

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DETERMINACIÓN DE PERIODOS DEL SUELO A PARTIR DE
REGISTROS ACELEROGRÁFICOS EN LA CIUDAD DE CUSCO**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTORAS:

Stephanie Nicolle Alcántara Torres

Lucia Elizabeth Rucoba Hernández

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTORES:

Alex Renatto Mauricio Tayro Guerrero

Neecker Arturo Llatance Oyarce

Juan Sebastián Arias Rossell

ASESORA:

Carmen Eleana Ortiz Salas

Lima, Enero, 2022

RESUMEN

En la actualidad, el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) cuenta con un estudio sobre vulnerabilidad y microzonificación en el Cusco elaborado a partir de registros de microtemores. Si bien es cierto, esto permitió la elaboración del mapa de vulnerabilidad de la ciudad, esta configuración del suelo resulta errática y heterogénea. Por ello, la presente investigación usará registros sísmicos de modo que nos permitan evaluar el comportamiento dinámico en tres zonas del Cusco utilizando la técnica del cociente espectral H/V. La técnica del coeficiente espectral o también conocido como el método HVSR se emplea para estimar de manera simple las características dinámicas del suelo y cuyo parámetro resultante es el periodo fundamental del lugar del sitio. Para dicho análisis, la información respecto a las estaciones en la ciudad del Cusco fue recopilada de la Red Acelerográfica UNI-CIP-SENCICO, donde se obtuvieron los reportes de distintos sismos captados por las estaciones. Posteriormente, esta data fue procesada a través del programa SEISMOPROCESSOR, el cual permitió obtener el espectro de amplitudes de Fourier de los sismos en sus tres componentes para, finalmente, conseguir el cociente espectral de los sismos y el periodo fundamental captado por las estaciones en los respectivos suelos.

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo I: Generalidades.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivos generales.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	3
Capítulo II: Revisión de literatura.....	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Geología de Cusco	8
2.3. Geomorfología de Cusco	9
2.4. Método de coeficiente espectral.....	9
2.5. Comportamiento dinámico de suelos.....	10
2.6. Estaciones de registro sísmico	12
2.6.1. Red UNI-CIP-SENCICO	12
Capítulo III: Análisis de registros aceleró-gráficos	14
3.1. Recopilación de información	14
3.2. Procesamiento de datos.....	17
<i>Figura 6.</i> Tipos de ruido, efectos alta frecuencia (izquierda) y baja (derecha)	19
3.2.1 Resultados	20
3.2.2. Evaluación detallada	28
Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones	29
4.1. Conclusiones	29

4.2. Recomendaciones	30
Capítulo V: Bibliografía.....	31
ANEXO.-	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factores de Zona.....	6
Tabla 2 Detalles de las estaciones en Cusco estudiadas en la presente investigación	13
Tabla 3 Información sobre los sismos registrados por el sensor UAC	14
Tabla 4 Información sobre los sismos registrados por el sensor SENCICO CUSCO	14
Tabla 5 Información sobre los sismos registrados por el sensor CIP CUSCO	15
Tabla 6 Información sobre los sismos registrados por el sensor UAC-SAN JERONIMO	15
Tabla 7 Información sobre los sismos registrados por el sensor CUSCO (TEMPORAL)	16
Tabla 8 Valores sísmicos obtenidos del sismo de Paruro, Paruro 21/03/2020	16
Tabla 9 Valores sísmicos obtenidos del sismo de Cusco, Cusco 16/08/2020.....	16
Tabla 10 Periodos fundamentales del suelo según la estación.....	29

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de factores de zona en el Perú	5
Figura 2 Mapa de Microzonificación Sísmica del distrito de Cusco	7
Figura 3 Unidades geomorfológicas regionales en Cusco	9
Figura 4 Simplificación de los estrados a modelo de estrato equivalente en base al periodo fundamental del suelo	11
Figura 5 Ubicación geográfica de las estaciones de la Red UNI-CIP-SENCICO	13
Figura 6 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación UAC (Cusco, Cusco)	20
Figura 7 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación UAC (Cusco, Cusco)	21
Figura 8 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación SENCICO CUSCO (Cusco, Cusco)	21
Figura 9 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación SENCICO CUSCO (Cusco, Cusco)	22
Figura 10 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación UAC-SAN (Cusco, Cusco)	22
Figura 11 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación UAC-SAN (Cusco, Cusco)	23
Figura 12 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación CUSCO (TEMPORAL) (Cusco, Cusco)	23
Figura 13 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación D693 (Cusco, Cusco)	24
Figura 14 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación CIP CUSCO (Cusco, Cusco)	24
Figura 15 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación CIP CUSCO (Cusco, Cusco)	25
Figura 16 Cociente espectral de acelerómetro UAC – D89F (Wanchaq, Cusco)	26
Figura 17 Cociente espectral de acelerómetro SENCICO CUSCO - SCCU (Wanchaq, Cusco)	26
Figura 18 Cociente espectral de acelerómetro CUSCO (TEMPORAL) – D963 (Wanchaq, Cusco)	27
Figura 19 Cociente espectral de acelerómetro CIP CUSCO - BDFF (San Sebastian, Cusco)	27

Figura 20 Cociente espectral de acelerómetro UAC - KMI (San Jerónimo, Cusco) 28

Capítulo I: Generalidades

1.1. Introducción

Perú es un país situado en el cinturón de fuego del Pacífico, una de las regiones con mayor actividad sísmica en el mundo. Esta sismicidad es ocasionada debido al proceso de subducción de placas y a la dinámica de placas tectónicas dentro del continente (IGP, 2014) Esto significa que está expuesto constantemente a peligros que tengan como consecuencias daños a la población y pérdidas materiales.

El presente estudio aborda la investigación de periodos del suelo en la ciudad del Cusco, la cual tiene sus propias características respecto a la sismicidad. El Plan de Contingencia frente a Sismos elaborado por la Municipalidad del Cusco en el año 2020, señala que la frecuencia de sismos es baja en comparación con la zona costera, sin embargo, alcanzan efectos destructores cuando el hipocentro se localiza a profundidades menores a 60 km. Asimismo, las características sísmicas en este territorio están relacionadas con un sistema de fallas que se emplazan en la Cordillera Oriental y a otro conjunto de sistemas de fallas con distinta localización a lo largo del Cusco (Benavente, Delgado, Taipei, Audin, & Pauri, 2013)

Para identificar el riesgo sísmico de la ciudad del Cusco se debe tener en cuenta no solo parámetros como la magnitud del sismo y las características de su fuente, sino también las características geológicas del terreno que abarcan los efectos locales de sitio que pueden tener amplificaciones. En tal sentido, resulta determinante identificar las zonas con posibles daños de acuerdo a su vulnerabilidad y a las condiciones geológicas locales que permitan conocer las características dinámicas del suelo, entre ellas, el periodo del suelo de determinadas zonas.

Esta investigación busca identificar las características del tipo de suelo en la ciudad del Cusco. Esta se realizará a través del método de los cocientes espectrales, el cual fue planteado inicialmente por Nakamura en 1989 y es conocido por emplear la razón espectral entre la componente horizontal y vertical de registros de aceleración de ruidos sísmicos y terremotos. (Ritta, Suarez, & Pando, 2012), método que permite obtener el periodo fundamental de vibración del suelo.

1.2. Justificación

En la actualidad se cuenta con un estudio del CISMID sobre vulnerabilidad y microzonificación en el distrito de Cusco. El mapa de vulnerabilidad desarrollado se basa en el análisis estructural de las edificaciones representativas de cada una de las manzanas evaluadas. Por otro lado, la microzonificación del distrito emplea registros de microtemores, lo cual resulta en la división de 3 microzonas sísmicas según su comportamiento dinámico del suelo. Esta configuración del suelo resulta ser en gran medida errática y heterogénea. Por ello, en la presente investigación se emplearán los registros sísmicos de acelerómetros ubicados en el distrito para la elaboración de una microzonificación pertinente.

1.3. Alcance

La investigación plantea la determinación de periodos del suelo mediante la técnica del cociente espectral, en cinco estaciones de Cusco, de las cuales se tienen registros acelerográficos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

El objetivo general es obtener el periodo fundamental del suelo a partir de registros acelerográficos en la ciudad de Cusco.

1.4.2. Objetivos específicos

Analizar la data brindada por los cinco sensores ubicados en la ciudad de Cusco.

1.5. Metodología

Según Hernández, Fernández y Baptista (2012), los estudios definidos como exploratorios tienen la finalidad de investigar un tema o fenómeno poco abordado; los descriptivos, miden las propiedades importantes de un tema en cuestión; los correlacionales, determinan dos a más variables y analizan sus grados de relación entre sí; y los estudios explicativos, responden las causas de este fenómeno. Entonces, la presente investigación con enfoque cuantitativo tendrá un alcance correlacional, y seguirá el siguiente esquema general:

1. Se revisará la literatura para establecer los conceptos teóricos necesarios, se empezará por los estudios previos y sísmicos, la geología y geomorfología de Cusco, el método del cociente espectral H/V, dinámica de suelos y estaciones de registro sísmico.
2. Se recopilará la información de acelerogramas disponible en las redes de registro sísmico, ordenándose por los sensores presentes en Cusco.
3. Se procesará la información en el software SEISMOPROCESSOR.

