

EL TERREMOTO DE AREQUIPA, PERÚ DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 ($M_w=8.2$), EFECTOS DE SITIO EN LAS CIUDADES DE AREQUIPA, MOQUEGUA, ILO Y TACNA Y SU RELACIÓN CON LOS DAÑOS EN LAS EDIFICACIONES

MSc. Javier Lermo, MSc. Luis Lázares* y MSc. Julio Cuenca
Coordinación de Ingeniería Sismológica; Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México, México.
* f_lazares@hotmail.com

RESUMEN

Efectos locales de sitio son analizados en varias ciudades del Perú, a partir de datos de réplicas ($4.2 < M_s < 6.6$) del terremoto de Arequipa ($M_w=8.2$, $M_s=7.9$) de fallamiento inverso. El método de Nakamura y una variación del método estándar (método promedio) fueron aplicados a los datos mencionados, registrados en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Ilo y Camaná. Amplificaciones relativas mayores a 10 veces fueron observadas en la mayoría de ellas dentro del intervalo de frecuencias siguiente: en Arequipa de 1 a 20 hertz; en Tacna de 0.3 a 10 hertz; y en Moquegua, Ilo y Camaná de 2 a 10 hertz. Los daños en las edificaciones responden a los efectos de sitio encontrados en las cuatro ciudades.

SUMMARY

Local soil effects in several towns of Peru from aftershock data ($4.2 < M_s < 6.6$) of the 23rd June 2001 Arequipa thrust mechanism earthquake ($M_w=8.2$, $M_s=7.9$) are analyzed. Nakamura's method and a variation of the spectral ratio method (standard average) were applied to the mentioned aftershock data recorded in the towns of Arequipa, Moquegua, Tacna and Ilo. Amplifications ratios larger than 10 times were observed in all of them, however the frequency ranges in which those occurred are the following: in Arequipa from 1 to 20 hertz; in Tacna from 0.3 to 10 hertz; and in Moquegua, Ilo, and Camaná, from 2 to 10 hertz. A high correlation is observed between the construction damaged areas in all the mentioned towns with their analyzed local soil effects.

1. INTRODUCCIÓN

El terremoto de Arequipa-Perú del 23 de junio del 2001 ($M_w=8.2$) de fallamiento inverso y con profundidad de 38 km, se localizó en la costa del Pacífico frente a la ciudad de Ocoña, Arequipa. De acuerdo a la distribución de réplicas y los daños observados muestra una gran directividad hacia el sureste. La aceleración máxima registrada en la ciudad de Moquegua fue de 284 gal (CISMID). Se reportan intensidades MM de VII y VIII en las ciudades de Moquegua y Tacna (IGP-IGUNSA). Esta zona presenta un periodo de recurrencia de aproximadamente 100 años (Ref. 1).

Los autores enterados de lo ocurrido en el Sur del Perú, decidieron realizar un viaje de estudio técnico hacia esta zona, gracias al apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El propósito principal del viaje fue registrar las réplicas del sismo principal en algunas ciudades, con el objeto de estimar los efectos de sitio y correlacionarlos con los daños observados, para ello se utilizaron tres acelerógrafos digitales de 24 bits marca Kinometrics.

2. TECTÓNICA Y SISMICIDAD EN LA REGIÓN

En la figura 1 se muestra la costa sureste de Perú, donde la placa oceánica de Nazca penetra debajo de la placa continental Sudamericana, a una velocidad de 8.4 cm/año y dirección de N80°. Las líneas continuas muestran la trinchera Perú-Chile y la costa peruana; mientras que los círculos abiertos muestran la distribución espacial de 101 réplicas reportadas por el NEIC ($M > 4$), ocurridas durante los primeros 21 días después del sismo principal. Para el evento principal (estrella grande) varias agencias han reportado sus parámetros de localización y fuente (tabla 1), de ellas se eligió como la más consistente, la localización: 16.20° S, 73.75° W con profundidad de 38 Km (IGP). La magnitud ($M_w = 8.2$) y los parámetros de fuente se tomó de la agencia EIC, que reporta una falla inversa de bajo ángulo ($M_0 = 2.2 \times 10^{21}$ Nm, $az = 309$, $buz = 21$ y $corr = 61$), que se propagó hacia el extremo sureste formando dos zonas de liberación máxima de energía: la primera alrededor del evento principal y la segunda al sureste concentrada en las coordenadas 17.5° S y 72.0° W (figura 1). Esta segunda zona de ruptura se confirma por la presencia de las tres réplicas mayores registradas, las cuales se han representado en la figura 1 con estrellas más pequeñas ($M = 6.3, 6.8$ y 7.6).

Por otro lado, el área de la falla estimada por EIC, es de 200 x 100 Km aproximadamente. En la figura 1 se muestra con líneas punteadas esta área, la cual presenta un estrangulamiento en su parte central provocada por la ausencia de réplicas. Esta ausencia se debe posiblemente a la coincidencia de esta zona con las áreas de ruptura de dos sismos recientes marcados con los números 6 y 13 simbolizados con estrellas pequeñas oscuras, así como otros 11 sismos importantes ($M > 5.5$) previos al evento del 23 de junio del 2001 (tabla 2). Por último, con líneas discontinuas se traza aproximadamente el área de ruptura del terremoto de 1868 (Ref. 1), con el objeto de compararlo con este sismo de Arequipa que resulta de menor tamaño.

