precisar, que con el fin de determinar la aceleración pico efectiva en roca "PGA" que puede generarse por acción de las diferentes fuentes sismogénicas, se

utilizaron las funciones de atenuación de aceleración que relacionan los valores de PGA con la magnitud, distancia epicentral, profundidad de los sismos y tipo de fuente

sismogénicas, en el caso del proyecto Teatinos estas funciones para las fuentes corticales se relacionan a continuación de los numerales 1 al 4 y para las zona de Benioff corresponden a las numeradas de 5 al 7:

1. Abra-Silva (1997) Rock USGS
2. Campbell (2003)
3. Abrahamson- Silva (2008) NGA
4. Campbell- Bozorgnia (2008) NGA
5. Atkinson- Boore (2003) Worldwide Intraslab USGS 2002
6. Youngs (1997) Intraslab Rock USGS 2002
7. Youngs (1997) Intraslab Rock

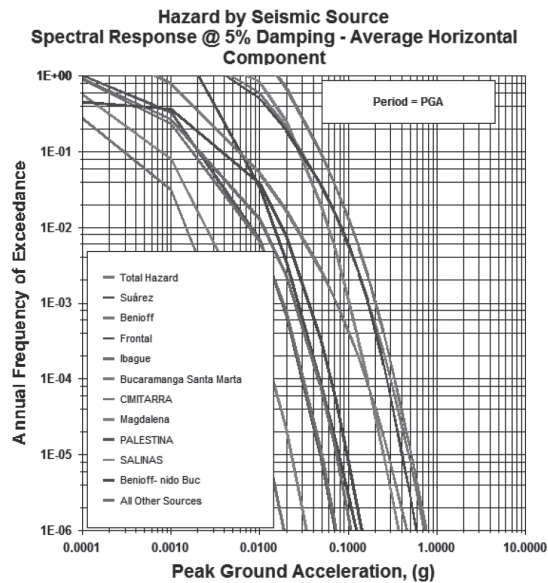


Fig. 2 Curvas de amenaza por fuente.

Fuente: Autor

De lo anterior se concluyó que las fuentes sismogénicas más influyentes son las siguientes con sus respectivas características:

Tabla 2 Resumen fuentes sismogenicas más influyentes en el embalse Teatinos.

Sistema de fallas	Distancia a Teatinos	Rango magnitudes potenciales que se pueden presentar	Tipo de falla	Buzamiento (°)	Profundidad promedio eventos presentados (Km)
B/manga- Santa Martha Sur	Cercana	4 - 5.8	Inversa	45	38
Frontal	Intermedia	4-7.5	Inversa	-60	14.5
Benioff profunda	Lejana	3- 6.6	Benioff	16.08	140

Fuente: Autor

Obtención de Espectro de amenaza uniforme

Para la evaluación de la amenaza sísmica se contó con el apoyo del software especializado EZ FRISK desarrollado por MCGuire 1995, el cual se basa en un análisis estocástico, que determina la envolvente de la amenaza total y generada por cada fuente.

Del análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA), se obtuvo el espectro de amenaza uniforme para los siguientes periodos de retorno: 95, 187, 475, 975 y 2475 años como se observa en la Fig. 3, no obstante para el ejercicio de selección de señales se adoptó como referencia la curva espectro del periodo de retorno 475 años equivalente a eventos considerados como “sismo máximo probable” (S.M.P),

definido dentro de los criterios de verificación sísmica de presas del boletín No. 72 de 1989 “Directrices para la selección de parámetros sísmicos para Grandes Presas” publicado por la Comisión Internacional de grandes Presas ICOLD, organismo referente en aspectos técnicos de este tipo de obras de Ingeniería, adicionalmente y como comparativo se precisa que la amenaza sísmica en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR- 10 también se encuentra definida respecto a este periodo de retorno.