4. Se obtendrá el valor de los periodos fundamentales del suelo en la ubicación de cada sensor en Cusco.

Capítulo II: Revisión de literatura

2.1. Antecedentes

Perú es uno de los países que se encuentra cerca del cinturón de fuego del pacífico, lo cual lo hace un país altamente sísmico, sin embargo, diversos autores que han realizado estudios de peligros sísmico en el territorio (Casaverde y Vargas, 1980; Alva y Castillo, 1993; Tavera et al 2014) y la Norma Peruana de Diseño (2016) consideran dicho problema como probabilístico, por lo que la distribución de peligro sísmico ha sido dividido en 4 zonas como se observa en la siguiente imagen.



Figura 1 Mapa de factores de zona en el Perú

Tomado de la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 (2016)

Como se observa cada zona está caracterizada por un valor de z que indica la aceleración máxima horizontal en suelo rígido a continuación se presentan dichos valores.

Tabla 1 Factores de Zona

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.1

Nota: Norma de Diseño Sismorresistente E.030 (2016)

Sin embargo, es importante mencionar la gran influencia de los estratos de las zonas, es decir es importante la influencia de la zona local con respecto al comportamiento sísmico.

En el año 2020, el Concejo Provincial del Cusco aprobó el Plan de Contingencia frente a Sismos 2019-2020 que presenta una microzonificación sísmica de Cusco elaborada con microtemores mas no los registros de los acelerógrafos. Teniendo en cuenta las características mecánicas y dinámicas de los diferentes materiales del terreno, se determinaron las características agrupadas por zonas dentro del distrito. Se obtuvieron tres zonas, que se ilustran en la siguiente figura:

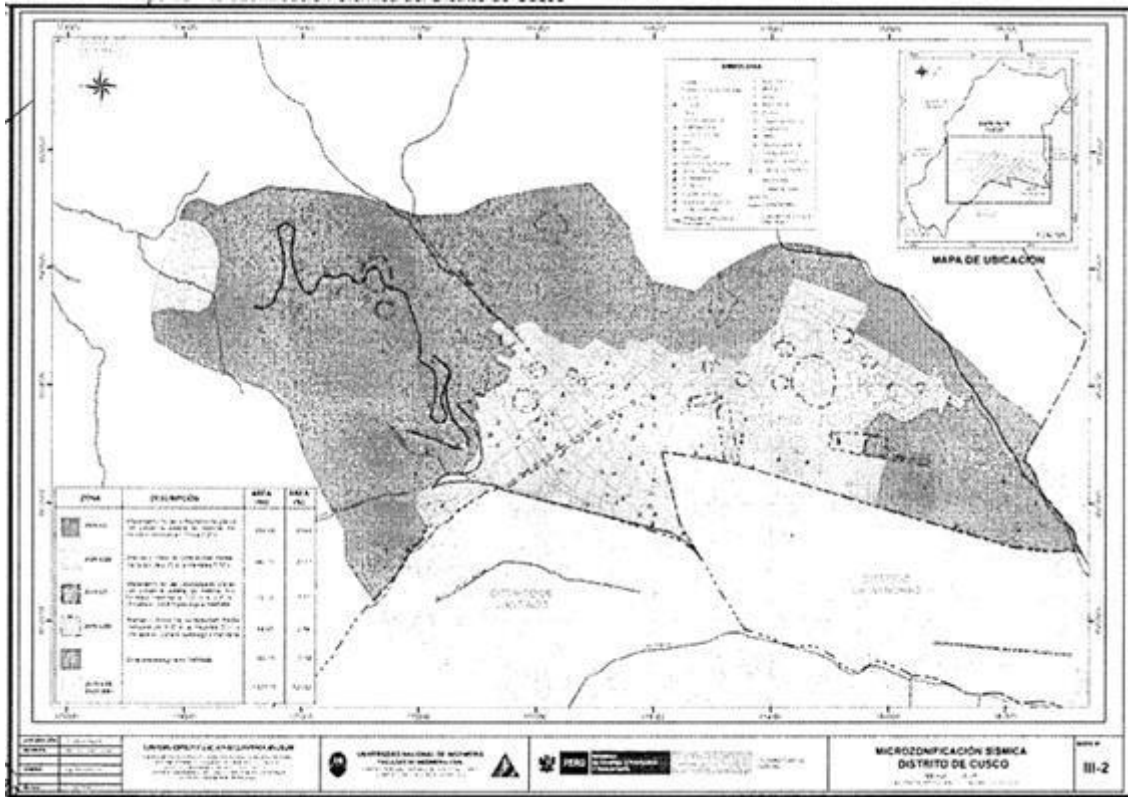


Figura 2 Mapa de Microzonificación Sísmica del distrito de Cusco

Tomado de UNI/CISMID

De los valores obtenidos de los microtemblores, se proponen las siguientes zonas:

- Zona 1: Consiste en formaciones rocosas en los cerros y en depósitos de grava dispersados alrededor del distrito. Estos presentan las mejores características en términos geotécnicos para la cimentación estructural. Los periodos obtenidos de los microtemblores son menores a 0.25 segundos.
- Zona 2: Consiste en arcillas de consistencia media a semi-dura y en arenas arcillosas medianamente compactas, las que presentan características geotécnicas menos favorables, en comparación a la zona 1. Los periodos obtenidos de los microtemblores son menores a 0.35 segundos.
- Zona 3: Los periodos obtenidos de los microtemblores son mayores a 0.35 segundos.

2.2. Geología de Cusco

La geología del valle del cusco mayormente está determinada por formaciones sedimentarias, cuya formación data del terciario y cuaternario, la cual teóricamente se formó por un movimiento tectónico de falla que ocurrió en el Terciario o sus postrimerías, Posterior a ello la depresión estuvo formada por un lago glacial de la época plio-pleistocénica que se denominó Morkill como lo menciona GEOMEC. Así mismo, se pueden diferenciar las siguientes formaciones geológicas.

- Capas rojas (cr): las cuales están constituidas por lutitas areniscas de diversas granulometrías.
- Formación Yuncaypata(ky): en la cual se puede observar capas arcillosas y lutitas con lentes y presencia de capas de yeso
- Formación san Sebastián (QI): tiene origen lacustre, está construido por estratos laminados de diatomitas de color blanco amarillento arcillas rojas, arnas muy finas que alcanzan hasta 200 metros de espesor (Tevez, 1,983).
- Depósitos aluvio-fluviales (Qal): Estas datan entre las épocas del pleistoceno medio superior, las cuales han sedimentado en tres terrazas.
- Depósitos fluvio- glaciares: Denominados depósitos cuaternarios y están formadas por gravas-limo arcillosas, que son producto del lavado y transporte de los glaciares.
- Depósitos coluviales (Qco): están formados por materiales mal graduados (Tevez, Benavente, 1983)

características dinámicas del suelo y estructuras, así como las respuestas de sitio. Además, uno de los parámetros resultantes de la aplicación del método es la frecuencia o período fundamental del lugar de estudio.

El método HVSR fue planteado inicialmente por Nogoshi e Igarashi (1971) y estudiado ampliamente por Nakamura (1989), en el que se utilizaron microtremores o vibraciones ambientales para obtener una función de transferencia del depósito de suelo realizando las mediciones en la superficie; en ese sentido, se considera la eliminación de los efectos de las ondas S y se obtiene que la función se aproxima a la relación entre las componentes horizontal y vertical de los espectros de amplitud de Fourier (Diaz-Segura, 2017).

Múltiples estudios emplean el método en microzonificación y evaluación de efectos de sitio; por lo cual, se ha demostrado la efectividad y utilidad del método al ser uno de los más económicos, de carácter no invasivo y con resultados confiables. Según Jaramillo (2016), existen nuevas formas de mejorar los resultados del método HVSR por medio de una función de suavizado que permite afinar el periodo de sitio resultante y el factor de amplificación. No obstante, recientes publicaciones señalan que el método brinda resultados correctos solo con el periodo fundamental.

Por otro lado, Rivera Alvarez et al. (2019) menciona que para la adecuada aplicación del método se debe tener conocimiento sobre la caracterización geológica del área, mediciones instrumentales, procesamiento y análisis de datos.

2.5. Comportamiento dinámico de suelos

El suelo, además de mecánicas y geotécnicas, presenta características dinámicas que evidencian el comportamiento del suelo bajo la acción de ondas sísmicas, su amplitud, duración y contenido de frecuencias. Las principales propiedades que definen este comportamiento son la

rigidez, en razón al módulo de corte (G) y profundidad de estratigrafía (H), y amortiguamiento, que describe la capacidad del suelo para disipar energía. Así, según San Bartolomé, el valor del módulo de corte disminuye a razón de la deformación del suelo e ingreso al rango no lineal. Igualmente, existe una relación directa entre la velocidad de onda S (V_s), como se representa en la siguiente fórmula:

$$G = \rho V_s^2$$

Según Montecillo, la hipótesis de incidencia vertical de ondas S polarizadas horizontalmente permite una simplificación del modelo estratificado, propuesto por Haskell en 1962, en un único estrato de dimensión lateral infinita, sin perder sus principales características, como se muestra en la siguiente figura:

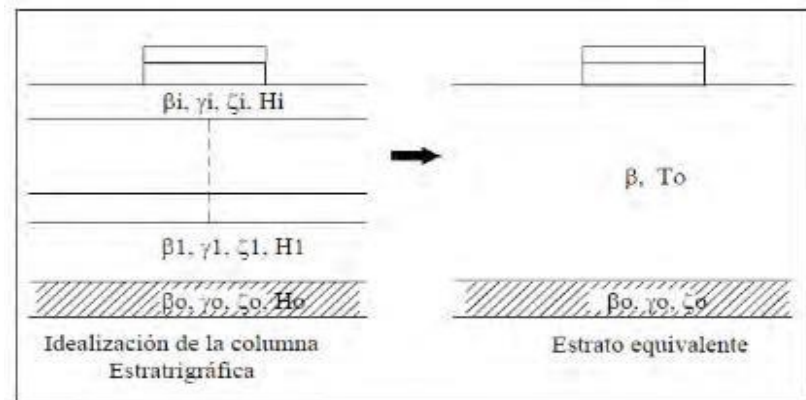


Figura 4 Simplificación de los estrados a modelo de estrato equivalente en base al periodo fundamental del suelo
Tomado de Tesis: “Evaluación del comportamiento dinámico del suelo en Lima y Callao utilizando el método del cociente espectral H/V”

De esta forma, el periodo predominante de vibración medio (T_0) caracteriza el medio y presenta una relación directa con las propiedades estratificadas del suelo, por lo que su obtención permite evaluar el efecto de sitio.