Tabla 1: Parámetros de fuente del temblor de Arequipa del 23 de Junio, 2001

Fuente	Latitud	Longitud	Prof. (Km)	M_0 (Nm)	Az	Buz	Corr	MI	Ms	M_w
CMT	17.21 S	73.02 W	25.7	4.9×10^{21}	318°	14°	79°		7.9	8.4
USGS	16.140 S	73.312 W	8	3.7×10^{21}	263°	6°	26°			8.3
NEIC	16.224 S	73.604 W	33N							8.4
IGP	16.20 S	73.75 W	38					6.9	7.7	8.2
EIC	16.15 S	73.40 W	30	2.2×10^{21}	309°	21°	61°			8.2

CMT, Harvard University; USGS, U.S. Geological Survey; NEIC, National Earthquake Information Center; IGP, Instituto Geofísico del Perú; EIC, Earthquake Information Center, Japón (Kikuchi and Yamanaka, 2001); Az=Azimut, Buz=buzamiento, Corr=corrimiento, MI= magnitud local, Ms=magnitud superficial, M_w =magnitud de momento.

3. MOVIMIENTO DEL TERRENO

En la figura 2 se muestran los registros (CISMID-UNI) y los espectros de respuesta de aceleración de las componentes horizontales de campo libre que se obtuvieron en la ciudad de Moquegua del evento principal. Destaca la gran aceleración observada en esta ciudad (284 gal, dirección EW), así como su gran duración en la etapa intensa que llegó a ser más de medio minuto. Este registro se obtuvo de un acelerógrafo localizado sobre depósitos sedimentarios (conglomerados) productos del acarreo del río Tumilaca que amplificó el movimiento.

Tabla 2. Sismos previos (M>5.5) en la región

	Fecha	Latitud S	Longitud W	Prof (km)	Magnitud
1	1948-05-11 08:56	-17.40	-71.00	60	7.1 Ms NOAA
2	1960-01-13 15:40	-15.80	-72.80	120	7.5 Ms NOAA
3	1968-08-11 02:41:52.8	-15.55 ^a	-73.95 ^a	86.0 ^a	5.6 mb USGS
4	1973-07-28 22:18:14.9	-16.40 ^a	-71.35 ^a	117.95 ^a	5.7 mb NEIS
5	1977-12-31 07:53:13.9	15.70 ^a	-71.75 ^a	132.19 ^a	6.0 mb ISC
6	1979-02-16 10:08:53.4	-16.85 ^a	-72.70 ^a	50.07 ^a	6.9 Ms NEIS
7	1984-06-18 11:20:15.5	-16.00 ^a	-72.5 ^a	94.95 ^a	5.8 mb ISC
8	1987-08-13 152306.93	-17.90	-70.93	36	6.4 Ms USGS
9	1988-04-12 231955.57	-17.19	-72.31	33	7.0 Ms USGS
10	1988-04-13 003931.17	-17.26	-72.52	16	6.2 Ms USGS
11	1989-11-29 010014.85	-15.81	-73.24	70	6.5 mb PAS
12	1998-10-08 045142.89	-16.12	-71.40	136	6.4 mb BRK
13	1999-04-03 061718.36	-16.66	-72.66	87	6.8 Mw USGS

^a, Ref. 2.

4. EFECTOS DE SITIO Y DAÑOS EN EDIFICACIONES

Uno de los métodos más populares para estimar efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad es el uso de la razón espectral (de espectros de Fourier) de registros de temblores (método estándar), obtenidos simultáneamente en estaciones ubicadas sobre suelo blando con respecto a una estación de referencia ubicada en suelo firme (Ref. 3). En la figura 3 se muestra este método, donde se grafican los registros, sus espectros de Fourier y la razón espectral de las componentes NS de una réplica del sismo principal para una estación en suelo blando (CRIS) con respecto a otra en roca (HUAC), ambos ubicados en la ciudad de Arequipa. Otro método, es la estimación de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (método de Nakamura). Este método fue aplicado por Lermo y Chávez-García (Ref.4) a la parte intensa de las ondas-S en registros de movimientos débiles con resultados que sugirieron que si el efecto de sitio es causado por una geología simple, proporciona una estimación robusta de la frecuencia y amplitud del primer modo de resonancia. La figura 3 muestra también este método para la estación en suelo blando.

Comparando las razones espectrales estimadas con estos dos métodos, observamos que existe una gran diferencia en cuanto a su amplificación relativa. Por lo que se tuvo que buscar una nueva alternativa para estimar el efecto de sitio en lugares donde no se tenía el mismo registro de la réplica en la estación de referencia. Esta alternativa se muestra también de la figura 3, llamándola método estándar-promedio

(EP), que consiste en obtener un espectro de Fourier-promedio de varias réplicas en la estación de referencia. Si ahora usamos este espectro-promedio para estimar el efecto de sitio en los lugares donde no se tiene el mismo registro en la estación de suelo blando y en la de referencia, el resultado es mucho mejor que el estimado con el método de Nakamura, como se demuestra en la figura 3, donde el resultado presenta aproximadamente la misma amplificación que el obtenido con el método estándar.