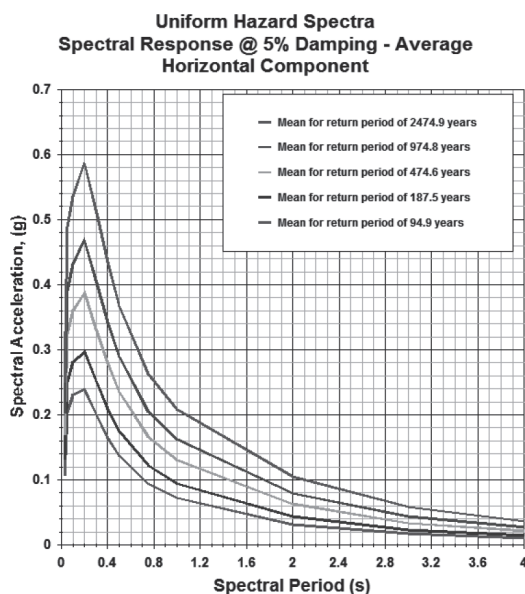


Fig. 3 Espectro de respuesta de amenaza uniforme para los diversos periodos de retorno.

Fuente Autor

Tabla 3 Resumen curvas espectro de respuesta amenaza uniforme.

Periodo de retorno (años)	PGA (g)	Aceleración Máxima espectral (g)	*PE 10 años (%)	PE 50 años (%)
95	0.11	0.25	10	50
187	0.13	0.30	5	26
475	0.17	0.38	2	10
975	0.20	0.47	1	5
2475	0.25	0.58	0.3	1

*PE = Probabilidad de excedencia. Fuente: Autor

Selección y procesamiento de acelerogramas por distancia a la fuente sismogénica.

García (1998) dice que “Desde el punto de vista cualitativo, la magnitud, que es una medida de la energía que se libera en la fuente afecta directamente la amplitud de las ondas sísmicas, por lo tanto, a mayor magnitud en la fuente se presentan proporcionalmente mayores aceleraciones. En la medida que las ondas sísmicas viajan, los registros que se obtienen van a presentar en sus espectros un decrecimiento en la región de periodos cortos, lo cual se manifiesta en un corrimiento del pico del espectro hacia la derecha, o sea hacia la zona de periodos largos. Mirando desde el punto de vista de las tres regiones del espectro, puede decirse que, en la medida que el registro se obtenga a mayor distancia, la zona de mayores valores dentro del espectro pasa de la zona con aceleraciones aproximadamente constantes, a la región con velocidades aproximadamente constantes y posteriormente a la zona con desplazamiento aproximadamente constantes.”

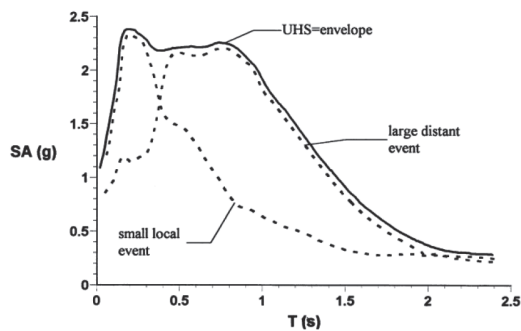


Fig. 4 Ilustración esquemática del espectro de amenaza uniforme (UHS) como envoltorio de espectros de fuentes sísmicas individuales.

Fuente: BOMMER ET AL., 2000 y mostrado en PARDO, Alejandro 2014.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo en la búsqueda de los acelerogramas se centra en que el espectro de respuesta de la señal seleccionada coincida de la manera más aproximada con el espectro de amenaza. Para el caso de los sismos provenientes de fuentes cercanas, la similitud debe darse en el tramo inicial del espectro de amenaza, para los provenientes de la fuente intermedia en el tramo central y los provenientes de la fuente lejana en el tramo final de la curva del espectro.

Acelerogramas Fuente Cercana.

Para la búsqueda de las señales que representen los posibles eventos provenientes del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta como fuente cercana, se definieron los siguientes criterios de consulta en la base de datos nacional e internacional: eventos registrados a distancias menores a 50 km, provenientes de falla tipo inversa, y que presenten registros de velocidad

entre 600 y 1200 m/s (intervalo de velocidad de propagación de ondas sísmicas en roca).