Para entender el comportamiento dinámico del suelo es necesario el uso de funciones de transferencia empírica (FTE) que pueden ser halladas con el método del cociente espectral H/V, utilizando registros sísmicos (Lermo et al, 1993). Estas funciones de transferencia empírica son el resultado de métodos de ensayos o casos de estudio que utilizan registros sísmicos o ruido ambiental, siendo uno de ellos el cociente espectral H/V y el método de cociente espectral estándar.

2.6. Estaciones de registro sísmico

2.6.1. Red UNI-CIP-SENCICO

La Red UNI-CIP-SENCICO cuenta con cinco estaciones ubicadas en el distrito de Cusco, como se indica en la figura. La estación situada en el centro histórico es la correspondiente a CUSCO (TEMPORAL) con código D963. Por otro lado, la estación cercana a Coripata corresponde al nombre de D89F y aquella cerca de la Plaza Tupac Amaru tiene como código SCCU. Finalmente, las estaciones cercanas a Larapa tienen por código BDDF y KMI respectivamente. En la Tabla 2 se presentan sus detalles:



Figura 5 Ubicación geográfica de las estaciones de la Red UNI-CIP-SENCICO

Tomado de Red UNI-CIP-SENCICO

Tabla 2 Detalles de las estaciones en Cusco estudiadas en la presente investigación

Código	Nombre	Institución	Latitud	Longitud	Altura	Tipo de suelo
D963	CUSCO (TEMPORAL)	UNI	-13.52°	-71.98°	3400.00	Arcilla gravosa
D89F	UAC	UAC, UNI	-13.53°	-71.97°	3399.00	Arcilla gravosa
SCCU	SENCICO CUSCO	SENCICO	-13.53°	-71.96°	3377.00	Arena arcillosa
BDFE	CIP CUSCO	UNI, CIP	-13.54°	-71.91°	3269.00	Grava arcillosa
KMI	UAC-SAN	UAC, UNI	-13.54°	-71.90°	3274.00	Grava arcillosa

Capítulo III: Análisis de registros acelero-gráficos

3.1. Recopilación de información

A continuación, se detalla la información de los sismos recopilada por los sensores que han sido utilizados en el estudio.

Tabla 3 Información sobre los sismos registrados por el sensor UAC

SENSOR: UAC – D89F				
Ubicación	Magnitud	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha
SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS	4.2	-14.78	-72.05	23/01/2019
AZANGARO, AZANGARO	7.0	-14.84	-70.22	1/03/2019
SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS	4.3	-14.49	-72.41	12/03/2019
CHUQUIBAMBI LLA, GRAU	4.8	-14.2	-72.79	2/09/2019
HAQUIRA, COTABAMBAS	4.9	-14.32	-72.2	15/12/2019
CHUQUIBAMBI LLA, GRAU	4.8	-14.08	-72.9	31/07/2019
CUSCO, CUSCO	3.4	-13.5	-71.86	16/08/2019
ANTABAMBA, ANTABAMBA	3.5	-14.46	-72.95	13/12/2020
LAMBRAMA, ABANCAY	4.3	-13.92	-72.65	1/04/2021

Tabla 4 Información sobre los sismos registrados por el sensor SENCICO CUSCO

SENSOR: SENCICO CUSCO - SCCU				
Ubicación	Magnitud	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha
PARURO, CUSCO	3.4	-13.76	-71.96	21/03/2020
CUSCO, CUSCO	3.4	-13.50	-71.86	16/08/2020
PAMPACHIRI, ANDAHUAYLAS	4.3	-14.3817	-73.5565	9/10/2020
YANA OCA, CANAS	3.7	-14.36	-71.35	10/03/2021
CCAPI, PARURO	3.9	-13.73	-72.01	17/06/2021

Tabla 5 Información sobre los sismos registrados por el sensor CIP CUSCO

SENSOR: CIP CUSCO - BDFE				
Ubicación	Magnitud	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha
PARURO, CUSCO	3.4	-13.76	-71.96	21/03/2020
CHUMBIVILCAS, CUSCO	3.3	-13.99	-71.95	19/04/2020
CANAS, CUSCO	3.7	-14.36	-71.35	10/03/2020
ABANCAY, APURIMAC	4.3	-13.92	-72.65	1/04/2021
CAYLLOMA, AREQUIPA	4.0	-15.18	-71.68	4/04/2021
LA MAR, AYACUCHO	5.0	-12.89	-73.95	9/07/2021
LA CONCEPCIÓN, CUSCO	5.7	-11.7378	-71.7073	10/10/2021
CUSCO, CUSCO	4.1	-13	-71.54	15/10/2021
LA MAR, AYACUCHO	4.5	-12.18	-73.35	24/10/2021

Tabla 6 Información sobre los sismos registrados por el sensor UAC-SAN JERONIMO

SENSOR: UAC-SAN JERONIMO - KMI				
Ubicación	Magnitud	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha
CURPAHUASI, APURIMAC	4.1	-13.98	-72.51	12/12/2019
HAQUIRA, APURIMAC	4.9	-14.32	-72.2	15/12/2019
ANDAGUA, AREQUIPA	4.3	-15.22	-72.3	18/12/2019
SANTO TOMAS, CUSCO	4.1	-14.85	-72.11	29/12/2019
ACOMAYO, CUSCO	3.7	-13.99	-71.8	23/01/2020
YAUCA, AREQUIPA	5.1	-15.98	-74.69	13/02/2020
ATICO, AREQUIPA	4.9	-16.55	-73.5	3/03/2020
PARURO, CUSCO	3.4	-13.76	-71.96	21/03/2020
CHALHUANCA, APURIMAC	5.2	-14.33	-73.4	13/04/2020
OCUVIRI, PUNO	5.8	15.46	-70.91	31/05/2020
TACNA, TACNA	6.8	23.42	-68.58	3/06/2020
ATICO, AREQUIPA	5.0	16.61	-74.18	22/07/2020
QUILCA, AREQUIPA	5.3	16.89	-72.49	28/07/2020

Tabla 7 Información sobre los sismos registrados por el sensor CUSCO (TEMPORAL)

SENSOR: CUSCO (TEMPORAL) – D963				
Ubicación	Magnitud	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha
CUSCO, CHUMBIVILCAS	3.2	-13.91	-72.00	3/04/2021
CUSCO, PARURO	3.9	-13.73	-72.01	17/06/2021
AREQUIPA, CAYLLOMA	4.0	-15.18	-71.68	5/04/2021
AREQUIPA, CAMANA	4.5	-16.43	-72.97	24/04/2021
AREQUIPA, CARAVELI	5.3	-15.58	-74.48	25/04/2021

De los registros acelerográficos recopilados, se da el caso donde varias estaciones reciben la señal de un mismo evento telúrico. Para ello, se elaboró una tabla con dos sismos que indica la pseudoaceleración, pseudovelocidad y desplazamiento máximo de cada estación:

Tabla 8 Valores sísmicos obtenidos del sismo de Paruro, Paruro 21/03/2020

SISMO DE PARURO, PARURO - CUSCO DEL 21 DE MARZO DEL 2020									
ESTACION	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s ²)			PGD (cm)		
	EO	NS	V	EO	NS	V	EO	NS	V
UAC	18.80	10.70	7.43	0.46	0.19	0.16	0.02	0.01	0.00
CIP CUSCO	9.53	10.97	4.01	0.24	0.19	0.09	0.02	0.01	0.01
SENCICO CUSCO	8.64	8.89	5.59	0.27	0.17	0.09	0.01	0.01	0.00
UAC-SAN JERONIMO	3.90	2.14	2.50	0.11	0.07	0.05	0.01	0.00	0.00

Tabla 9 Valores sísmicos obtenidos del sismo de Cusco, Cusco 16/08/2020

SISMO DE CUSCO, CUSCO - CUSCO DEL 16 DE AGOSTO DEL 2020									
ESTACION	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s ²)			PGD (cm)		
	EO	NS	V	EO	NS	V	EO	NS	V
CIP CUSCO	21.33	23.58	13.65	0.70	0.52	13.65	0.03	0.03	0.01
SENCICO CUSCO	3.93	2.48	2.42	0.05	0.06	2.42	0.00	0.00	0.00
UAC-SAN JERONIMO	2.02	2.12	1.35	0.06	0.05	1.35	0.00	0.00	0.00

3.2. Procesamiento de datos

Jorge A., Carmen O. y Michael C., desarrollaron el programa SIPA (Sistema inteligente para procesamiento acelerográfico) basado en algoritmos inteligentes o redes neuronales utilizados para el procesamiento de la información que incluye 4 fases para el análisis de acelerograma:

1. Selecciona la información de sismos y de diversas fuentes.
2. Procesamiento de acelerogramas corregidos por línea base y filtrado
3. Determinación del tiempo-historia de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, espectros de fourier y espectros de respuesta.
4. Reporte de resultados

En el procesamiento de la información, un acelerograma presenta una serie de errores que deben ser ajustados mediante la corrección de acelerogramas, que son de dos tipos:

Instrumental y línea base, y el filtrado de ruido. La información utilizada en el presente trabajo se encuentra previamente corregida por línea base y filtrado de señal; sin embargo, es importante conocer ambos métodos.