Tabla 3: Datos de A_{max} en sitios firmes desde las réplicas del temblor de Arequipa ($M_w=8.2$)

Fecha	Origen	Lat.S (°)	Long.W (°)	Prof (Km)	M	Dept.- Estac.	Amax (gal)			Dist. Km	Prom Horz cm/s**2	Comentarios
							Vert	NS	EW			
23/06/2001	20:33:13	16.15	73.75	30	8.2	Moq-Avia	177	231	284	320	258.86	suelo
01/07/2001	11:06:30	17.14	73.05	33	5.2	Areq-arem	0.28	0.76	0.77	182	0.7650	terreno firme
						Areq-unas	0.45	0.54	0.59	181	0.5655	terreno firme
01/07/2001	21:32:52	17.94	71.57	33	4.2	Areq-ovan	0.68	1.32	1.01	169	1.1752	terreno firme
						Areq-caym	0.57	0.89	1.03	176	0.9625	terreno firme
						Areq-arem	0.46	1.07	1.46	162	1.2799	terreno firme
03/07/2001	12:57:41	16.51	73.74	29	5.8	Areq-cris	0.68	1.32	1.01	234	1.1752	suelo
						Areq-huac	0.13	0.19	0.17	232	0.1802	roca
						Areq-juli	0.63	0.72	1.02	234	0.8828	terreno firme
05/07/2001	13:53:49	15.56	73.45	62	6.6	Moq-chen	4.81	7.23	7.1	325	7.1652	suelo
						Moq-sana	4.00	6.74	7.48	323	7.1196	suelo
06/07/2001	09:21:56	16.12	73.34	33	4.8	Tac-cent	0.18	0.26	0.18	390	0.2236	terreno firme
						Tac-cono	0.12	0.19	0.29	391	0.2451	terreno firme
						Tac-nuev	0.36	0.48	0.64	387	0.5656	suelo
07/07/2001	05:19:43	16.46	73.41	33	5.0	Tac-unjb	0.05	0.22	0.12	376	0.1772	terreno firme
07/07/2001	10:06:40	17.53	72.36	33	4.8	Tac-tupa	0.6	0.85	0.81	229	0.8302	roca
						Tac-unjb	0.33	0.68	0.55	230	0.6184	terreno firme
07/07/2001	10:10:02	17.67	72.04	33	4.9	Tac-tupa	0.85	1.67	1.69	192	1.6800	roca
						Tac-unjb	0.58	1.72	0.94	193	1.3860	terreno firme
07/07/2001	11:13:47	17.52	72.8	33	4.6	Tac-tupa	0.89	0.86	0.97	274	0.9166	roca
						Tac-unjb	0.39	0.84	0.52	275	0.6985	terreno firme
07/07/2001	11:17:32	17.57	71.8	33	5.2	Tac-tupa	1.37	1.84	2.45	170	2.1665	roca
						Tac-unjb	1.01	2.92	1.57	171	2.3444	terreno firme
07/07/2001	11:49:21	17.41	72.13	33	4.9	Tac-tupa	0.24	0.28	0.33	209	0.3060	roca
						Tac-unjb	0.15	0.25	0.37	210	0.3157	terreno firme
07/07/2001	11:55:59	17.54	72.14	33	4.7	Tac-tupa	1.33	2.23	3.3	206	2.8162	roca
						Tac-unjb	1.36	1.88	2.13	206	2.0088	terreno firme
07/07/2001	13:31:04	17.75	72.46	33	4.7	Tac-tupa	0.27	0.36	0.31	235	0.3359	roca
07/07/2001	13:36:16	17.62	72.21	33	4.6	Tac-tupa	0.29	0.41	0.44	211	0.4252	roca
08/07/2001	21:15:18	16.73	72.65	33	4.7	Ilo-bri5	1.05	0.94	0.85	174	0.8961	terreno firme
						Ilo-magi	0.26	0.33	0.27	174	0.3014	roca

4.1 CIUDAD DE AREQUIPA

En la figura 4 se muestra el mapa urbano de la ciudad de Arequipa, y con círculos oscuros los ocho lugares donde se registraron réplicas del sismo de Arequipa (CAYM, JULIO, MUSEO, UNSA, OVAN, CRIS, AREM y HUAC). La estación de referencia (HUAC), se encuentra sobre rocas ignimbríticas del Cretácico, donde se analizaron once réplicas para obtener el espectro-promedio y poder aplicar el método EP. En esta misma figura se muestran ocho registros de tres réplicas de magnitudes similares,

con el objeto de comparar sus amplitudes con respecto a la estación de referencia (HUAC). En la parte inferior de la figura 5 se presentan comparaciones entre los tres métodos descritos para la estación de HUAC y CRIS. Finalmente, en la parte superior de la figura 5 se muestran los resultados para las componentes horizontales (NS y EW) de las ocho estaciones analizadas: Con línea gruesa se muestra la estación de referencia, a partir de ella, se puede notar que la estación OVAN presenta una amplificación relativa de aproximadamente cinco veces entre 2 y 20 hertz, mientras que las estaciones de UNSA y MUSEO, esta amplificación presenta valores mayores a 10 veces en un rango de frecuencia mayor (0.5 a 20 hertz) diez veces entre 1 y 20 hertz.