Las señales que cumplen con dichos criterios y que fueron seleccionadas teniendo en cuenta que el espectro de respuesta es semejante en el tramo inicial al espectro de amenaza son las siguientes:

- Sismo de Quetame (Cundinamarca)-Colombia, 24 de mayo de 2008, Hora: 19:20, Magnitud Local=5,7, Estación: Villavicencio, Geología: Roca, Distancia epicentral e hipocentral 31.66 km, duración 133 segundos.
- Sismo de Loma Prieta-Estados Unidos, 18 de octubre de 1989, Magnitud: 6.93, Estación: Monterrey City Hall, distancia al plano de ruptura: 44.35 km, $V_s=638.63$ m/s
- Sismo de Northridge- Estado Unidos, 17 de enero de 1994, Magnitud= 6.69, Estación: "Mt Wilson – CIT seis ST", distancia al plano de ruptura: 35.88 km, $V_s= 680.37$ m/s

En la Fig. 5 se observa los acelerogramas originales, seguidos del filtrado, corregido por línea base y escalado y finalmente los recortados y diezmados para cada uno de los registros mencionados anteriormente.

Adicionalmente, en lo que refiere al comparativo entre los espectros de respuesta de las señales originales y los espectros de respuesta de los acelerogramas procesados, en relación con el espectro de amenaza uniforme, se observa en la Fig. 6 las transformaciones que se presentan.

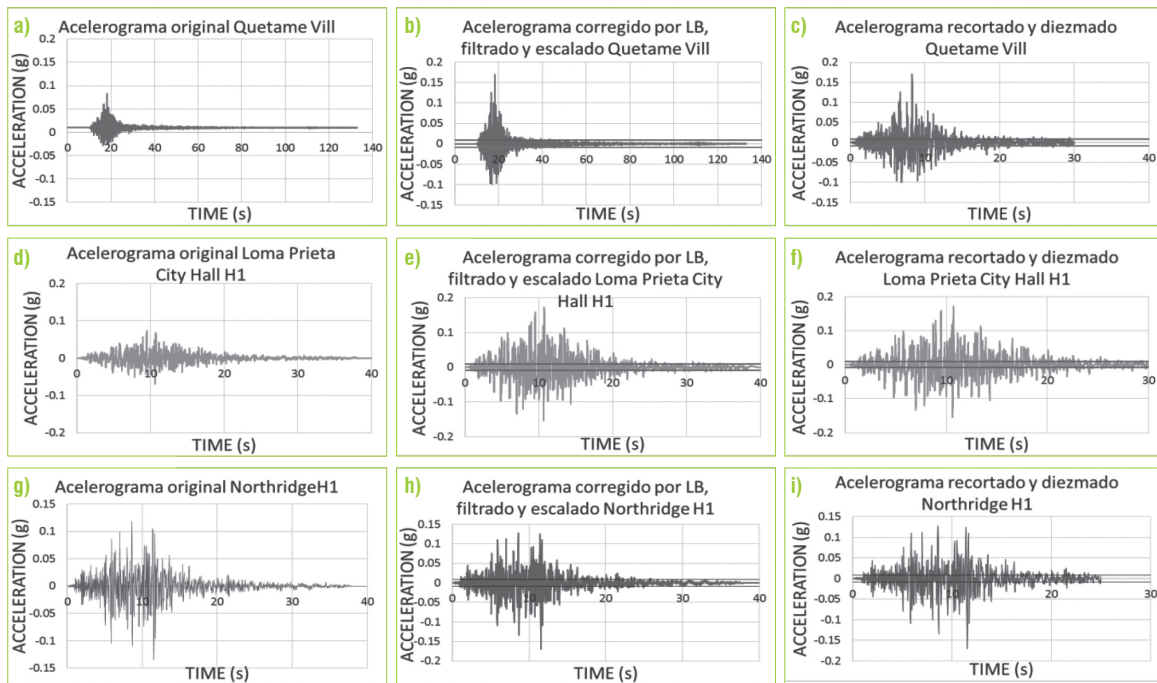


Fig. 5 Acelerogramas originales a) d) g), corregidos por línea base, filtrados y escalados b) e) h) y recortados y diezmados c) f) i) para los registros de Quetame (Cundinamarca)/ Villavicencio, Loma Prieta/ Monterrey City Hall, Northridge/ Mt Wilson – CIT seis ST respectivamente.