Corrección por línea base

Es posible que el acelerograma se encuentre desplazado respecto a la línea base de aceleraciones. debido a que el acelerógrafo no está equilibrado en su emplazamiento o por que el sistema mismo genera una diferencia en los datos, respecto la línea cero o línea base. En el acelerograma el error es casi imperceptible; sin embargo, es notorio al obtener la velocidad y desplazamiento mediante la integración, es decir, utilizando el área bajo la curva. Entonces, es necesario realizar una corrección por línea base, es decir, ajustar la de

aceleraciones nulas. Rascon O., Chavez M., Alonso L. & Palencia V., presentan los siguientes métodos de corrección:

- Velocidad final nula: Al momento de obtener la curva de velocidad, consiste en desplazar la línea base original hasta obtener una velocidad nula. Sin embargo, este método genera valores de desplazamiento máximos incorrectos.
- Velocidad final nula por suma de impulsos: Se aplican una serie de impulsos al acelerograma para que la curva de velocidades oscile con respecto a su línea de ceros, hasta obtener una velocidad final nula. Este método genera desplazamientos máximos aceptables, sin embargo, es variable de persona en persona, ya que dependerá del punto de aplicación del impulso y su magnitud.
- Corrección parabólica considerando condiciones iniciales nulas
- Corrección parabólica considerando velocidad inicial diferente de cero
- Por medio de un filtro pasa-alta

Filtrado del ruido

Luego de la corrección por línea base, se debe tener en cuenta la contaminación de ruido en el acelerograma. Según Carreño, este ruido se ocasiona por fenómenos naturales o por el tratamiento de los datos, por ejemplo, viento, tránsito de vehículos y personas. Este solapamiento puede ser expresa en la siguiente ecuación:

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

Donde, $a(t)$ es el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal sísmica y $r(t)$ el ruido.

El ruido puede ser de dos tipos:

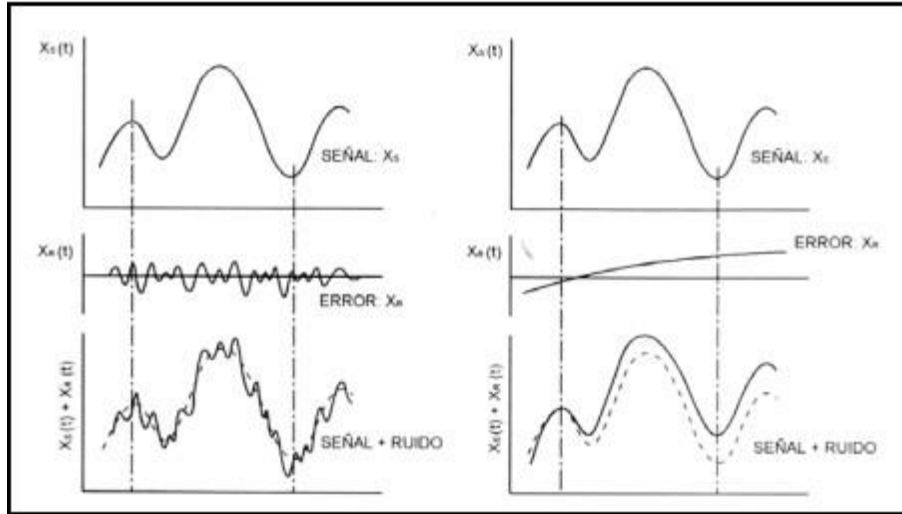


Figura 6. Tipos de ruido, efectos alta frecuencia (izquierda) y baja (derecha)

Tomado del Anexo VI. Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica” en la Universidad de Alicante.

- Ruido de alta frecuencia: Se ubica por encima de la banda o rango de frecuencias de interés y afecta, principalmente, a los picos de aceleración.
- Ruido de baja frecuencia: Se ubica por debajo de la banda o rango de frecuencias de interés y afecta, principalmente, la obtención de la velocidad y desplazamiento.

El filtrado de la señal se realiza para ambos tipos de frecuencia mediante la limitación de la data en una banda de frecuencias deseada, para ello se utilizan los filtros pasa baja para eliminar altas frecuencias y pasa alta para las bajas. Para esto, es importante elegir la frecuencia de corte adecuada, si no se podría estar considerando el ruido y eliminando información del sismo. Un filtrado se realiza multiplicando el espectro de acelerograma por una función que disminuya el valor de la amplitud del espectro de Fourier fuera del rango donde están contenidas las frecuencias de interés, dejan inalterable las señales del sismo y eliminando lo mayor posible de ruido. Este es el concepto de filtrado, pero existen diversidad de funciones que pueden ser utilizadas por los

trabajadores o programas especializados, ya que en la práctica los filtros ideales no se pueden utilizar porque su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita.

La información utilizada de los acelerogramas, para el presente trabajo, se encuentra delimitada a un rango o también llamado frecuencia de trabajo de 0,1 a 25 Hz, ya que el sistema considera que los sismos se encuentran en este rango.

3.2.1 Resultados

A continuación, se muestran las gráficas de cociente espectral obtenidas para cada sismo procesado para cada una de las cinco estaciones. Cabe mencionar que se obtuvo el cociente espectral tanto para la dirección Norte - Sur (NS) como para la dirección Este - Oeste (EO)

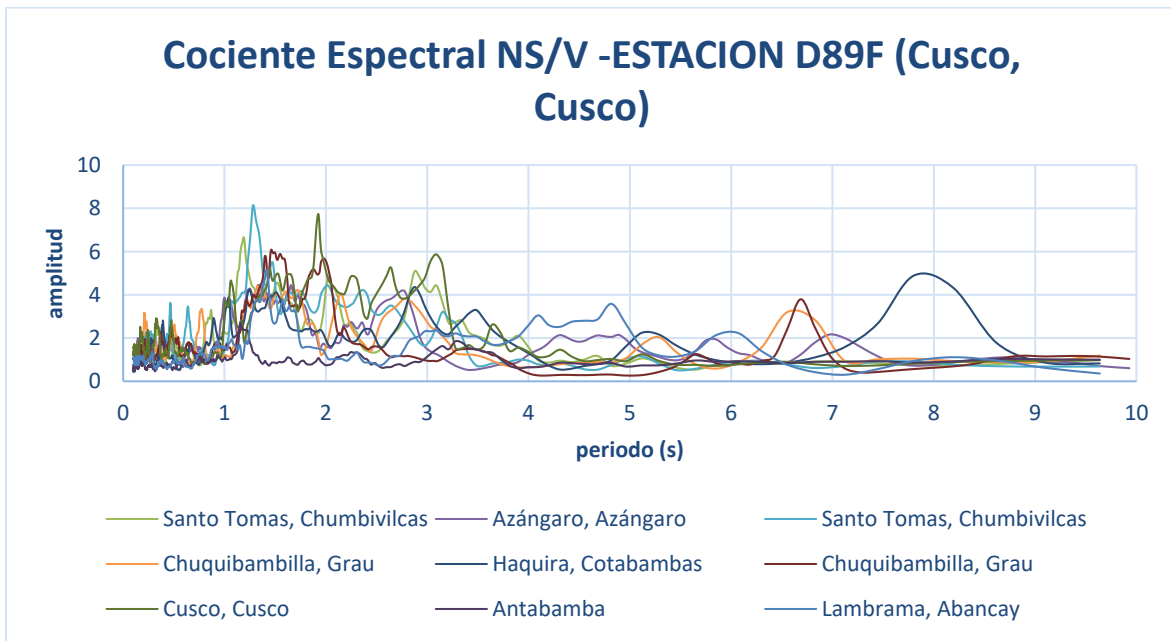


Figura 6 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación UAC (Cusco, Cusco)

