17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE
Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020
Paper N° 1d-0068

AMPLIFICACIÓN SÍSMICA EN TACNA – PERÚ, USANDO DATOS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS Y ARREGLOS DE MICROTREMORES

SEISMIC AMPLIFICATION IN TACNA-PERU, USING SEISMIC MOTION DATA AND ARRANGEMENTS OF MICROTREMOR

J. Alva[(1)], C. Ortiz[(2)], J. Soto[(2)]

[(1)] *Principal Researcher, National University of Engineering, jalvah@uni.edu.pe, rector@uni.edu.pe*
[(2)] *Researcher, National University of Engineering, cortiz@uni.edu.pe, josotoh@uni.pe*

Abstract

La ciudad de Tacna - Perú, está localizada dentro del área que comprende el anillo de fuego del Pacífico, zona de alta actividad sísmica. De acuerdo con la historia sísmica en los últimos quinientos años ocurrieron terremotos que en más de una ocasión causaron la destrucción total de la ciudad, como el del año de 1868 que presentó una Magnitud Mw=9.0 e intensidad de X MMI (Intensidad de Mercalli Modificada), el último evento sísmico de gran magnitud fue el sismo del 23 de Junio del 2001 de Mw =8.4 el que puso en evidencia que la mayor cantidad de daños se presentaron en los distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza, estos distritos se encuentran ubicados sobre depósitos conformados por arena suelta y depósitos volcánicos.

En esta investigación se analizaron los movimientos de las vibraciones ambientales con microtremores utilizando la metodología propuesta por Nogoshi e Igarashi (1971) y Nakamura (1989), así como ochenta y cuatro registros acelerográficos correspondientes a catorce eventos sísmicos registrados en seis casetas acelerográficas ubicadas en la ciudad de Tacna.

Mediante el análisis de arreglo con microtremores utilizando la teoría de correlación autoespacial (SPAC), se estimaron los perfiles de velocidad de ondas de corte S hasta alcanzar la roca base la que se encuentra a profundidades que varían de 124 m a 306 m de profundidad. Los valores de V_{s30} obtenidos varían de 340 m/s hasta 600 m/s clasificando los suelos como tipo C y D respectivamente según el código ASCE-7. Mediante el análisis de los registros acelerográficos se obtuvieron los espectros de respuesta y se compararon con los espectros obtenidos mediante el análisis de respuesta de sitio no lineal.

Asimismo, los periodos de la zona de estudio se determinaron por tres métodos: cociente espectral de los registros de microtremores (HV-M), cociente espectral de los registros sísmicos (HV-S), la función de transferencia obtenida del análisis de sitio lineal equivalente (FT-LE) y el cociente espectral entre movimiento del suelo y el movimiento de la roca obtenido del análisis de sitio no lineal (NL); observándose que los valores de periodos del suelo se incrementan ante sismos de mayor magnitud con respecto a los valores obtenidos por mediciones de microtremores debido al efecto de la no linealidad del suelo.

Los resultados muestran que los valores de las amplificaciones del suelo en Tacna, varían de 1.3 a 1.6, encontrando que el período de vibración característico para los suelos Tipo D varía de 0.34 s a 0.37 s mediante el método L.E y de 0.75 s a 0.80 s mediante el método N.L; y para suelos Tipo C de 0.15 s a 0.30 s (L.E) y de 0.19 s a 0.34 s (N.L). Los espectros de aceleraciones muestran que los valores de los coeficientes de amplificación, varían de 3.2 a 3.5; estos resultados son superiores a los valores propuestos por la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E-030.

Keywords: Microtremor; Movimiento sísmica; Cociente Espectral.

1. Introducción

El Perú se encuentra ubicado en una zona de alta amenaza sísmica, por la interacción de la Placa de Nazca y la Sudamericana, así como por la actividad de fallas geológicas superficiales, que también generan sismos de considerable magnitud en el interior del continente. Un análisis espacial de la sismicidad muestra una notable disminución en la frecuencia de ocurrencia de sismos frente a la costa de los departamentos de Lima, Moquegua y Tacna, lo cual sugiere que en dichas áreas se viene acumulando energía a liberarse en algún momento en el tiempo [1] como se muestra en la Fig.1a.

Los eventos sísmicos en la mayor parte de casos originan el aumento de la aceleración en la superficie del terreno comparada con la aceleración en la roca a profundidad, aspecto que denominamos amplificación de las ondas, también generan fuerzas sísmicas a las estructuras las cuales han provocado cuantiosas pérdidas materiales y humanas de manera recurrente a edificaciones vulnerables.

Para esta investigación se ha recopilado información de trabajos realizados en la ciudad de Tacna como el de Cortez [2], el de Yamanaka et al. [3], Pulido et al [4] entre otros.

La zona de estudio se ubica al sur de Perú, específicamente en la ciudad de Tacna, los trabajos de campo y mediciones con microtremores se realizaron en las estaciones acelerográficas en las estaciones acelerográficas ubicadas en los distritos de Ciudad Nueva (MCN[1] y SENCICO[1]), Pocollay (UPT[1]), Tacna (UNJBG[1]), Alto de la Alianza (UNJBG-A[2]) y Calana (CIP CALANA[3]). La ubicación de las estaciones se muestra en la Fig.1b.