Fuente: Autor

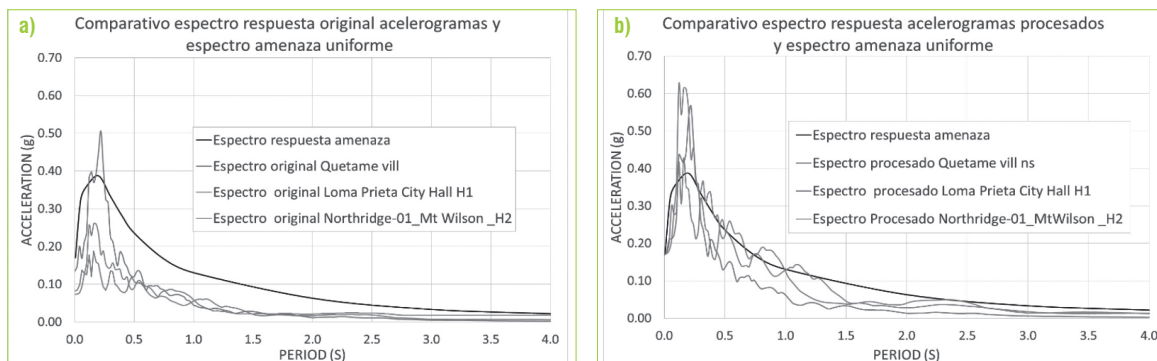


Fig. 6 a) Espectros de respuesta acelerogramas originales b) Espectros de respuesta acelerogramas procesados de los registros de Quetame (Cundinamarca)/ Villavicencio, Loma Prieta/ Monterrey City Hall, Northridge/ Mt Wilson – CIT seis ST

Fuente: Autor

Acelerogramas Fuente Intermedia.

Los criterios de consulta para la búsqueda de las señales representativas de la fuente intermedia - Falla Frontal fueron: eventos registrados a distancias entre 50 y 100 km,

provenientes de falla tipo inversa, que se encuentren en un rango de magnitud entre 6.5 y 8 y que presenten registros de velocidad entre 600 y 1200 m/s (intervalo de velocidad de propagación de ondas sísmicas en roca).

De la consulta realizada fueron seleccionadas y procesadas las siguientes señales que cumplen con los criterios descritos:

- Sismo de Chi-Chi Taiwán, 20 de septiembre de 1999, magnitud 7.62, estación “HWA057” , distancia al plano de ruptura: 50.6 km, Vs: 671.52 m/s
- Sismo de Chuetsu-oki Japón, 16 de julio de 2007, magnitud: 6.8, estación: “NIGH19”, distancia al plano de ruptura: 59.61 km, Vs: 671.52 m/s
- Sismo de Loma Prieta Estados Unidos, 18 de octubre de 1989, Magnitud: 6.93,

Estación: Hayward City Hall, distancia al plano de ruptura: 55.11 km, Vs=735.44 m/s

Similar al ejercicio de fuente cercana, en la Fig. 7 se muestran los acelerogramas originales seguidos del filtrado, corregido por línea base y escalado y finalmente los recortados y diezmados para cada uno de los registros mencionados para la fuente intermedia, de igual manera en la Fig. 8 se observa el comparativo entre los espectros de respuesta de las señales originales y los espectros de respuesta de los acelerogramas procesados, en relación con el espectro de amenaza uniforme.