Los daños mas severos se concentraron en edificaciones antiguas y consideradas “monumentales” construidas con bloques de material volcánico llamado ignimbrita conocidos coloquialmente como “sillar”. Estas edificaciones se concentran mayormente en la zona antigua de la ciudad. La más afectada fue la catedral (figura 4), la cual sufrió la caída de una torre quedando la otra a punto de colapsar. Esta edificación se encuentra a pocos metros de la estación MUSEO por lo que recibió la mayor demanda sísmica de la ciudad. Sin embargo viviendas autoconstruidas de sillar asentadas en roca (figura 6), donde se ubicó la estación HUAC, no fueron afectadas debido a que las amplificaciones en esta zona fueron bajas. Las edificaciones de ladrillos de arcilla en su mayoría no presentaron daños; pero, aquellas ubicadas donde se colocó la estación CRIS sufrieron daños severos (figura 7) debido a que es una zona con nivel freático moderado-alto, y aunque las amplificaciones relativas fueron menores que en otras estaciones, fueron suficientes para provocar asentamientos en el suelo afectando a edificaciones de uno y dos pisos (periodos entre 0.1 y 0.2). Edificaciones dañadas de concreto reforzado fueron aquellas que presentaban gran flexibilidad en alguna de sus direcciones, como por ejemplo el pabellón de ingeniería industrial de la Universidad Nacional San Agustín (UNSA) con daños en su tabiquería, ubicado junto a la estación UNSA la cual presentó amplificaciones relativas mayores a diez y en un rango de frecuencia entre 0.5 a 20 hertz, afectando a éste y otros pabellones que tienen periodos entre 0.3 a 0.5 aproximadamente (de 3 a 5 pisos). De igual manera el pabellón de 7 pisos y sótano del hospital Carlos Alberto Segúin, ubicado cerca de la zona antigua de la ciudad, sufrió daños moderados a severos sólo en su tabiquería; los elementos estructurales no fueron afectados.

4.2 CIUDAD DE MOQUEGUA

La figura 8 muestra el mapa urbano y los seis lugares (círculos oscuros) donde se registraron réplicas del sismo (AVIA, PLA5, MUNI, AYAC, SANA y CHEN). La estación de referencia (CHEN), se encuentra sobre un conglomerado mejor compactado que los otros sitios, donde se analizaron nueve réplicas para obtener el espectro-promedio y poder aplicar el método EP. En esta misma figura 8 se muestran seis registros de dos réplicas de magnitudes similares. En éstos se observan amplitudes mayores con respecto a la estación de referencia. En la parte inferior de la figura 9 se presenta una comparación del método de Nakamura para las seis estaciones, donde se ha trazado con línea mas gruesa la estación de referencia que presenta menor amplificación respecto a las otras. Finalmente, en la parte superior de esta misma figura 9 se muestran los resultados para las dos componentes horizontales. Nuevamente, la línea gruesa corresponde a la estación de referencia. A partir de esta línea podemos observar una amplificación relativa en las cinco estaciones, entre cinco y diez veces en un rango de frecuencias de 2 a 20 hertz aproximadamente, siendo la estación SANA la que muestra una mayor amplificación.

En esta ciudad se presentaron los mayores daños por el sismo de Arequipa, y se refleja en el espectro de respuesta de aceleraciones del registro del evento principal (figura 2) el cual muestra una demanda sísmica en promedio de 0.6g en ambas direcciones para una banda de periodos de estructuras de 0.1 a 0.7 s. Esto explica los daños muy severos a edificaciones de adobe (figura 8), tanto antiguas (en

promedio de 100 años y ubicadas en la zona monumental) y las recientes (en promedio 20 años y ubicadas en las zonas periféricas). Estas últimas se ubican en zonas de topografía con pendientes fuertes, aumentando el efecto de sitio. Colegios de concreto reforzado construidos antes de la vigencia del último código sismorresistente (1997) sufrieron daños moderados a severos, sobre todo de columna corta. Un claro ejemplo de efecto de sitio se observa en las figura 10, son dos colegios localizados cerca de las estaciones AYAC y SANA respectivamente. La que presentó daños graves de columna corta fue la ubicada en SANA, donde hubieron mayores amplificaciones. Colegios construidos con el código sismorresistente vigente se comportaron satisfactoriamente.

4.3 CIUDAD DE TACNA

En esta ciudad, se analizaron siete lugares (NUEV, TUPA, CENT, HOSP, UNJB, CANO y PALM). La figura 11 muestra sus ubicaciones, la estación de referencia (PALM), y una comparación de los registros de dos réplicas de diferente magnitud. La parte inferior de la figura 11 muestra la aplicación del método de Nakamura a cinco réplicas para evaluar el sitio de referencia y probar una vez más el nuevo método EP. Mientras que en la parte superior se muestra los resultados del efecto de sitio para esta ciudad, donde se observa una gran diferencia con respecto a las otras ciudades, ya que en este caso, los seis lugares analizados muestran amplificaciones relativas mayores a diez veces hacia frecuencias bajas (0.3 a 10 hertz). Esta amplificación tiende a crecer hacia el norte de la ciudad, ya que la estación CANO y las del centro (UNJB, HOSP, CENT) presentan menores amplitudes que las dos del norte (TUPA y NUEV).