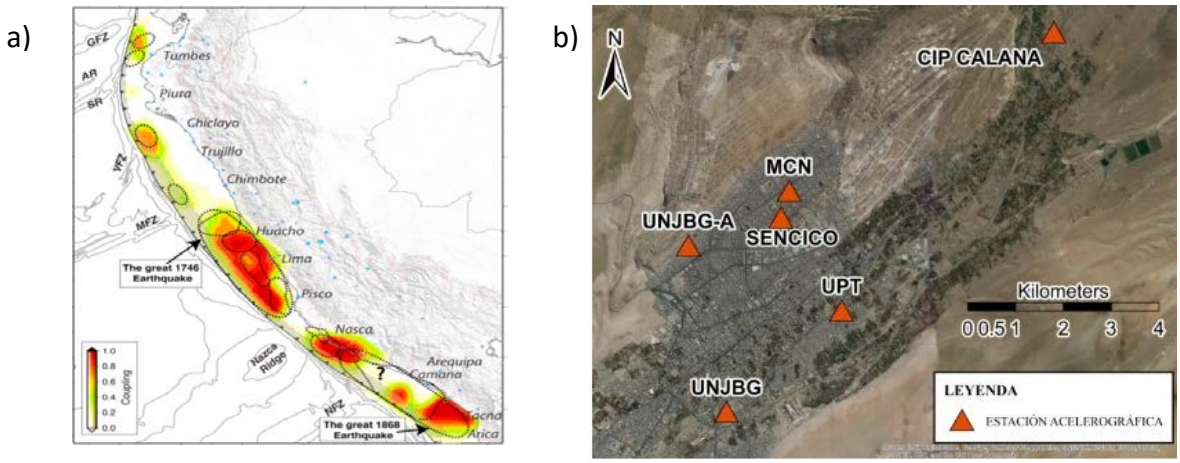

Fig. 1 – a) Áreas con acumulación de energía [1]. b) Ubicación de las estaciones sísmicas

2. Metodología

Para evaluar la amplificación sísmica, se obtuvieron los movimientos de las vibraciones del terreno causados por los eventos sísmicos y las vibraciones ambientales registradas por los microtremores. Luego se evaluó el cociente espectral de ambos movimientos para determinar la frecuencia o periodo predominante de la vibración. Por otro lado, se realizó el análisis de respuesta de sitio para observar la amplificación sísmica, a partir de las características geotécnicas del sitio y un sismo de entrada en roca para el análisis de respuesta de sitio. En la Fig.2 se muestra la metodología para evaluar la amplificación sísmica.

[1] Est. Ac.-Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID-UNI
[2] Est. Ac.-Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil-UNI
[3] Est. Ac.-Colegio de Ingenieros del Perú-Consejo Nacional

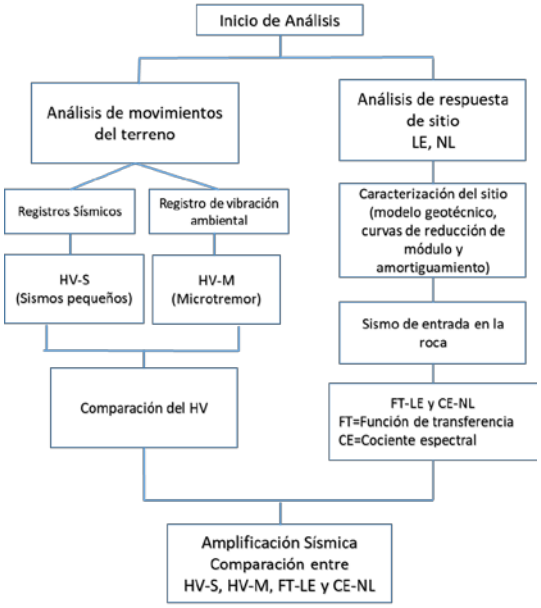

Fig. 2 – Metodología para realizar de análisis de amplificación sísmica

3. Condiciones del Suelo de Tacna

3.1 Geología de Tacna

Tacna presenta una geomorfología tipo Pampa Costera y la subunidad de Valle. El valle de Tacna se formó durante el Pleistoceno. Regionalmente la formación geológica está comprendida desde la era del Cretácico hasta el Cuaternario Holoceno. La secuencia estratigráfica a profundidad del valle del rio Caplina, rio que pasa la ciudad de Tacna, se encuentra constituido por: un primer nivel de depósitos fluvio-aluviales, un segundo nivel de cenizas volcánicas conformado por piedra pómez, un tercer nivel de conglomerados antiguos y por debajo el basamento antiguo [5], como se muestra en la Fig.3.

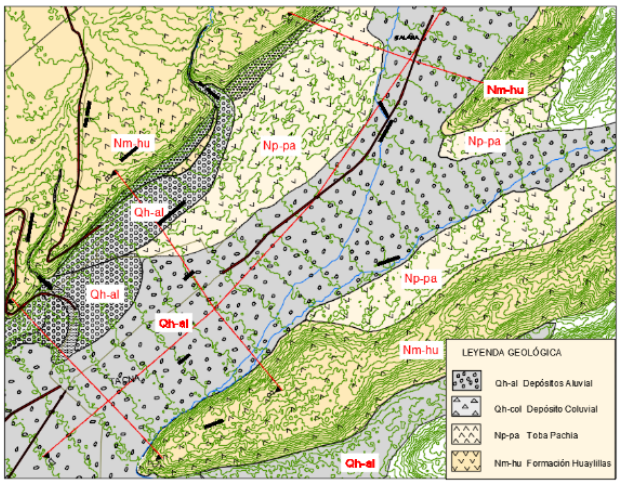

Fig.3 – Mapa Geológico de la Ciudad de Tacna

3.2 Características Geotécnicas

Para este trabajo se consideró sesenta y siete prospecciones correspondientes a exploraciones a cielo abierto [6] y cinco ensayos SPT [2] en los que se registraron las características de los suelos que permitieron clasificarlos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), encontrándose dos tipos de suelos predominantes: grava mal gradada en los distritos de Tacna, Pocollay y Calana y arena limosa en los

distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva, como se aprecia en la Fig.4. Se estima que los depósitos de grava tienen un espesor de 15 m mientras que los depósitos de arena, tienen un espesor de 8 m. Por debajo de los suelos predominantes se tiene un segundo estrato de cenizas volcánicas de color rosado, continuando con un tercer nivel de conglomerados antiguos para posteriormente asentarse sobre la Formación Moquegua, como se aprecia en la Fig.4.

Asimismo, en la zona en la que se encuentra la caseta acelerográfica UNJBG-A (Distrito de Alto de la Alianza) se tiene la presencia casi superficial de roca volcánica conformada por tobas volcánicas extremadamente fracturadas.