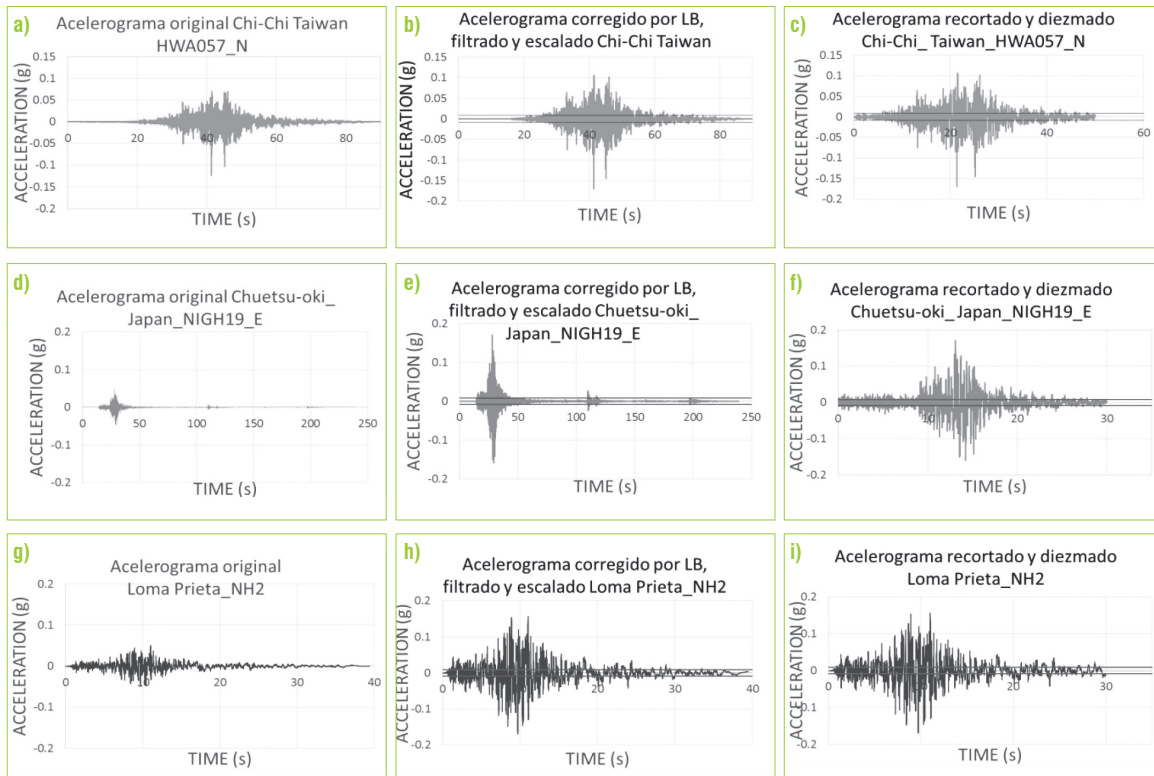


Fig. 7 Acelerogramas originales a) d) g), corregidos por línea base, filtrados y escalados b) e) h) y recortados y diezmados c)f)i) para los registros de Chi-Chi Taiwán/ HWA057, Chuetsu-oki/ NIGH19, Loma Prieta/ Hayward City Hall respectivamente.

Fuente: Autor

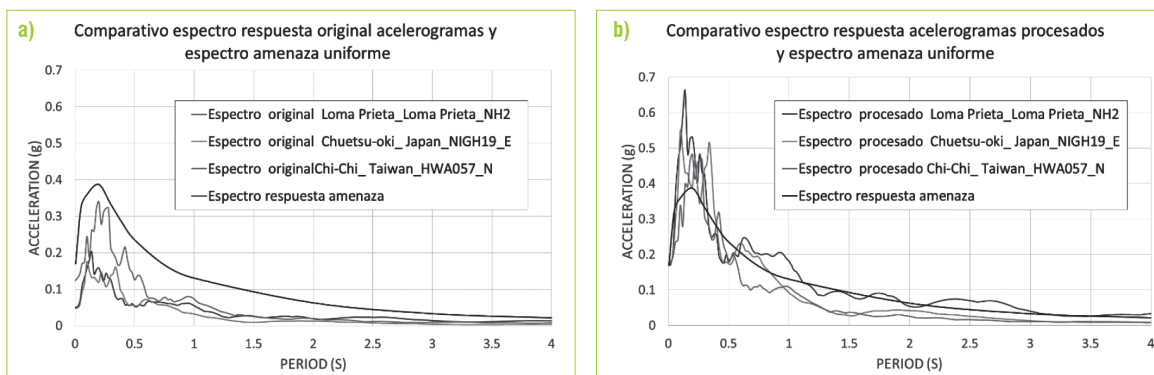


Fig. 8 a) Espectros de respuesta acelerogramas originales b) Espectros de respuesta acelerogramas procesados de los registros de Chi-Chi Taiwán/ HWA057, Chuetsu-oki,/ NIGH19, Loma Prieta/ Hayward City Hall.

Fuente: Autor

Acelerogramas Fuente Lejana.

