

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE FOURIER DE REGISTROS SÍSMICOS EN
FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DEL SENSOR**

AUTOR:

PÁRRAGA GUSQUI JOSELYNE DIANNE

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERA CIVIL**

TUTOR:

ING. HERNÁNDEZ BARREDO JAIME FRANCISCO, M.Sc.

Guayaquil, Ecuador

17 de septiembre del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **PÁRRAGA GUSQUI JOSELYNE DIANNE**, como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERA CIVIL**.

TUTOR

f. _____

Ing. Hernández Barredo Jaime Francisco, M.Sc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas Stefany Esther, M.Sc.

Guayaquil, a los 17 días del mes de septiembre del año 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **PÁRRAGA GUSQUI JOSELYNE DIANNE**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Análisis del espectro de Fourier de registros sísmicos en función del ángulo de orientación del sensor** previo a la obtención del título de **Ingeniera civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 17 días del mes de septiembre del año 2020

LA AUTORA

f. _____

Párraga Gusqui Joselyne Dianne



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Párraga Gusqui Joselyne Dianne**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis del espectro de Fourier de registros sísmicos en función del ángulo de orientación del sensor**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 17 días del mes de septiembre del año 2020

LA AUTORA:

f. _____

Párraga Gusqui Joselyne Dianne

REPORTE DE URKUND



Reducir

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO D ETTITULO PARRAGA_JOSELYNE-2....docx (D78843460)
Submitted: 9/9/2020 5:40:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 0 %

Sources included in the report:

Instances where selected sources appear:

0

A 17 3.81

TUTOR

f. _____

Ing. Hernández Barredo Jaime Francisco, M.Sc.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios, quién me permitió cumplir esta meta y a María, por acompañarme en el camino.

A mi abuelita, que está en el cielo, pero vivirá eternamente en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente agradezco a un gran amigo y Padre, Dios, porque me ha acompañado en cada situación.

A mis padres, Eddy y Elvia, por el inmenso amor que me han obsequiado.

A mis hermanas, Gloria y Johanna, por ser luz en mi vida.

A mi familia, por todo el apoyo recibido.

A mi tutor de tesis, el ingeniero Jaime Hernández, por la paciencia en este trabajo y por ser inspiración, a lo largo de la carrera, para buscar la excelencia en los estudios.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Lilia Valarezo Moreno, M.S.

DECANA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Guillermo Ponce Vásquez, M.Sc.

DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. José Barros Cabezas, M. Sc.

OPONENTE

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	2
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos.....	4
Objetivo general.	4
Objetivos específicos	4
1.3. Alcance	5
CAPÍTULO 2.....	6
Marco teórico	6
2.1. Sismología.....	6
2.2. Registros sísmicos.....	6
2.3. Análisis de señales sísmicas.	7
2.3.1. Clasificación de señales	7
2.4. Caracterización de registros sísmicos	8
2.4.1 Amplitud.	8
2.4.2. Contenido de frecuencia.....	9
2.5. Series de Fourier	9
2.6. Transformada Discreta de Fourier	10
2.7. Transformada rápida de Fourier	10
2.8. Espectro de Fourier	11
CAPÍTULO 3.....	12
Planteamiento del Problema.....	12
CAPÍTULO 4.....	15
4. Metodología	15
4.1. Estudio para registros sísmicos de Sismo de Pedernales	15
4.1.1 Red de acelerógrafos en Ecuador.....	15
4.1.2. Registros sísmicos	16