Fig. 4 – Suelo gravoso y arenoso de la ciudad de Tacna, respectivamente.

3.3 Ensayos Geofísicos en la Ciudad de Tacna

Para caracterizar el comportamiento dinámico de las estaciones acelerográficas se han realizado mediciones de Arreglo Multicanal de Ondas Superficiales MASW [7], mediciones de microtremores y arreglos de microtremores a través del método SPAC [8]. El número de ensayos realizados fueron: 25 sondajes MASW, 5 arreglos de microtremores y 92 mediciones de microtremores para obtener los perfiles de velocidades de ondas de corte (Vs) y los periodos predominantes del suelo (T).

Los perfiles de velocidad muestran valores de V_{s30} comprendidos entre 340 m/s a 600 m/s y se clasifican según la norma ASCE 7-16-2016 [9] como C y D. Asimismo con los ensayos de microtremores, mediante el análisis de cociente espectral, se obtuvieron los periodos de vibración de los suelos, los que se encuentran en el rango de 0.15 s a 0.34 s [10].

4. Análisis de las Vibraciones Registradas en los Suelos

4.1 Registros Sísmicos

Se analizaron catorce eventos sísmicos con aceleraciones mayores a 10 gals, en cada estación acelerográfica de la ciudad de Tacna, haciendo un total de 84 registros sísmicos del terreno. Asimismo con fines de análisis y verificación de los valores de las aceleraciones obtenidas del análisis de respuesta de sitio, se consideraron tres eventos sísmicos históricos de la región sur y centro del Perú, correspondientes a los sismos de : Ocoña (Mw=8.4) del 23 de junio del 2001, registrado en la Estación Arica Casa (ARI) [2]; Pisco del 15 de agosto de 2007 (Mw=7.9) registrado en la Estación Parcona (PARC) y el sismo de Cañete, del 3 de octubre de 1974 en la estación Parque de la Reserva (PQR), los eventos sísmicos más importantes se muestran en la Tabla 1.

Table 1 – Eventos Sísmicos utilizados

Nro.	Fecha	Magnitud	Intensidad (MM)	Lat. (°)	Long. (°)	Prof. (Km)
1*	1974/10/03-09:21:00	8.1 Mw	VIII Lima	-12.07	-77.04	21
2*	2001/06/23-15:33:00	8.4 Mw	VII-VIII Arequipa, Moquegua y Tacna	-16.08	-73.77	33
3	2003/08/26-16:11:35	5.7 Mw	-	-17.16	-70.67	31.6
4	2004/01/27-11:00:37	5.8 Mw	-	-17.84	-71.07	56.9
5	2004/11/09-13:00:54	4.6 mb	-	-17.53	-70.21	81.5
6	2005/04/16-17:41:16	5.8 Mw	III Arica	-17.65	-69.66	118.7
7	2005/04/20-05:40:47	4.9 Mw	-	-17.58	-71.35	28.1
8	2005/07/13-07:06:13	5.9Mw	IV Tacna	-17.85	-70.11	79.9
9*	2007/08/13-18:40:58	7.9Mw	VII Pisco, Chincha, Cañete	-13.36	-76.52	30.2
10	2010/05/05-21:42:47	6.2 Mw	VII Tarata, Tacna, Peru	-18.06	-70.55	37
11	2012/05/14-05:00:40	6.2 Mw	VII Iquique, Tarapacá, Chile	-17.68	-69.59	105.9
12	2014/04/01-18:46:47	8.2 Mw	IX Iquique, Tarapaca, Chile	-19.61	-70.77	25
13	2014/04/02-21:43:13	7.7 Mw	VIII Iquique, Tarapacá, Chile	-20.57	-70.49	22.4
14	2015/03/22-23:51:48	6.4 Mw	V Iquique, Tarapaca, Chile	-18.35	-69.17	130

* Registro sísmico para comparar con los resultados del análisis de respuesta de sitio

4.2 Cociente Espectral de Registros Sísmicos

A partir de los resultados de los Espectros de Fourier se determinaron los cocientes espectrales (HV), método inicialmente estudiado por Nogoshi e Igarashi [11] para las ondas Rayleigh. El procedimiento del cociente espectral se realizó utilizando el método de la Media Cuadrática propuesto por Nakamura [12]. El cociente espectral permitió identificar la frecuencia y periodo de vibración que genera la amplificación del suelo respecto al movimiento en la roca. Los valores de periodos predominantes y los cocientes espectrales de los registros sísmicos (HV-S) se muestran en la Tabla 2 y Fig.5, respectivamente.

Tabla 2 – Valores de Periodo predominante, obtenidos del H/V de sismos (HV-S)

N°	Estación acelerográfica	Clasificación ASCE-7	Período (seg)
1	UNJBG	C	0.24
2	UPT	C	0.27
3	MCN	D	0.34
4	SENCICO	D	0.32
5	CIP CALANA	C	0.20
6	UNJBG A.	C	0.15