La última búsqueda correspondió a las señales de la fuente lejana- Benioff Profunda para lo cual se tuvo en cuenta los siguientes criterios: eventos registrados a distancias entre 100 y 200 km, provenientes de falla tipo Benioff, que se encuentren en un intervalo de magnitud entre 3 y 6.6 y que presenten registros de velocidad entre 600 y 1200 m/s (rango de velocidad de propagación de ondas sísmicas en roca).

Teniendo en cuenta que no se presentan muchos registros de movimientos fuertes provenientes de este tipo de falla, se recurrió a los registros del sismo Calima (Valle) del 8 de febrero de 1995 a las 18:40:25 de magnitud local: 6,6, detectados por

las siguientes estaciones: “Tado” geología: roca, topografía ondulada, distancia hipocentral: 163.73 km, Estación “Riosucio”, geología: roca, topografía escarpada, distancia hipocentral: 209.4 km; Estación “Embalse de Prado”, geología: roca, topografía: escarpada, distancia hipocentral: 232.94 km.

En la Fig. 9 se presentan los acelerogramas originales seguidos del filtrado, corregido por línea base y escalado y finalmente los recortados y diezmados para cada uno de los registros mencionados. En la Fig. 10 se observa el comparativo entre los espectros de respuesta de las señales originales y los espectros de respuesta de los acelerogramas procesados, en relación con el espectro de amenaza uniforme.

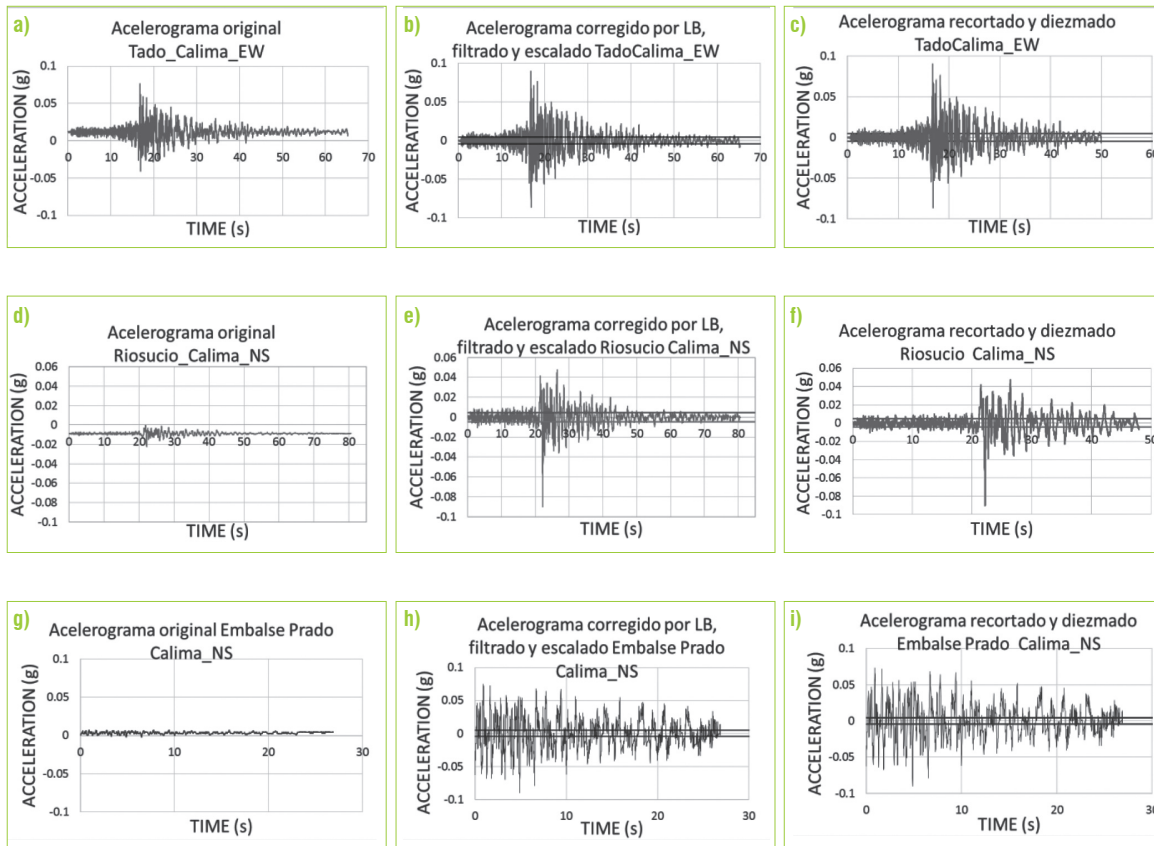


Fig. 9 Acelerogramas originales a) d) g), corregidos por línea base, filtrados y escalados b) e) h) y recortados y diezmados c) f) i) para los registros del sismo Calima (Valle) en las estaciones /Tado / Riosucio/ Embalse de Prado respectivamente