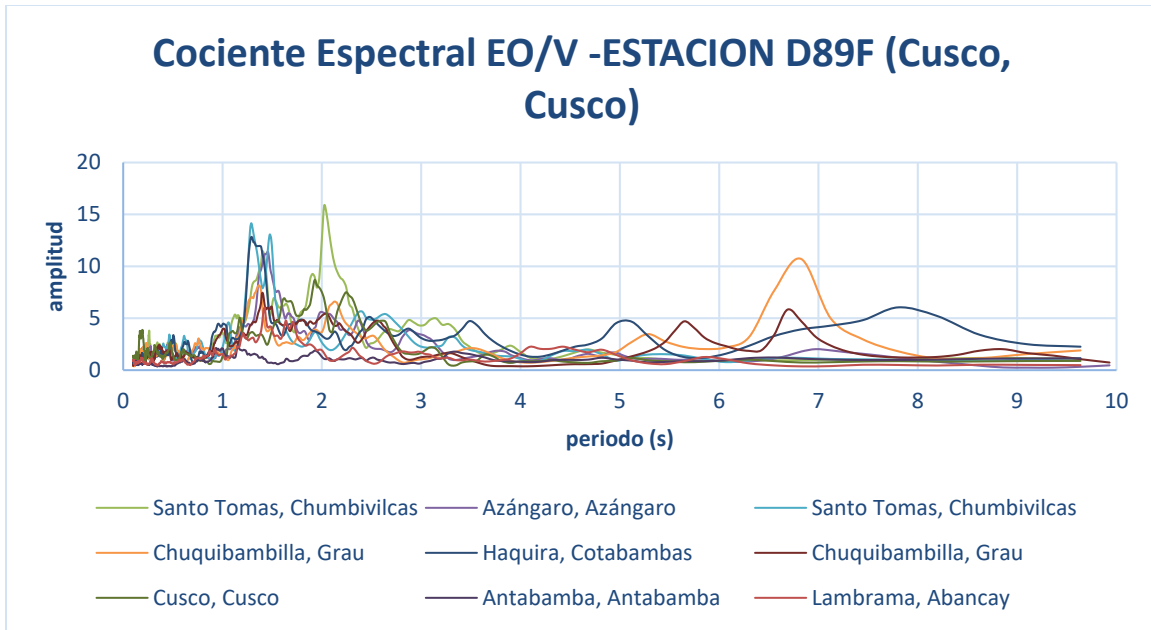


Figura 7 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación UAC (Cusco, Cusco)

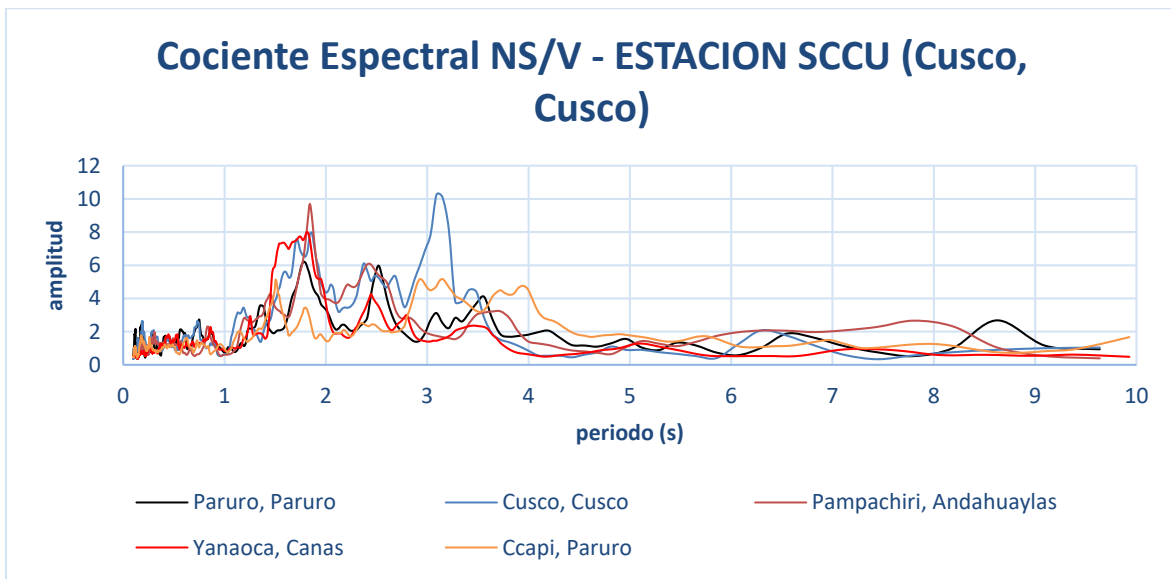


Figura 8 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación SENCICO CUSCO (Cusco, Cusco)

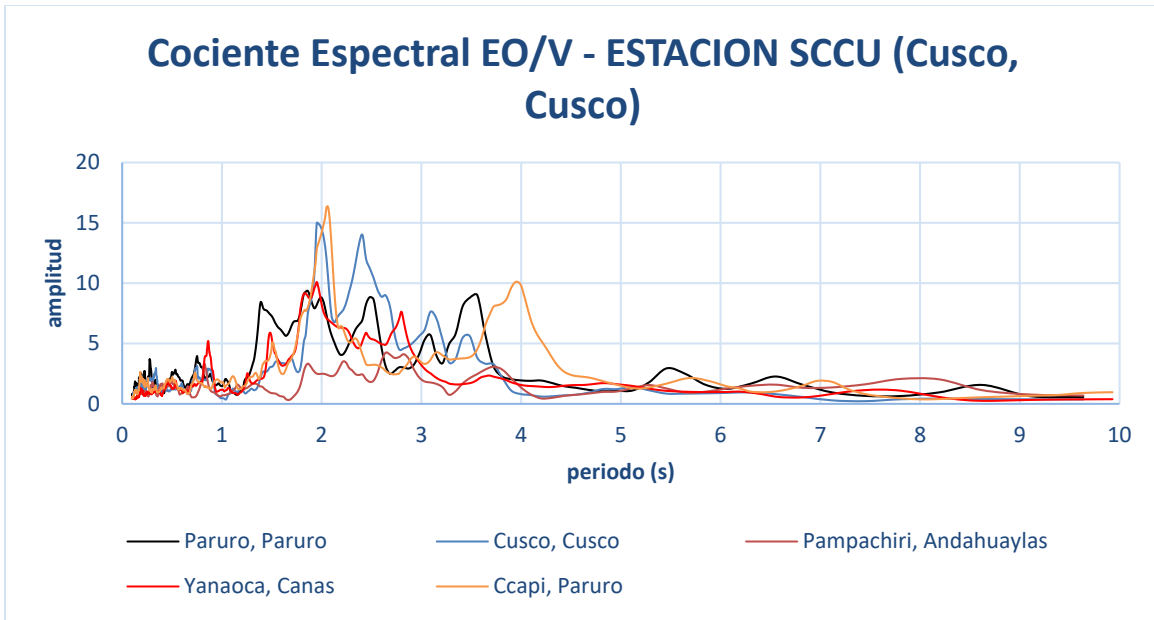


Figura 9 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación SENCICO CUSCO (Cusco, Cusco)

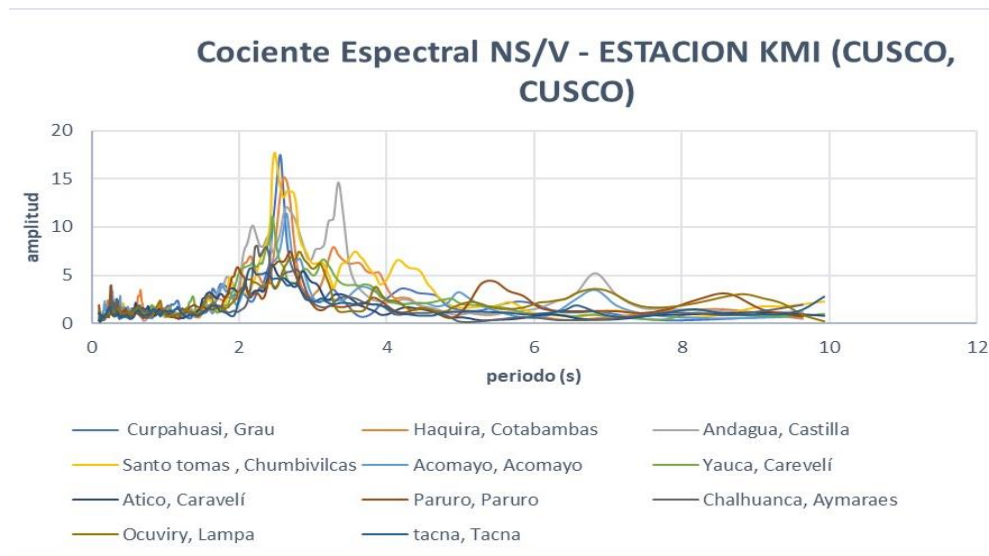


Figura 10 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación UAC-SAN (Cusco, Cusco)

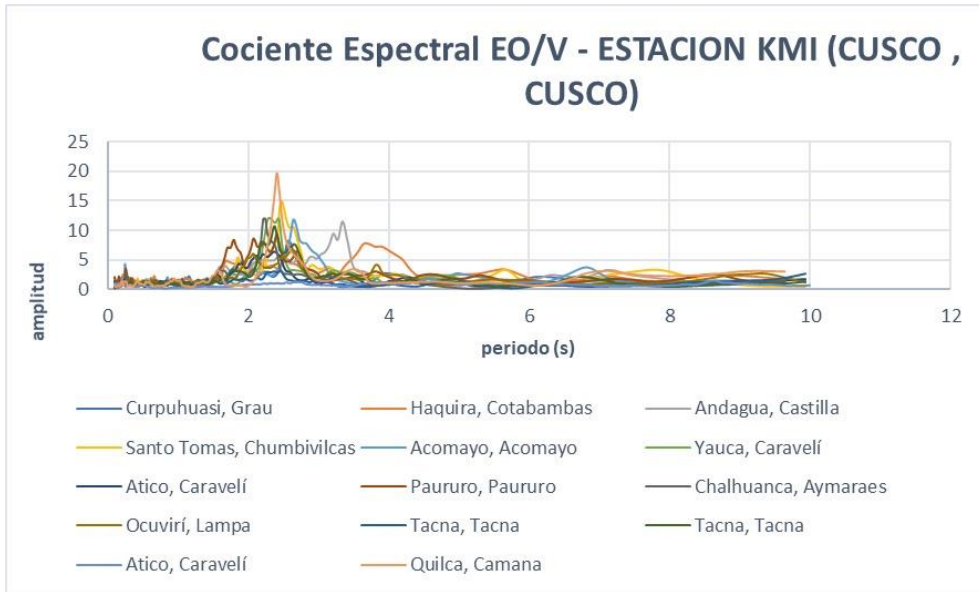


Figura 11 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación UAC-SAN (Cusco, Cusco)