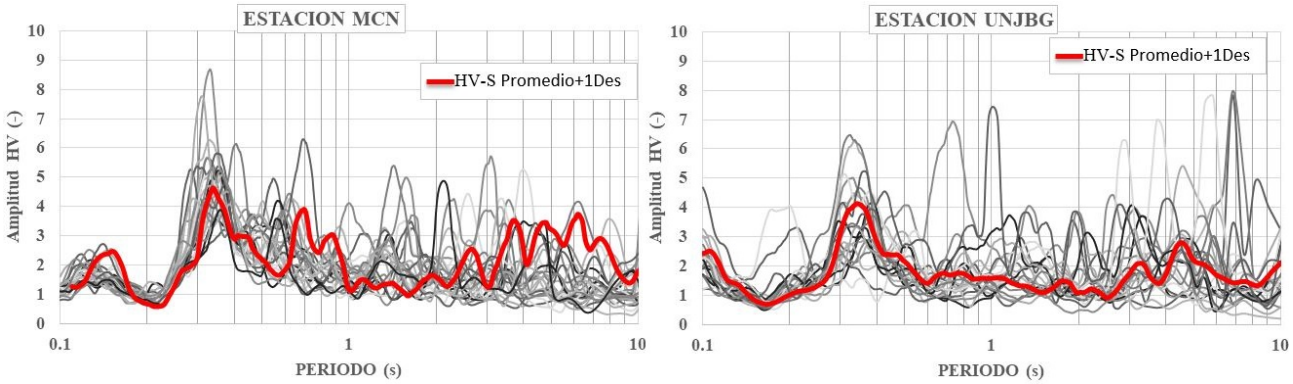

Fig. 5 – Cociente espectral de registros sísmico de las estaciones MCN y UNJBG

4.3 Registros de Microtremores

Se realizaron noventa y dos (92) mediciones de microtremores en la ciudad de Tacna, de los cuales cinco corresponden a mediciones en las estaciones acelerográficas. Para estas mediciones se utilizó el equipo McSEIS-NEO. El procedimiento del cociente espectral (HV) se realizó utilizando los métodos de la Media Cuadrática (HVM-MC) [12] y densidades espectrales direccionales (HVM-DE) [13]. La evaluación del cociente espectral se hizo con el programa Microtremorsoft [14]. En la Tabla 3 se presentan los valores de período predominante de los espectros HVM, para cada estación. En la Fig.6 puede observarse el espectro HVM correspondiente a las estaciones MCN y UPT, en ambos métodos la frecuencia predominante es la misma mientras que las amplitudes difieren, dando mayores valores de amplitud con el método de las densidades espectrales (HVM-DE).

Tabla 3 – Valores de Periodos Predominantes, obtenidos del H/V de microtremores (HV-M)

N°	Distrito	Estación	Latitud(°)	Longitud (°)	Período (s)
1	Pocollay	UPT	-18.005	-70.226	0.24
2	Ciudad Nueva	MCN	-17.983	-70.237	0.30
3	Ciudad Nueva	SENCICO	-17.988	-70.238	0.27
4	Calana	CIP CALANA	-17.953	-70.184	0.15
5	Alto de La Alianza	UNJBG A.	-17.993	-70.256	0.15
6	Tacna	UNJBG	-18.024	-70.249	0.18

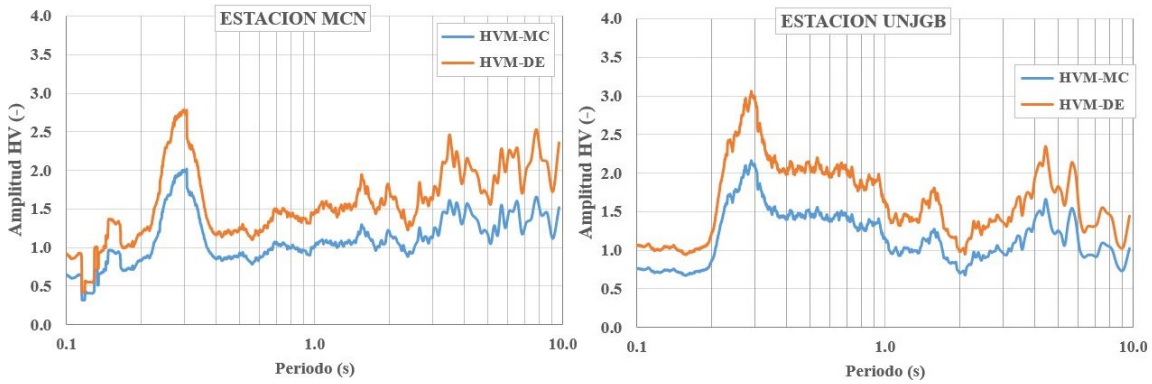

Fig. 6 – Cociente espectral del registro de microtremores, Estaciones MCN y UPT

5. Análisis de Respuesta De Sitio

5.1 Perfil del Suelo

Los perfiles del subsuelo de las casetas acelerográficas, utilizados para el análisis de respuesta de sitio se obtuvieron mediante el análisis de arreglo con microtremores utilizando la teoría de correlación autoespacial (SPAC) [8] y combinando los resultados de ensayos geotécnicos, ensayos geofísicos y la geología. Se estimaron los perfiles de velocidad de ondas de corte S hasta alcanzar la roca base la que se encuentra a profundidades que varían de 124 m a 306 m de profundidad como se indica en la Tabla 4 y Fig.7.

Tabla 4 – Valores de Velocidad de Ondas de Corte

UNJBG		UPT		CIP CALANA		UNJBG A		MCN		SENCICO	
H (m)	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)
4	390	7	465	10	450	7	395	1.5	180	9	265
12	568	9	590	10	500	7	500	3	219	12	351
14	688	30	758	16	600	17	650	6.5	350	9	489
36	900	20	900	40	850	22	750	20	410	20	550
110	1074	110	1074	50	900	23	873	77	770	74	770
-	1200	-	1200	80	950	64	1100	16	871	-	1200
				100	1049	-	1200	-	1200		
				-	1200						

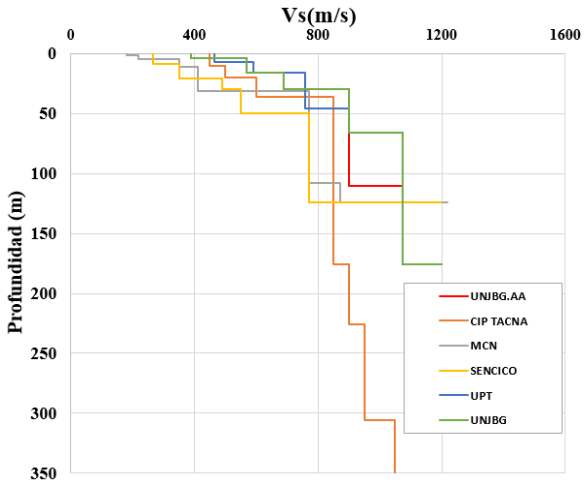

Fig. 7 – Perfil de Velocidad de Ondas de Corte

5.2 Sismo de Entrada en Roca

Debido a que no se cuenta con un movimiento sísmico histórico para roca en la ciudad de Tacna, se estableció un sismo de entrada para roca usando un acelerograma sintético y mediante el método de ajuste espectral [15], utilizando un espectro de peligro uniforme (EPU). El EPU se obtuvo de un análisis de peligro sísmico probabilístico siguiendo la metodología de Cornell [16], utilizando las fuentes sísmicas de subducción y continentales, así como los parámetros de recurrencia sísmica de cada fuente propuestos por Gamarra y Aguilar [17] y las leyes de atenuación de aceleración espectral en roca, para sismos de subducción y sismos continentales propuestas por Young et al. [18] y Sadigh, et al [19] respectivamente. El registro del sismo de Arica fue modificado para generar el acelerograma sintético con un PGA de 0.31g. El