Fuente: Autor

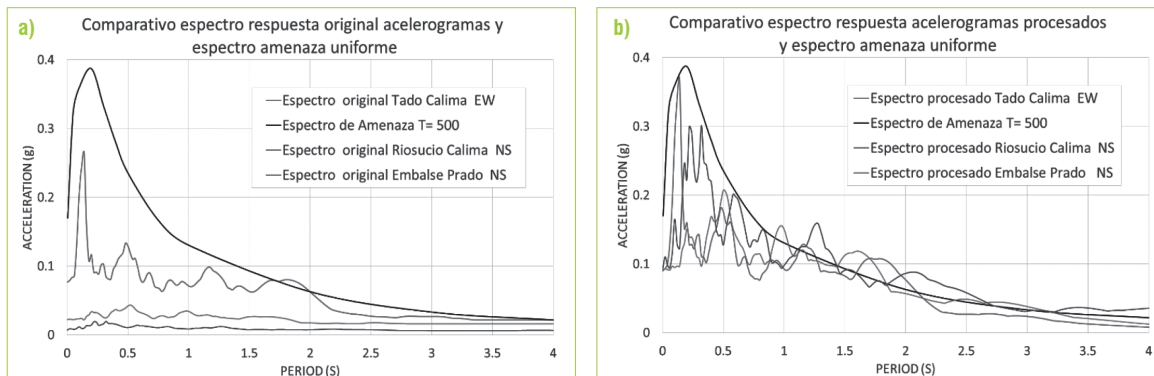


Fig. 10 a) Espectros de respuesta acelerogramas originales b) Espectros de respuesta acelerogramas procesados de los registros del sismo Calima (Valle) en las estaciones /Tado / Riosucio/ Embalse de Prado

Fuente: Autor

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente documento se expone brevemente la metodología usada para la búsqueda de acelerogramas reales que representen movimientos de terreno que pueden incidir en el comportamiento de la Presa del Embalse Teatinos, con el fin de utilizarse en el análisis dinámico de la misma.

Como información preliminar base, se adoptaron los resultados del estudio de amenaza sísmica para el lugar donde se localiza el embalse y se definió como espectro de referencia u objetivo la curva que representa el espectro de amenaza uniforme para un periodo de retorno de $T=475$ años, equivalente a eventos considerados como “sismo máximos probable” S.M.P, definido dentro de los criterios de verificación sísmica de presas del boletín No. 72 de 1989 “Directrices para la selección de parámetros sísmicos para Grandes Presas” publicado por la Comisión Internacional de grandes Presas ICOLD.

A efectos de complementar el análisis dinámico bajo diferentes escenarios, debe realizarse el ejercicio similar de búsqueda o escalarse las señales seleccionadas de tal manera que se verifique que los espectros de respuesta coincidan o lleguen a un nivel cercano en

relación a los espectros de amenaza del periodo de retorno $T=187.5$ años correspondiente al sismo básico de operación “S.B.O” y al espectro del periodo de retorno $T=2475$ años correspondiente al sismo máximo creíble “S.M.C” definidos en el citado boletín No. 72 de 1989 publicado por ICOLD.

En el proceso de consulta en la base de datos de la Red Nacional de Acelerógrafos RNAC, se encontró que la información disponible corresponde a registro de eventos de baja energía, debido a que las magnitudes de los eventos nacionales presentados no son tan altas, a diferencia de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares, provenientes de la base de datos PEER. De otra parte, es pertinente mencionar, que la base de datos nacional no permite consultas con diversos criterios como mecanismo de falla o velocidades de onda de corte V_s , lo cual restringe la precisión de la búsqueda.