Viviendas de adobe ubicados en la zona antigua sufrieron daños severos (estación CENT). Las de ladrillos y bloques de concreto autoconstruidas de dos y tres pisos localizados cerca de las estaciones NUEV y UNJB sufrieron colapso total y parcial (figura 13), por las mayores amplificaciones que tuvieron como demanda y defectos estructurales en su diseño; entre otros: baja densidad de muros (primer piso blando), torsión y mecanismo viga fuerte-columna débil. Como en Arequipa, edificaciones de concreto reforzado flexibles tuvieron daños en su tabiquería como el caso del hospital Hipólito Unanue y así como en Moquegua, varios colegios sufrieron daños por columna corta.

4.4 CIUDAD DE ILO

En esta ciudad solamente se estudiaron tres lugares (MAGI, CARI y BRI5, figura 14). Las dos primeras estaciones no presentan efectos de sitio ya que se encuentran sobre roca, como se puede observar, tanto en los registros mostrados en la figura 14, como en el análisis realizado a seis réplicas de estas dos estaciones (CARI y MAGI) con el método de Nakamura. En la parte superior de la figura 15 se muestra este análisis; mientras que en la parte inferior, se presenta el resultado de aplicar el método EP a la estación BRI5, que se encuentra en una zona de expansión de la ciudad sobre suelos blandos. La amplificación observada en este lugar es aproximadamente menor a cinco veces en un rango de frecuencias entre 2 y 10 hertz. Los daños se concentraron en viviendas de ladrillos de arcilla con defectos estructurales similares a los encontrados en Tacna siendo moderados a severos.

5. CONCLUSIONES

La técnica de Nakamura muestra deficiencia en cuanto a su amplificación. Se propone un método alternativo (estándar-promedio). Los efectos de sitio estimados en las ciudades de Moquegua e Ilo muestran una amplificación de mas de diez veces en una banda de frecuencias entre 2 y 10 hertz, mientras que en la ciudad de Arequipa esta banda se presenta entre 1 y 10 hertz. Sin embargo, en la ciudad de Tacna la banda de amplificación se presenta entre 0.3 a 10 hertz.

Los daños en las edificaciones responden a los efectos de sitio encontrados en las cuatro ciudades. Edificaciones de mampostería de sillar, adobe y ladrillos o bloques de concreto, sufrieron daños severos, colapsos parciales y totales. Las de sillar ubicadas en suelos rocosos no sufrieron daños. Edificios de concreto reforzado flexibles presentaron daños en los muros de tabiquería. Colegios de concreto reforzado, construidas antes de la última norma de diseño sísmico (1997), sufrieron daños severos por la presencia de columnas cortas. Las construidas con la última norma se comportaron satisfactoriamente.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Ing Héctor Palsa Árias-Barajona del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, por su apoyo en el trabajo de campo, así como al CISMID, Municipalidad Provincial de Moquegua. y Universidad Nacional Jorge Basadre de Tacna.

7.

REFERENCIAS

1. Dorbath, L., A. Cisternas and C. Dorbath (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 551-576.
2. Cuenca, J. (1993). Modelación de ondas P y SH en el suroeste del Perú y determinación de Tips en el Perú, Tesis de maestría UNAM, México, p112.
3. Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena, and R. Quaas (1988). A study of relative amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site, *Earthquake Spectra*, **4**, 653-674.
4. Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.

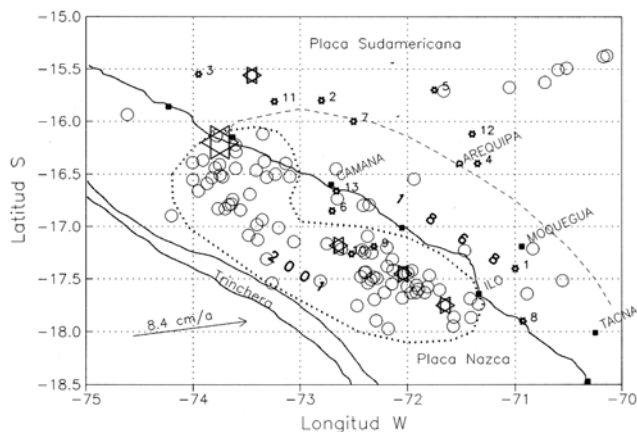


Figura 1. Mapa de la costa sureste de Perú que muestra la ubicación del sismo principal (estrella grande), de las cuatro réplicas más grandes (estrella mediana) y sismos importantes previos (estrella pequeña). Las líneas punteadas y discontinuas muestran el área de ruptura del sismos de 2001 y de 1868, respectivamente. Los cuadrados oscuros representan la ubicación de las cinco ciudades analizadas