acelerograma sintético y su respectivo espectro ajustado al espectro de peligro uniforme se muestran en la Fig.8.

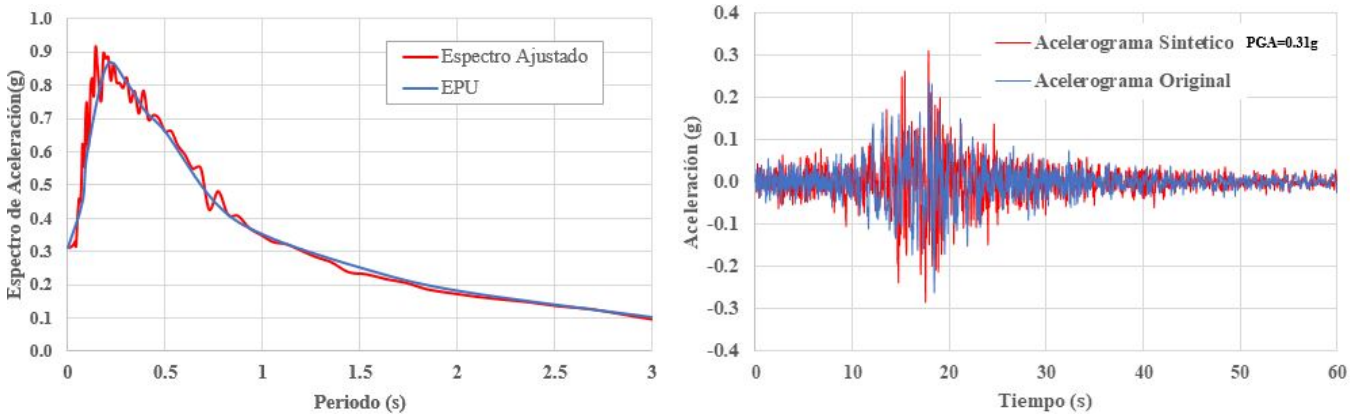

Fig. 8 – (Izq.) Acelerograma real y sintético. (Der.) Espectro de peligro uniforme y espectro ajustado

5.3 Propiedades Dinámicas del Suelo

El comportamiento dinámico del suelo frente a una carga cíclica se obtiene mediante la curva esfuerzo-deformación, el comportamiento del suelo puede ser representado mediante las curvas de módulo de reducción cortante (G/Gmax) y amortiguamiento (ξ). Para los suelos tipo arena y grava de la ciudad de Tacna, se calcularon los esfuerzos de confinamiento máximos, mínimos y se usaron las relaciones empíricas propuestas por Menq [20] y Zhang et al. [21] respectivamente. Estas fueron comparadas con las curvas propuestas por Seed et al. [22], como se muestra en la Fig.9.

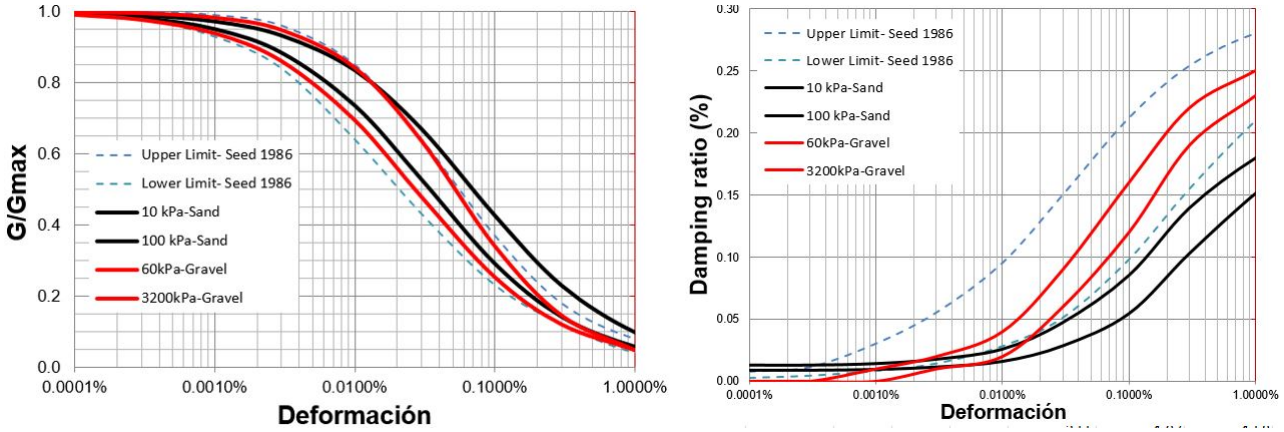

Fig. 9 – Curvas de reducción de modulo cortante y amortiguamiento para suelo arenoso y gravoso de Tacna

5.4 Respuesta del Sitio – Lineal Equivalente y No Lineal

La respuesta de sitio de un depósito de suelo está basada en la hipótesis de que los estratos son horizontales y predomina la propagación vertical de las ondas SH [23]. Para este trabajo se usó el modelo Kelvin-Voigst y el programa de cómputo Deepsoil [24]. De los resultados del análisis Lineal Equivalente, se aprecia que en la superficie del terreno, las aceleraciones máximas promedio para los suelos Tipo C (Vs_{30}= 509 – 615 m/s; estaciones UNJBG, UPT, UNJBG-A y CIP CALANA) y suelos Tipo D (Vs_{30}= 342 a 347 m/s, estaciones MCN y SENCICO) son 0.40g y 0.51g respectivamente; y las amplificaciones de las aceleraciones en el suelo con respecto a la roca son 1.30 y 1.80 respectivamente. Asimismo, se obtuvieron los espectros de respuesta elástica para el 5% de amortiguamiento y la Función de Transferencia de cada uno de los perfiles como se observa en la Fig.10.