Se seleccionaron tres acelerogramas por cada fuente sísmica, que fueron procesados verificando que presentaran espectros de respuesta similares al espectro de amenaza, en cada uno de los tramos correspondientes de la curva, en la Tabla 4 se resume brevemente las señales seleccionadas con sus respectivas características.

Tabla 4 Resumen registros seleccionados para cada fuente sismogenica.

Fuente/Sistema de falla asociado	Nombre del evento sísmico/ estación registro	Fecha	Magnitud	Factor de Escala
Fuente cercana/ Bucaramanga Santa Marta	Quetame (Cundinamarca)/ Villavicencio	24 de mayo de 2008,	5.7	2.38
	Loma Prieta/ Monterrey City Hall	18 de octubre de 1989	6.93	2.50
	Northridge/ Mt Wilson – CIT seis ST	17 de enero de 1994	6.69	1.14
Fuente intermedia/ Falla Frontal	Chi-Chi Taiwán/ HWA057	20 de septiembre de 1999	7.62	1.44
	Chuetsu-oki,/ NIGH19	16 de julio de 2007	6.8	3.14
	Loma Prieta/ Hayward City Hall	18 de octubre de 1989	6.93	3.39
Fuente lejana/ Benioff Profunda	Calima (Valle)/Tado	8 de febrero de 1995	6.6	1.49
	Calima (Valle)/ Riosucio		5.81	
	Calima (Valle)/ Embalse de Prado		17.82	

Fuente: Autor

Es de anotar, que, dentro de las limitaciones de los resultados presentados, se tiene la escasa información de registros de movimientos fuertes con aceleraciones significativas que provengan de fuentes lejanas como Benioff profunda, por lo tanto, induce a que en el procesamiento de las señales se escalen con valores superiores a 3, lo cual puede modificar la naturaleza de la señal original.

V. AGRADECIMIENTOS

A Proactiva Aguas de Tunja S.A E.S. P, empresa operadora de los servicios de acueducto y alcantarillado de la ciudad, quien apoyo con el suministro de información del Embalse Teatinos, financiación de la fase exploratoria y

autorización para disponer del tiempo requerido para adelantar el estudio.

Al ingeniero Edgar Eduardo Rodríguez Granados, quien realizó la dirección del trabajo poniendo a disposición su amplio conocimiento en el tema y experiencia y facilitando el apoyo del equipo de trabajo de Ingeniería y Geotécnicos S.A.S especialmente el acompañamiento y orientación del ingeniero Miguel Ángel Sánchez Salinas.

VI. REFERENCIAS

Acevedo, A.B (2012). Criterios sismológicos para seleccionar acelerogramas reales de la red nacional de acelerógrafos de Colombia

para su uso en análisis dinámicos. Revista EIA, 17, 57-70

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Universidad De Los Andes, INGEOMINAS, 1996. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia

Bommer, J. J. and. Acevedo, A. B (2004). "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis," Journal of Earthquake Engineering, 8, 1 – 50.

Bommer, J.J. Acevedo, A.B. and Douglas, J. [2003a] \The selection and scaling of real earthquake accelerograms for use in seismic design and assessment," Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit, American Concrete Institute.

Bommer, J.J. and Ruggieri, C. 2002. The specification of acceleration time-histories in seismic design codes," European Earthquake Engineering 16(1), 3 - 17.

Bommer, J.J., Scott, S.G., Sarma, S.K., (2000). Hazard - consistent earthquake scenarios. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19: pp. 219– 231.

García, L. (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los Andes. Bogotá.

ICOLD Bulletin 72 (1989). Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines, committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.

Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Englewood Cliffs. Prentice hall

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Reglamento Colombiano de

construcción Sismo Resistente, NSR-10. Bogotá, 2010.

Pardo, A. (2014) Criterios de selección de acelerogramas reales para su uso en análisis dinámicos para la ciudad de Medellín. Maestría en estructuras. Universidad EAFIT, Medellín.

RECURSOS ELECTRÓNICOS

Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Ground Motion Database. Consultado Abril 2017 de <http://ngawest2.berkeley.edu>

Consulta general de acelerogramas. Red nacional de acelerógrafos. Servicio Geológico Colombiano. Consultado Abril 2017 de <http://www2.sgc.gov.co>