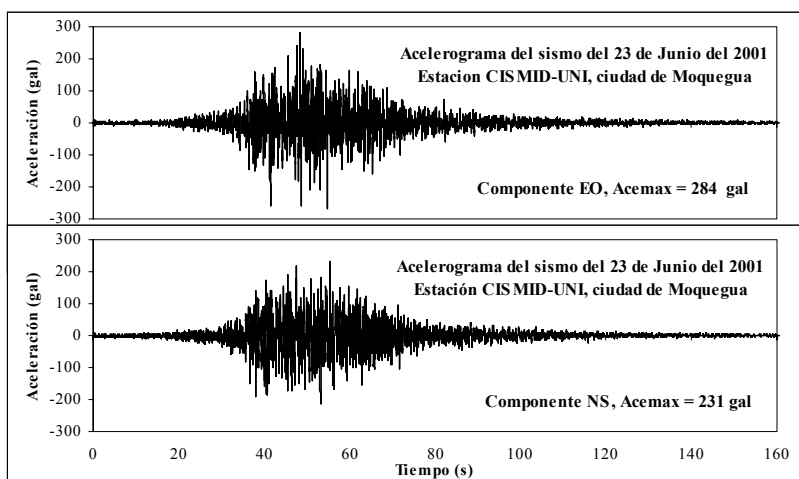
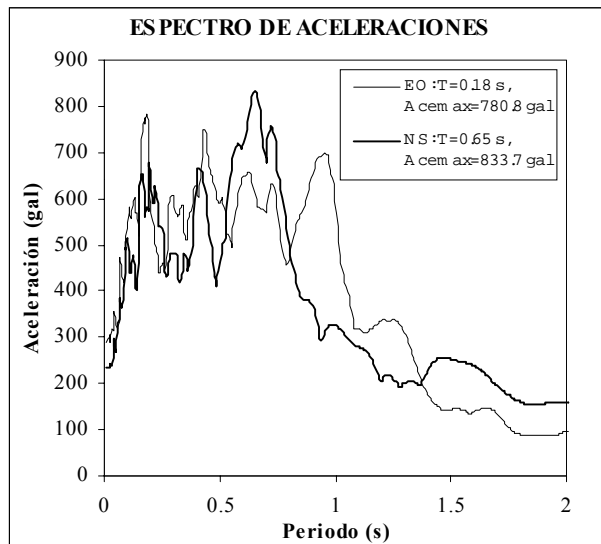


Figura 2: Registros horizontales y espectros de respuesta (5%) del sismo de Arequipa obtenidos en la estación de Moquegua en campo libre (CISMID-UNI).

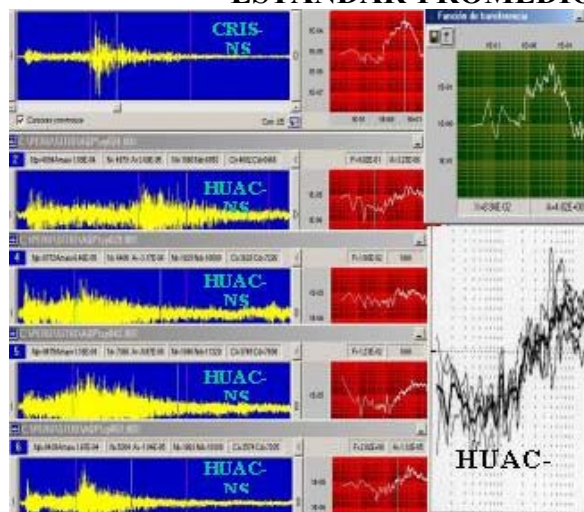
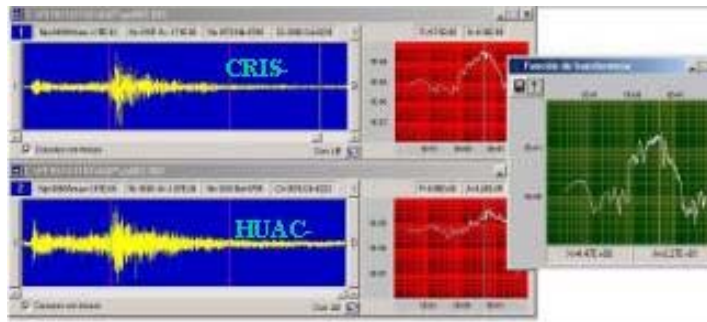
METODO DE NAKAMURA



Figura 3: Comparación de tres métodos para estimar el efecto de sitio. Registros horizontales NS, espectros de Fourier, espectros de Fourier-promedio y razones espectrales.