Para el análisis no lineal se utilizó los parámetros dinámicos del suelo, discretizando cada estrato de los perfiles en sub estratos, considerando que la frecuencia de vibración de los sub estratos es mayor a 25 Hz [24] y se consideró el modelo MKZ implementado en el programa de cómputo de DEEPSOIL, obteniendo la aceleración espectral y las amplificaciones sísmicas en cada estación acelerográfica. De los resultados se aprecia que en la superficie del terreno, las aceleraciones máximas promedio para los suelos Tipo C (estaciones UNJBG, UPT, UNJBG-A y CIP CALANA) y suelos Tipo D (estaciones MCN y SENCICO) son 0.38g y 0.46g respectivamente y las amplificaciones de la aceleración pico máximas con respecto a la roca son 1.30 y 1.60 respectivamente. Asimismo, los espectros de respuesta normalizados, muestran que los coeficientes de amplificación estructural varían de 3.2 a 3.5, como se aprecia en la Fig.11, estos valores son mayores a los coeficientes estructurales de la Norma Peruana E030.

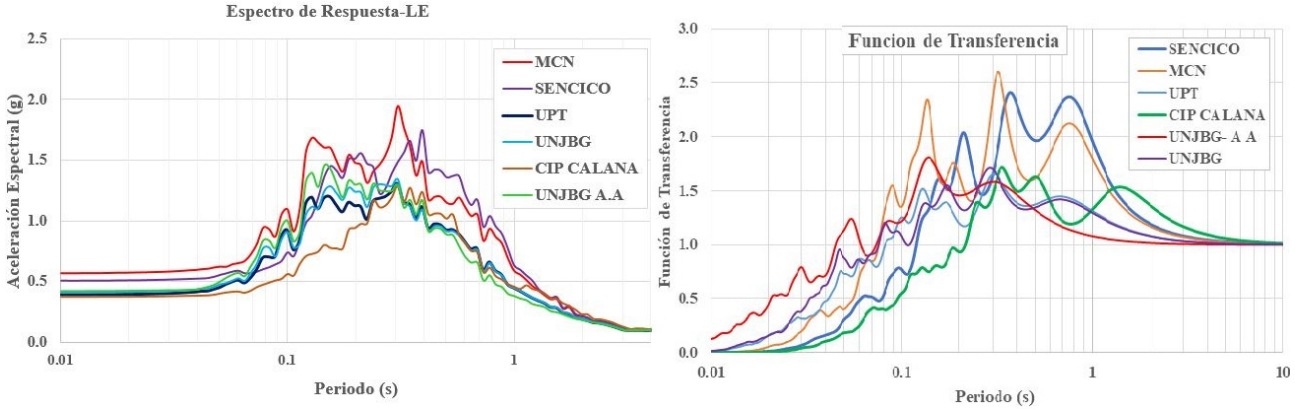

Fig. 10 – Espectro de Aceleración y función de transferencia, análisis Lineal Equivalente

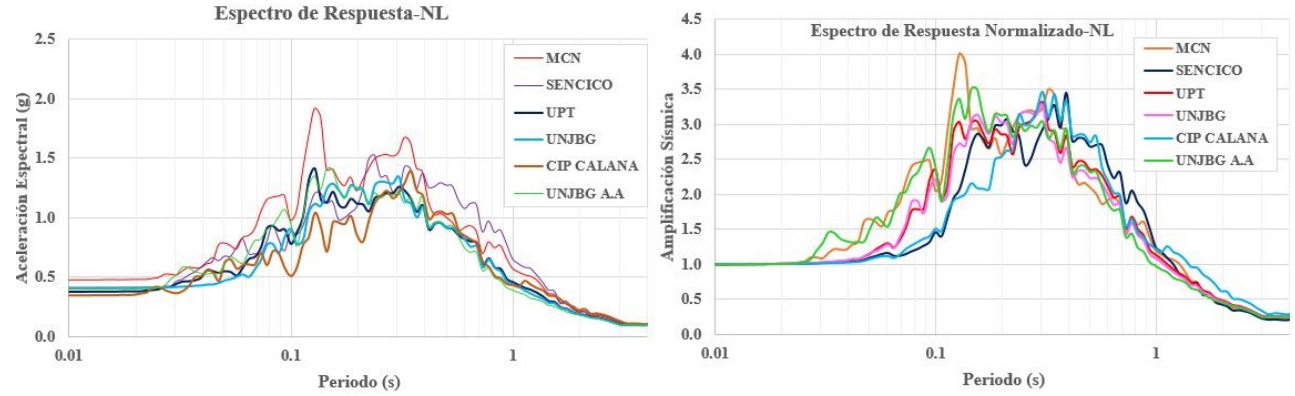

Fig. 11 – Espectro de Aceleración y espectro de aceleración normalizado, análisis no lineal

6. Discusión de Resultados

6.1 Periodo Fundamental del Suelo

Con respecto a los periodos del suelo se compararon los resultados de la zona de estudio por cuatro diferentes métodos: cociente espectral de los registros de microtremores (HV-M), cociente espectral de los registros sísmicos (HV-S), la función de transferencia obtenida del análisis de respuesta de sitio (FT-LE) y el cociente espectral correspondiente a la división del espectro de la superficie entre el espectro de la roca (Suelo/Roca-NL) obtenido del análisis no lineal. En la Fig. 12 se aprecia los resultados para las estaciones UPT (Tipo C) y SENCICO (Tipo D)

Se observa que para el suelo Tipo C (Tabla 5 y Fig.12), los periodos obtenidos por HV-M y HV-S son similares, mientras parea el suelo tipo D estos valores son diferentes; con respecto a los valores de períodos obtenidos por FT-LE y el cociente del Suelo/Roca-NL presentan valores similares, sin embargo comparando

los períodos de estos dos últimos con los periodos obtenidos por HV-M y HV-S resultan ser mayores con lo que se aprecia el efecto de la no linealidad del suelo, observándose que los valores de periodos se incrementan ante sismos de mayor magnitud con respecto a los valores obtenidos por microtremores, también se aprecia en los resultados obtenidos por el análisis de respuesta de sitio que la rigidez del material se reduce, comportándose como un material ligeramente flexible.