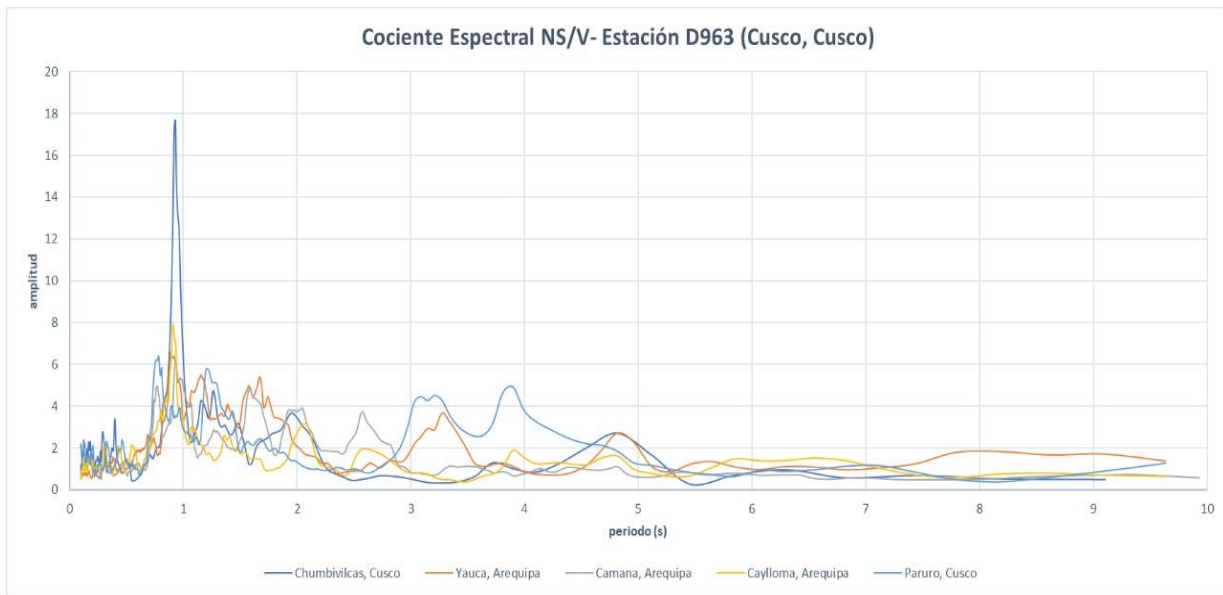


Figura 12 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación CUSCO (TEMPORAL) (Cusco, Cusco).

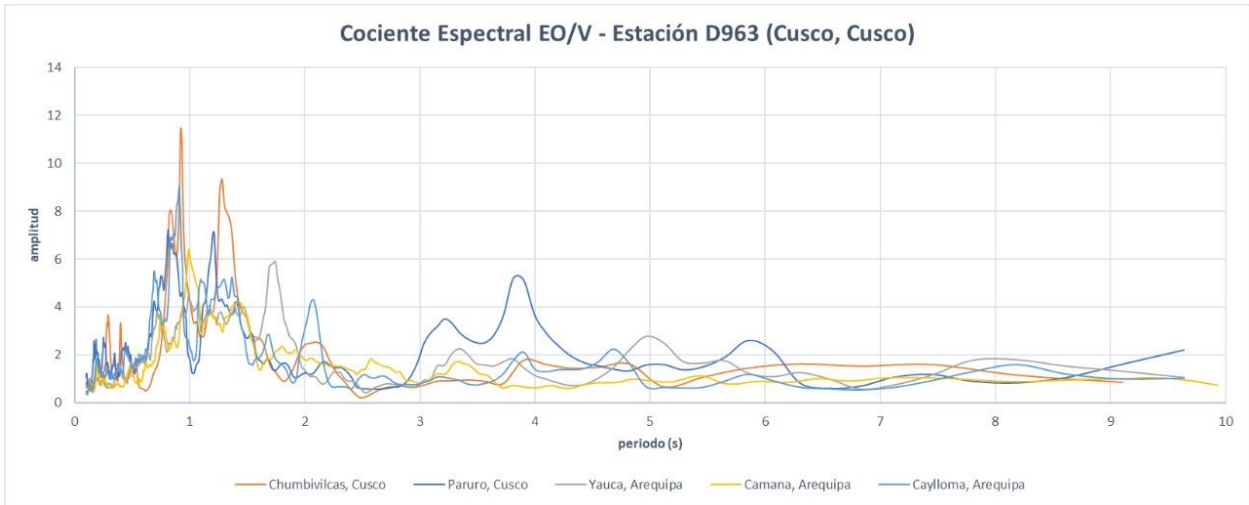


Figura 13 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación D693 (Cusco, Cusco)

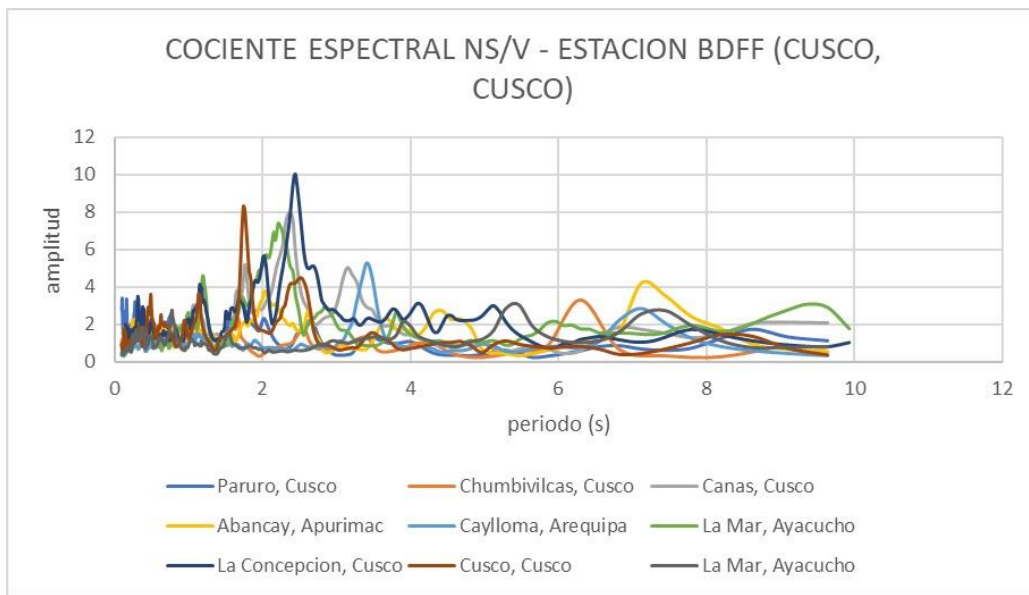


Figura 14 Cociente espectral NS/V de los sismos detectados por la estación CIP CUSCO (Cusco, Cusco)

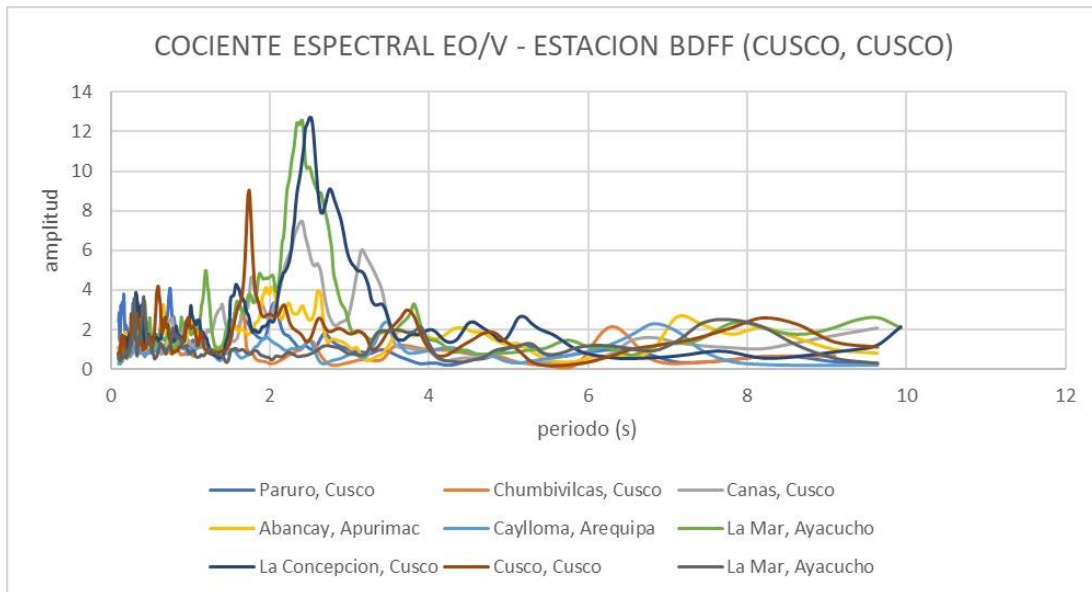


Figura 15 Cociente espectral EO/V de los sismos detectados por la estación CIP CUSCO (Cusco, Cusco)

A continuación, para cada acelerómetro, se realizó un primer promedio entre los cocientes espectrales de ambas direcciones horizontales para cada registro de sismo. Después se realizó un promedio de este resultado entre todos los sismos indicados en las gráficas de cada equipo acelerométrico. También se calculó la desviación estándar y se determinó el periodo fundamental de cada acelerómetro.