MÉTODO ESTANDAR-PROMEDIO

MÉTODO ESTANDAR



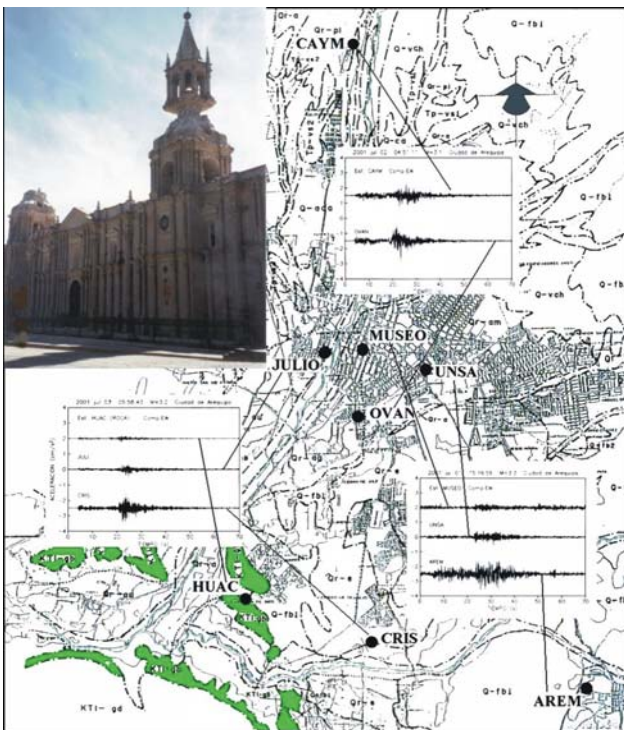


Figura 4: Mapa urbano de la ciudad de Arequipa. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. HUAC, estación de referencia. Comparación de ocho registros (una por cada estación) de tres réplicas con magnitudes similares.

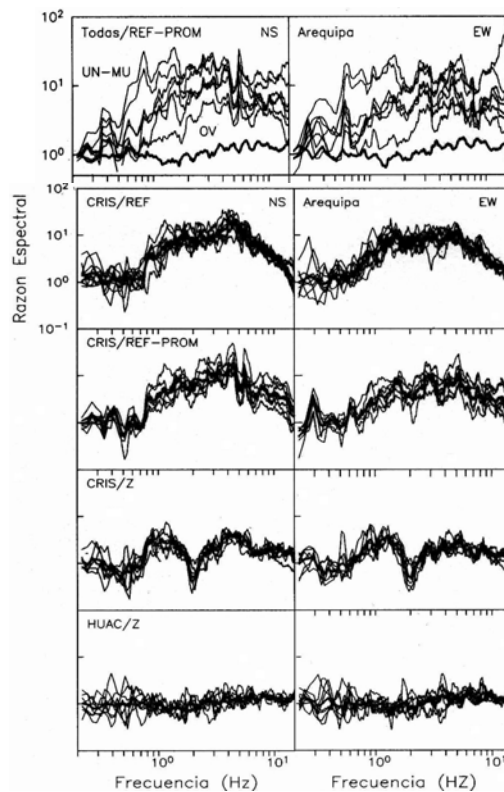


Figura 5: Parte superior, componentes NS y EW del efecto de sitio en las ocho estaciones. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior, comparación de los tres métodos para la estación CRIS y resultados del método Nakamura en la estación de referencia (HUAC).



Figura 6



Figura 7

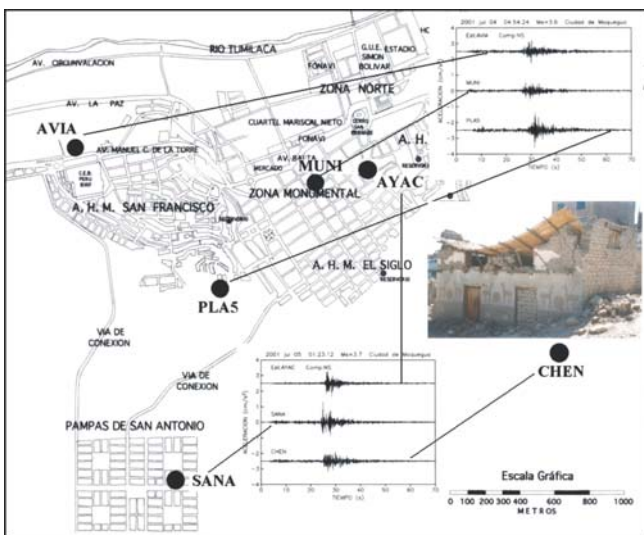


Figura 8: Mapa urbano de la ciudad de Moquegua. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CHEN, estación de referencia. Comparación de seis registros (una por cada estación) de dos réplicas con magnitudes similares.

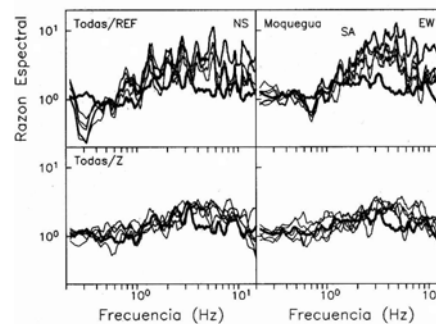


Figura 9: Parte superior, componentes NS y EW del efecto de sitio en las seis estaciones. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior, comparación del método de Nakamura para las seis estaciones, línea gruesa estación de referencia(CHEN).



Figura 10: Arriba, colegio ubicado cerca de estación AYAC. Derecha, colegio cerca de estación SANA.