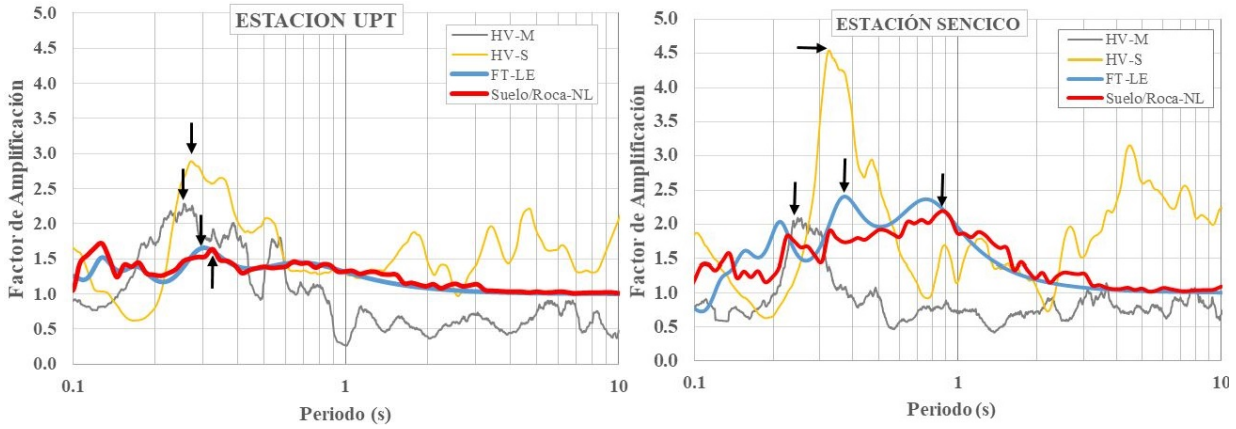

Fig. 12 – Comparación del periodo y amplificación entre el HV-M, HV-S, FT-LE y Suelo/Roca-NL para las estaciones UPT (Tipo C) y SENCICO (Tipo D)

Tabla 5 – Valores de Periodo predominante, obtenidos del H/V de sismos

N°	ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN ASCE-7	PERIODO PROMEDIO (s)			
			Microtremor HV-M	Registros sísmicos HV-S	Función de Transferencia FT - LE	Suelo / Roca - NL
1	UNJBG	C	0.18	0.24	0.29	0.30
2	UPT	C	0.24	0.27	0.30	0.34
3	MCN	D	0.30	0.34	0.36	0.75
4	SENCICO	D	0.27	0.32	0.37	0.80
5	CIP CALANA	C	0.15	0.20	0.30	0.34
6	UNJBG A.A	C	0.15	0.15	0.15	0.19

6.2 Amplificación del Suelo

De los análisis de respuesta del suelo (LE y NL), se aprecia que, en la superficie del terreno, las amplificaciones máximas del suelo con respecto a la roca son mayores en las casetas ubicadas en suelos Tipo D que en aquellas ubicadas en suelo Tipo C, como se aprecia en la Tabla 6 y en las Fig.10 y 11.

Asimismo se compararon los espectros de respuesta en suelo con los espectros de respuesta obtenidos en roca para determinar las amplificaciones (cociente espectral NL) con respecto a los periodos cortos (0.15 s a 0.5 s), períodos medios (0.5 s a 1.5 s) y períodos largos (1.5 s a 5 s) como se muestra en la Tabla 7; apreciando que para los suelos Tipo C para periodos cortos las amplificaciones varían de 1.28 a 1.48 en promedio, para períodos intermedios las amplificaciones varían de 1.24 a 1.37 en promedio y para periodos largos los factores de amplificación varían de 1.03 a 1.24. Para los suelos Tipo D se observa que para periodos cortos las amplificaciones varían de 1.54 s a 1.94 s en promedio, para períodos medios las

amplificaciones varían de 1.66 s a 1.92 s en promedio y para periodos largos los factores de amplificación varían de 1.19 a 1.23.

Tabla 6 - Amplificaciones del suelo con respecto a la roca

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN ASCE-7	PGA SUELO(g)		AMPLIFICACIÓN DEL SUELO CON RESPECTO A LA ROCA	
		L.E	N.L	L.E	N.L
UNJBG	C	0.41	0.41	1.3	1.3
UPT	C	0.39	0.38	1.3	1.3
MCN	D	0.57	0.49	1.8	1.6
SENCICO	D	0.51	0.42	1.6	1.4
CIP CALANA	C	0.37	0.34	1.2	1.1
UNJBG A	C	0.42	0.40	1.3	1.3

Tabla 7. Comparación de valores de amplificaciones del suelo en función de períodos cortos, intermedios y largos

Rango de periodos (s)		MCN	SENCICO	UPT	UNJBG	CIP CALANA	UNJBG A.
0.10 s a 0.5 s	Min	1.39	1.16	1.24	1.25	0.78	1.25
	Max	2.41	1.92	1.72	1.63	1.78	1.64
	Promedio	**1.90**	**1.54**	**1.48**	**1.44**	**1.28**	**1.44**
0.5 s a 1.5 s	Min	1.44	1.65	1.27	1.20	1.20	1.07
	Max	1.89	2.20	1.46	1.42	1.56	1.41
	Promedio	**1.66**	**1.92**	**1.37**	**1.31**	**1.38**	**1.24**
1.5 s a 4 s	Min	1.02	1.02	1.01	1.00	1.03	1.00
	Max	1.37	1.45	1.16	1.13	1.45	1.06
	Promedio	**1.19**	**1.23**	**1.08**	**1.07**	**1.24**	**1.03**