COCIENTE ESPECTRAL DE ACELERÓMETRO UAC - D89F (Wanchaq, Cusco)

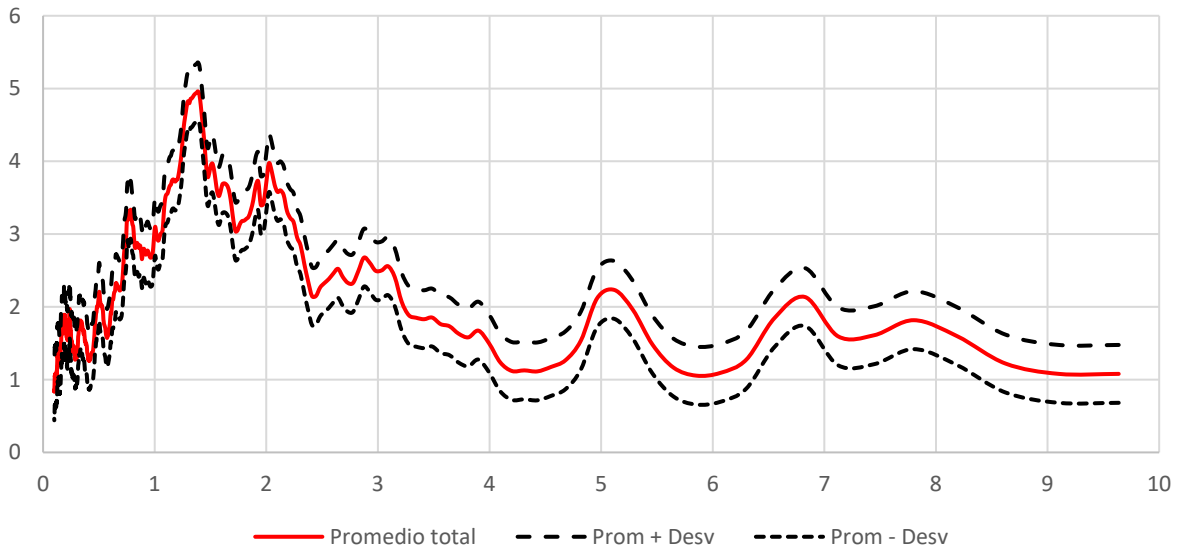


Figura 16 Cociente espectral de acelerómetro UAC – D89F (Wanchaq, Cusco)

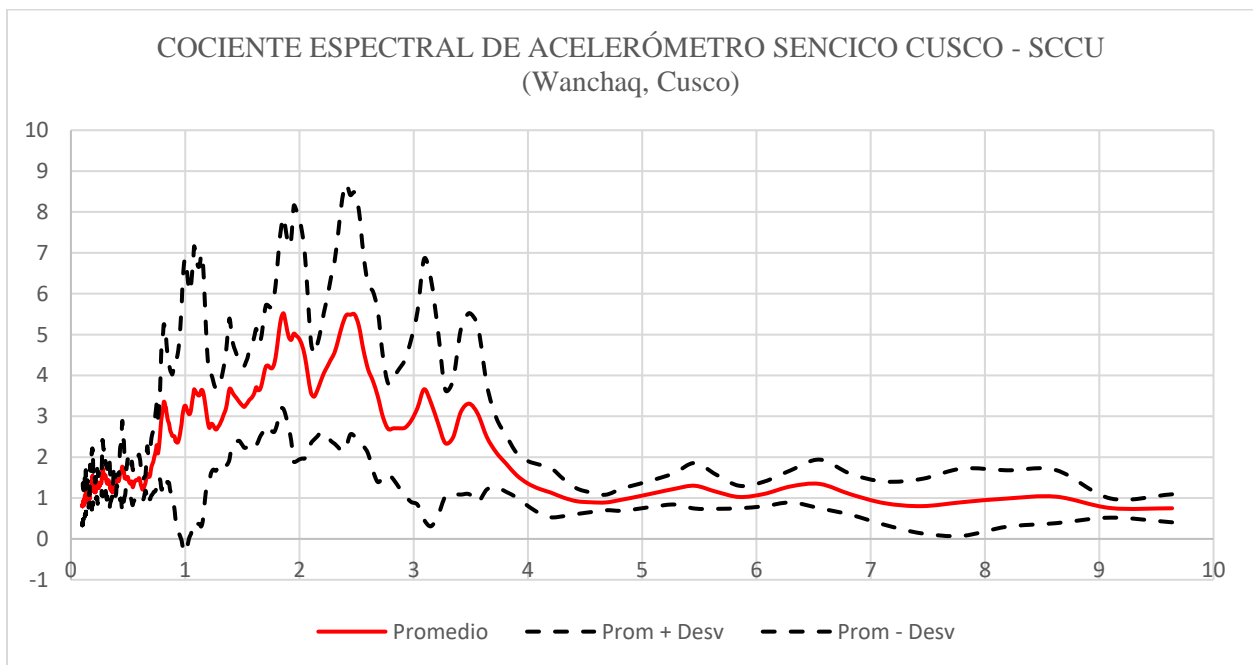


Figura 17 Cociente espectral de acelerómetro SENCICO CUSCO - SCCU (Wanchaq, Cusco)

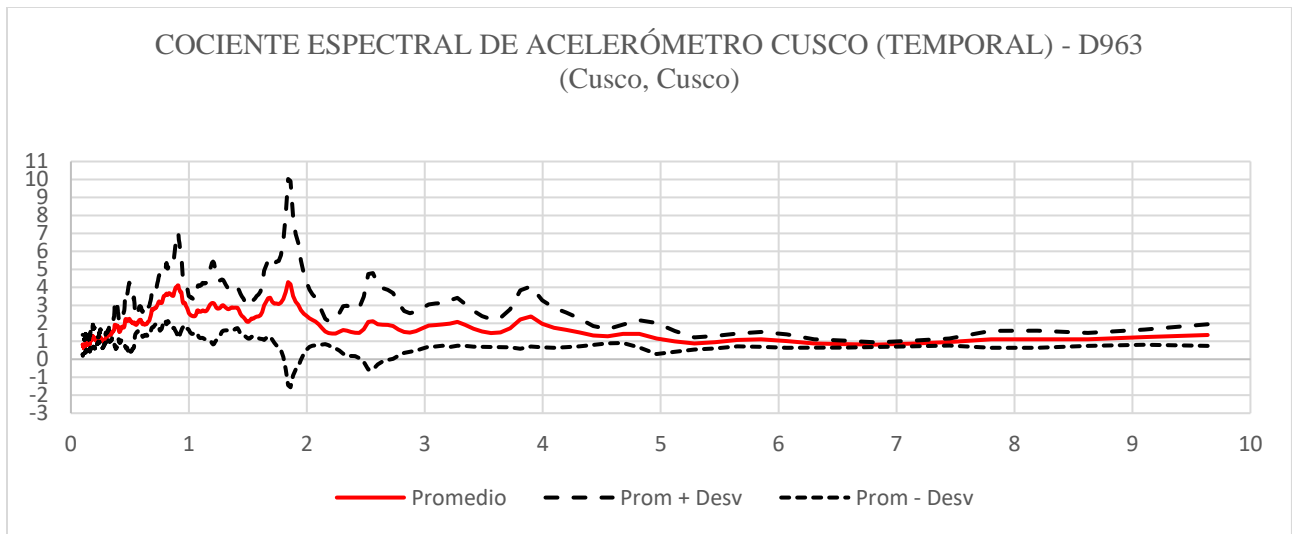


Figura 18 Cociente espectral de acelerómetro CUSCO (TEMPORAL) – D963 (Wanchaq, Cusco)

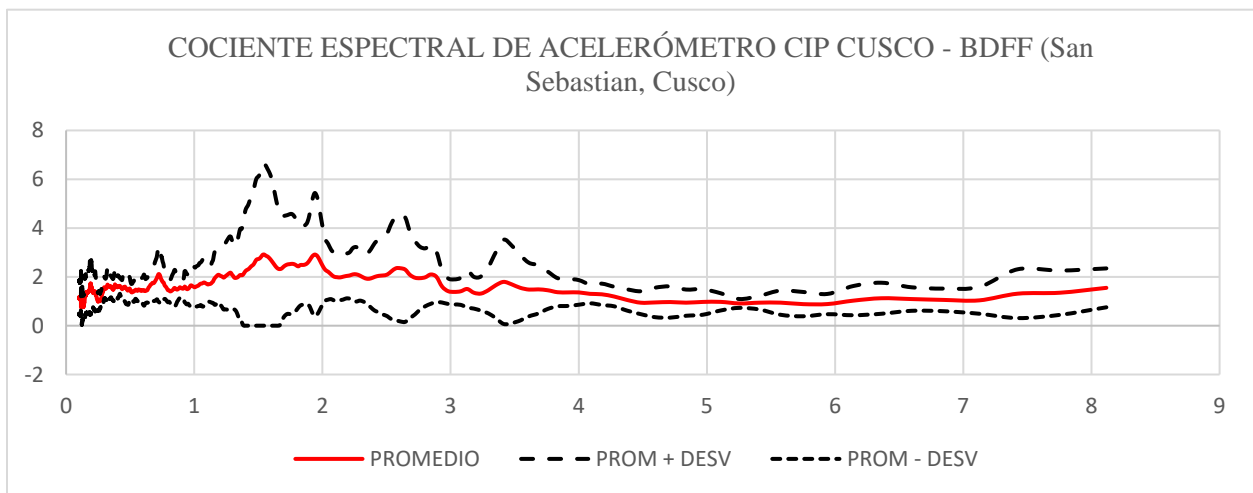


Figura 19 Cociente espectral de acelerómetro CIP CUSCO - BDFE (San Sebastian, Cusco)