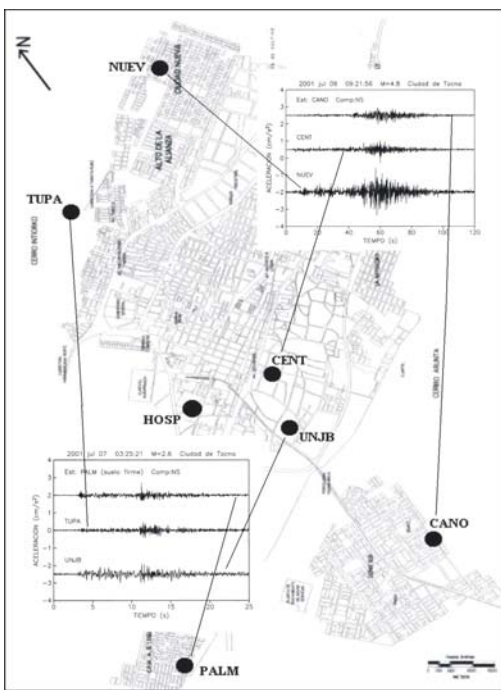


Figura 11. Ciudad de Tacna. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. PALM, estación de referencia. Comparación de seis registros (una por cada estación) de dos réplicas de diferente magnitud.



Figura 13

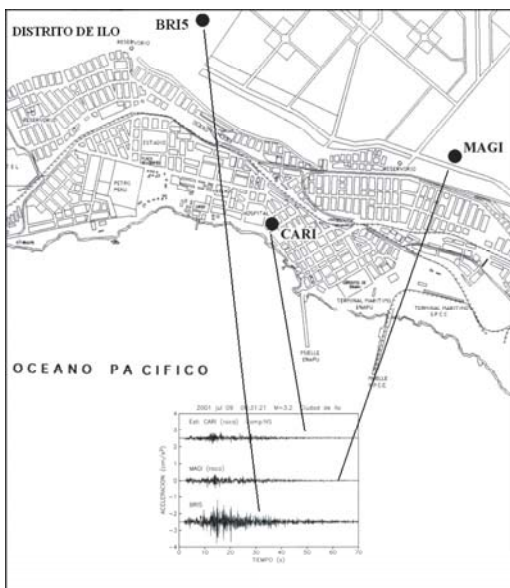


Figura 14: Ciudad de Ilo. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CARI y MAGI, estaciones de referencia. Parte inferior, comparación de tres registros (una por cada estación) de réplicas del sismo de Arequipa

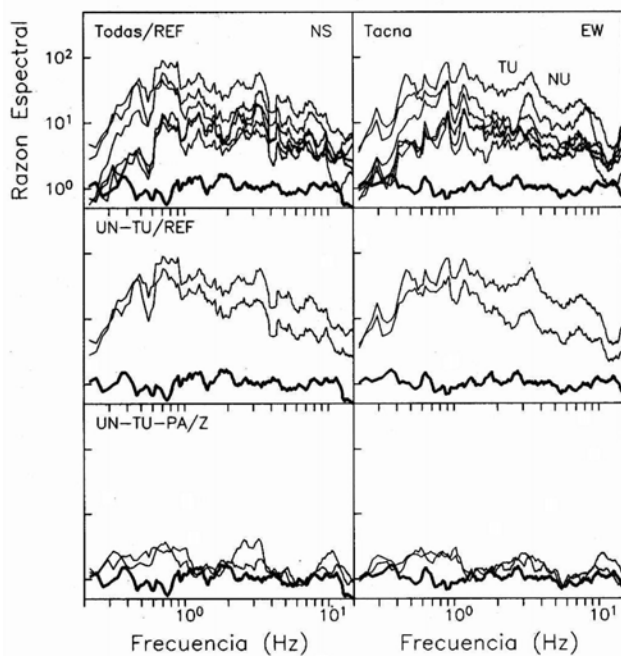


Figura 12 Parte superior, resultados para las componentes NS y EW del efecto de sitio en las siete estaciones. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior, Comparación del método de Nakamura con el método EP para las estación de UNJB y TUPA.

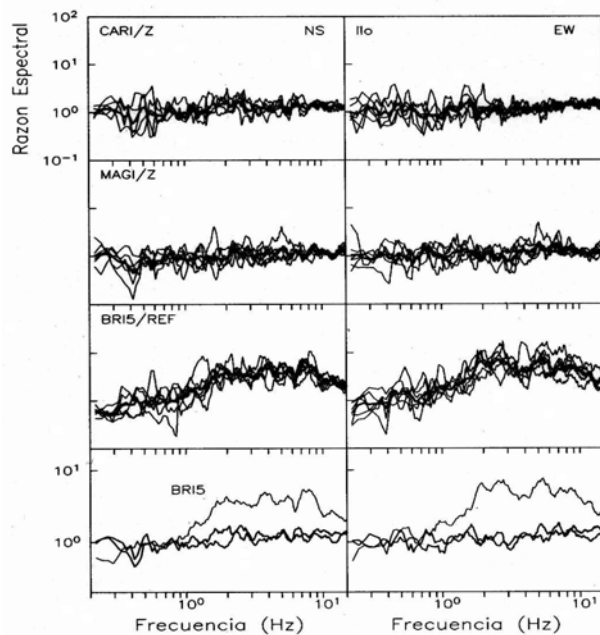


Figura 15. Las primeras cuatro gráficas muestran los resultados de aplicar el método de Nakamura a CARI y MAGI. La quinta y sexta gráfica los resultados de aplicar el método de EP a la estación BRIS. Parte inferior, resultados del efecto de sitio en la estación BRIS.