4. Conclusiones

Se determinó la amplificación sísmica de los suelos de Tacna para perfiles de suelo Tipo C y Tipo D, usando datos de registros sísmicos, mediciones de microtremores y mediante el análisis de respuesta de sitio (LE y NL), obteniendo valores de amplificación de la aceleración del suelo respecto al basamento rocoso de 1.3 y 1.6 para suelos Tipo C y Tipo D respectivamente y valores de coeficientes de amplificación estructural del orden de 3.2 a 3.5 siendo mayores al factor de amplificación estructural de la norma peruana E.030

Los periodos de la zona de estudio se determinaron por cuatro métodos: cociente espectral de los registros de microtremores (HV-M), cociente espectral de los registros sísmicos (HV-S), la función de transferencia obtenida del análisis de respuesta de sitio (FT-LE) y el cociente espectral correspondiente a la división del espectro de la superficie entre el espectro de la roca (Suelo/Roca-NL) obtenido del análisis no lineal, concluyéndose que los valores de periodos del suelo se incrementan ante sismos de mayor magnitud con respecto a los valores obtenidos por mediciones de microtremores debido al efecto de la no linealidad del suelo.

Se compararon los espectros de respuesta en suelo y en roca (N.L) para determinar las amplificaciones con respecto a los periodos cortos (015 s a 0.5 s), períodos medios (0.5 s a 1.5 s) y períodos largos (1.5 s a 5 s). De los resultados se aprecia para los suelos Tipo C, las amplificaciones varían de 1.28 s a 1.48 s; 1.24 s a 1.37 s y 1.03 a 1.24 respectivamente. Con respecto a los suelos tipo D, las amplificaciones varían de 1.54 s a 1.94 s; 1.66 s a 1.92 s y 1.19 a 1.23 respectivamente.

5. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Universidad Nacional de Ingeniería para el desarrollo de este trabajo .

6. References

[1] Villegas-Lanza J, Chlleh M, Cavalle O, Tavera H, Baby P, Chire-Chira J y Nocquect M (2016): *Active Tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation*. Journal of Geophysical research, Solid Earth, **121** (10), USA.

[2] Cortez A (2004): *Site Response of the 2001 Southern Peru Earthquake*. Master of Science in Civil Engineering. Washington State University.

[3] Yamanaka, H., Quispe, M, Chimoto, K., Saguchi, K.,Calderon,D. y Lazares F. (2014).*Exploration of deep sedimentary layers in Tacna city, southern Peru, using microtremors and earthquake data for estimation of local amplification*. Journal of Seismology, ISSN 1383-4649, **20** (1), Japón.

[4] Pulido N, Nakai S, Yamanaka H, Calderon D, Aguilar Z, Sekiguhi T (2014): *Estimation of a Source Model and Strong Motion Simulation for Tacna City, South Peru*, Journal of Disaster Research, **9** (6).

[5] Cabrera F. (2018): Servicios de estudios de Geología en la Ciudad de Tacna. *Proyecto de Investigacion Formativa FIC-F-3-2018*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru.

[6] Ortiz C. (2010). *Proyecto Piloto de medida de distribución de las intensidades sísmicas en la ciudad de Tacna mediante la instalación de sismoscopios*. Tesis de Segunda Especialidad. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Peru.

[7] Alva J, Ortiz C, Huanacuni D (2015): *Caracterización Dinámica de los suelos en la Ciudad de Tacna*. *XIX* Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Huaraz, Perú.

[8] Aki K (1957): *Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors*, Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo University, 25, 415-457.

[9] ASCE 7 (2016): *American Society of Civil Engineering. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Others Structures*. USA.

[10] Alva J, Ortiz C (2018). *Investigación Formativa 2018. Informe Técnico*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

[11] Nogoshi M, Igarashi T (1971): *On the amplitude characteristics of microtremor (part 2)*. of Seism. Soc. of Japan, 24, 26-40

[12] Nakamura Y (1989): *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), **30** (1)

[13] Sánchez-Sesma F, Rodriguez M, Iturraran-Viveros U, Luzon F, Campillo M, Margerin L, García-Jerez A, Suarez M, Santoyo M, Rodriguez-Castellanos A (2011): *A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layared medium*. Geophys.J.Int.186, 221-225.

[14] Alva J, Ortiz C, Valverde J, Chipana M, Soto J, Diaz D, Tenorio A (2019): *Manual MicrotremorSoft*. Red Acelerografica UPG FIC UNI.

[15] Lilhanand K, Tseng W (1988): *Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra*. Ninth World Conference Earthquake Engineering, **2**, 819-824, Tokyo, Japan.

[16] Cornell C (1968): Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of Seismology Society of America*, (58), 1583-1606

[17] Gamarra C, Aguilar Z (2009): *Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú*. CISMID, UNI, Lima, Perú.

[18] Youngs R, Chiou S, Silva W, Humphrey J (1997): *Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes*. Seismological Research Letters, **68** (1).

[19] Sadigh K, Chang C, Egan J, Makdisi M, Youngs R (1997): *Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data*. Seismological Research Letters, BSSA, **68** (1).

[20] Menq F (2003): *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly soils*. Tesis Doctoral. University of Texas.

[21] Zhang J, Andrus R, Juang H (2005): *Normalized shear modulus and material damping ratio Relationships*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **131** (4).

[22] Seed H, Wong R, Idriss I, Tokimatsu K, (1987): *Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils*, Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, **112** (11).

[23] Kramer S (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering*. Ed. Prentice Hall. 2nd edition.

[24] Hashash Y, Musgrove M, Harmon J, Groholski D, Phillips C, Park D (2016): *DEEPSOIL 6.1, User Manual*.