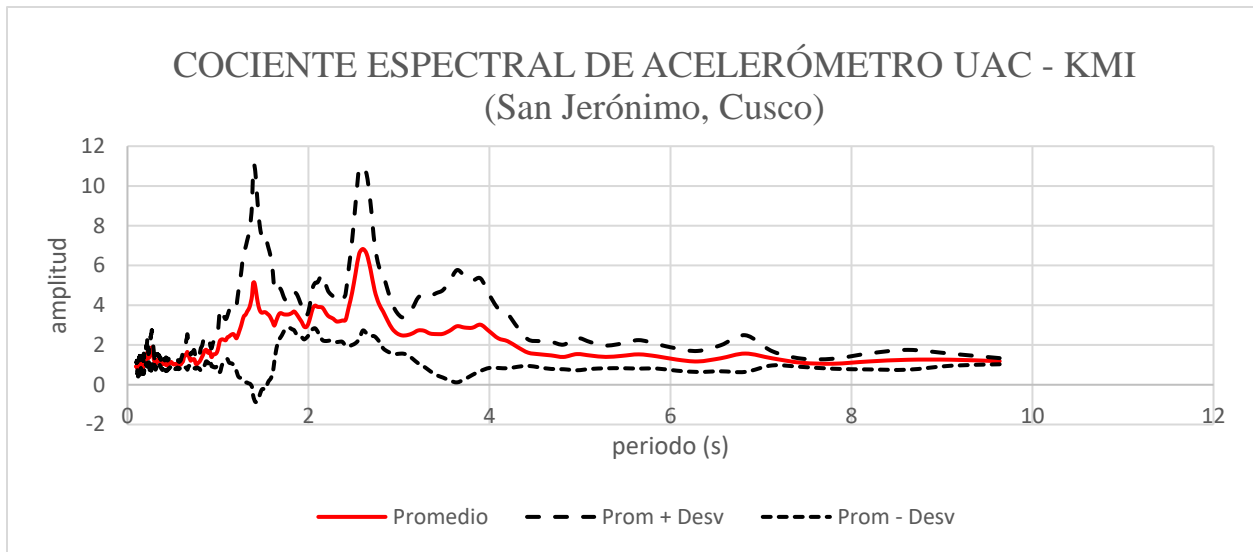


Figura 20 Cociente espectral de acelerómetro UAC - KMI (San Jerónimo, Cusco)

3.2.2. Evaluación detallada

Al evaluar los registros de la estación CUSCO (TEMPORAL) con el programa Seismoprocessor, se obtuvo un periodo predominante de 0.90 s. El tipo de suelo en esa ubicación es arcilla gravosa, según lo indicado en la Red Acelerográfica de la UNI, lo cual concuerda con el periodo calculado.

Por otro lado, se observa que, en determinados casos, las amplitudes máximas obtenidas en una estación para distintos sismos, corresponden a un rango de periodo identificable, como es el caso de las gráficas de cociente espectral que analizan las direcciones Este - Oeste (EO), mientras que las gráficas de cociente espectral que tienen como numerador la dirección Norte-Sur muestran una mayor dispersión de picos en amplitudes.

Al aplicar el método del cociente espectral se obtienen los siguientes periodos en cada sensor:

Tabla 10 Periodos fundamentales del suelo según la estación

Sensor	Periodo (s)
SENCICO CUSCO - SCCU	1.86
UAC - D89F	1.38
UAC-SAN JERÓNIMO-KMI	2.60
CUSCO (TEMPORAL) -D963	0.90
CIP CUSCO - BDFE	1.96

Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Los periodos fundamentales obtenidos para cada sensor demuestran la variabilidad en la zona de la ciudad de Cusco: se han obtenido valores de periodo desde 0.90 s hasta 2.60 s.
- La Norma E.030 de “Diseño Sismorresistente” evalúa a la ciudad de Cusco con un único parámetro de sismicidad. Sin embargo, se ha determinado que existen distintos valores de periodos para cada estación analizada.
- De acuerdo a los periodos obtenidos en cada estación, se concluye que el periodo para la estación para Cusco Temporal es de 0.90 segs; para UAC Wanchaq, 1.38 segs; Sencico Cusco, 1.86 segs; para CIP Cusco, 1.96 segs; y para UAC San Jerónimo, 2.60 segs. Asimismo, se concluye que el cambio de periodo según la ubicación se produce de manera gradual.
- De acuerdo a los periodos predominantes obtenidos, se concluye que, para edificaciones altas, como 9 pisos a más, existe mayor riesgo de que entre en resonancia y; por lo tanto, se generen mayores daños estructurales.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda la utilización de la data en las redes de registro sísmico de primera mano, como en la presente investigación, para la obtención directa de las variables reales.
- Se recomienda una mayor cantidad de estaciones sísmicas en Cusco con la finalidad de poder obtener mayor data sobre los efectos de suelo generados durante los sismos en esta localidad o en lugares aledaños.
- Se recomienda que todas las estaciones presenten registros acelerográficos para un mismo sismo, de tal manera que se puede tener una relación entre su comportamiento esperado para el análisis de cociente espectral.

Capítulo V: Bibliografía

- Aguilar, A. & Mollohuanca, W. (1986) - Estudio geológico y geodinámico del deslizamiento de Ranraq'asa, Yaurisque-Paruro, Cusco. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco, 150 p.
- Audebaud, E. (1973) - Geología de los cuadrángulos de Ocongate y Sicuani. Servicio de Geología y Minería, Boletín 25, 72 p.
- Cabrera, J. (1988) - Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère Andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: la région de Cusco, Pérou. Thèse Docteur 3ème cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay.
- Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Chávez, R.; Gil, W.; Jaillard, E. & Carlier, G. (1991) - Estratigrafía de la Formación Huambutío (Kimmeridgiano-Berriasiano) Cusco-Perú. En: Congreso Peruano de Geología.
- CESEL Ingenieros (2013) "Plan de manejo ambiental (PMA) del proyecto instalación central térmica Quillabamba y sistema de transmisión asociado Santa Ana, La Convención, Cusco
- CONCEJO MUNICIPAL DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CUSCO. Acuerdo Municipal N°13 - 2020 - MPC. 5 de febrero de 2020 (Perú).
- CORRECCIÓN DE LAS LÍNEA BASE DE REGISTROS DE TEMBLORES (1976) O. Rascón, M. Chavez, L. Alonso, V. Palencia. DOI: 10.18867/ris.16.399. Revista de Ingeniería Sísmica
- Cuenca, Julio C. Cociente Espectral en la Estación Sismológica UNM (México) usando dos sismos regionales cercanos. XV Congreso de Geología. 2010.

- Diaz-Segura, Edgar Giovanni. (2017). Incertidumbres en la estimación del periodo fundamental de terrenos inclinados. *Obras y proyectos*, (21), 38-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132017000100005>.
- GEOMECH SRL. Geotécnica Sísmica en el Valle del Cusco. Palacio Municipal- Plaza del Cabildo - Cusco Perú
- Hernandez, R.; Fernandez, C. y Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación (7ma ed.). McGRAW-HILL
- Jaramillo R. A y R. M. Cabrera (2012) Comparación de la estimación del período de suelo en diez sitios de la ciudad de México mediante el uso de vibración ambiental y sismos de mediana magnitud. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún: SMIG
- Jaramillo. R. A (2016) Método H/V para la reconfiguración del mapa de periodos predominantes del suelo del DF para diseño por sismo. *Revista Geotecnia* 227. SMIG
- Lermo, J. & Chavez-Garcia, F. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Seismological Society of America* 83(5).
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.831.2782&rep=rep1&type=pdf>.
- *Metodología*. (s. f.). RED ACELEROGRÁFICA UNI-CIP-SENCICO. Recuperado 15 de noviembre de 2021, de <http://www.red-acelerografica-peru.uni.edu.pe/es/page/metodology>.
- Nakamura. Y.(2000) Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. World Conferences on Earthquakes Engineering (12WCEE). Auckland.

- Ritta, Raul J.; Suárez, Luis E. y Pando, Miguel A. Determinación del periodo fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral Horizontal/Vertical. *Mecánica Computacional Vol XIII*. 2012
- Rivera. A. Z y H. A. Pérez (2019) Evaluación de los efectos de sitio a partir de la razón espectral H/V de microsismos en zonas aledañas a la Bahía de Santiago de Cuba. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais). Santiago de Cuba, Cuba.
- Rolando, J. R. (2018). Evaluación del comportamiento dinámico del suelo en Lima y Callao utilizando el método del cociente espectral H/V [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12212>
- Universidad de Alicante. (s. f.). ANEXO VI: PRÁCTICA 5 «TRATAMIENTO DE ACELEROGRAMAS». En *SISMOLOGÍA E INGENIERÍA SÍSMICA (PRÁCTICAS)* (pp. 2–4). <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19945/5/practica5.pdf>

ANEXO.-