4.1.3. Rotación de registros.....	17
4.1.4. Espectro de Fourier	17
4.1.5. Clasificación de Estaciones Acelerográficas	18
4.2. Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos.....	21
4.2.1. Estaciones en Guayaquil.....	21
4.2.2. Registros sísmicos	22
4.2.3. Rotación de registros.....	22
4.2.4. Espectros de Fourier	23
4.2.5 Comparación de resultados.....	23
CAPÍTULO 5.....	24
5. Resultados y Análisis.....	24
5.1. Estudio para registros sísmicos del sismo de Pedernales.....	24
5.1.1. Red de acelerógrafos en Ecuador	24
5.1.2. Clasificación de Estaciones Acelerográficas	28
5.2. Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos.....	35
5.2.1. Estaciones en Guayaquil.....	35
5.2.2. Comparación de resultados.....	37
CAPÍTULO 6.....	39
6. Resumen, conclusiones y recomendaciones:	39
6.1. Resumen	39
□ 6.2. Conclusiones.....	40
6.3. Recomendaciones	41
7. ANEXOS.....	44
ANEXO 1: estudio para registros sísmicos del sismo de Pedernales.....	45
ANEXO 2: Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos	72
Estación CICG.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Movimiento periódico y no periódico: (a) Movimiento armónico simple; (b) Movimiento periódico común; (c) Movimiento no periódico producto de una carga de impacto; (d) Movimiento no periódico producto de un terremoto. Fuente: (Kramer, 1996) _____	7
Ilustración 2: Artificio para representar un movimiento no periódico como un movimiento periódico. Fuente: (Kramer, 1996) _____	8
Ilustración 3: Historia-Tiempo de desplazamiento, velocidad y aceleración. Fuente: (Çavdar, 2012) _____	9
Ilustración 4: Series de Fourier para simplificar una serie de señales complejas y obtener una sola respuesta Historia-Tiempo. (a) Registro de una señal; (b) representación del registro Historia-tiempo como la suma de varias señales armónicas; (c) cálculo de la respuesta para cada señal armónica; (d) suma de las respuestas de cada señal armónica; (e) Historia-tiempo de la respuesta total. _____	10
Ilustración 5: Espectro de amplitud de Fourier. Fuente: (Miriano, Cattoni, Tamagnini, & Claudio, 2016) _____	11
Ilustración 6: Distribución de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador. Fuente: (Instituto Geofísico - EPN, 2016) ____	16
Ilustración 7: Gráfica Historia-Tiempo de desplazamiento de un registro de la red RENAC _____	17
Ilustración 8: Ecuaciones de las combinaciones lineales utilizadas en (Boore, Watson-Lamprey, & Abrahamson, 2006) Pg.1505 _____	17
Ilustración 9: Ejemplo de categoría: Periodo fundamental evidente. Caso A	18
Ilustración 10: Ejemplo de categoría: Periodo fundamental evidente. Caso B _____	19
Ilustración 11: Ejemplo de categoría: 2 Periodos Importantes _____	19
Ilustración 12: Ejemplo de categoría: Periodos diferentes. Caso A _____	20
Ilustración 13: Ejemplo de categoría: Periodos diferentes. Caso B _____	21
Ilustración 14: Estaciones UCSG y CICG _____	22
Ilustración 15: Rotación 0° - 180° estación AGYE _____	25
Ilustración 16: Rotación 0° - 180° estación ATUL _____	26

Ilustración 17: Rotación 0° - 180° estación EPNL _____	27
Ilustración 18: Rotación 0° - 180° estación Pedernales _____	36
Ilustración 19: Rotación 0° - 180° estación Bahía de Caráquez _____	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de frecuencias y periodos para las componentes horizontales _____	12
Tabla 2: Registros sísmicos en estaciones CEMSIS _____	23
Tabla 3: Resumen de Frecuencias y Periodos en estaciones RENAC ____	28
Tabla 4: Clasificación de registros - RENAC _____	30
Tabla 5: Registros ordenados según Periodo _____	32
Tabla 6: Categorías ordenadas según valores de PGA _____	33
Tabla 7: Resultados de Estaciones CEMSIS _____	38

RESUMEN

El espectro de Fourier es una herramienta que permite analizar el contenido de frecuencias de un registro sísmico y con ello observar las frecuencias dominantes de la señal. Las frecuencias dominantes de un registro sísmico pueden proporcionar información sobre las características del suelo, relacionando a estas con el periodo fundamental de vibración del suelo. Generalmente, este análisis se lo realiza, de manera individual, a las dos (2) componentes horizontales de un registro sísmico.

Trabajos de investigación previos han demostrado que, en ciertas ocasiones, el análisis individual de las componentes horizontales puede arrojar resultados inconsistentes, resultando en periodos fundamentales de suelo totalmente diferentes para cada componente horizontal. A menos que exista un accidente geográfico importante cerca de la estación acelerográfica, se esperaría que el periodo fundamental del suelo sea independiente de la dirección de análisis.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar las frecuencias (o periodos) dominantes de vibración de componentes horizontales de registros sísmicos, de tal forma que sean independientes de la dirección de análisis y estimar un “único” periodo fundamental de vibración del suelo para cada estación acelerográfica.

Con la finalidad de analizar con mayor profundidad las frecuencias dominantes de los registros sísmicos, este trabajo plantea estudiar los Espectros de Fourier de registros sísmicos para varios ángulos de rotación y compararlos con los valores obtenidos para las componentes horizontales originales (Este-Oeste y Norte-Sur).

Palabras claves: espectro de Fourier, frecuencia, periodo, registro sísmico, componentes horizontales, ángulos de rotación.

ABSTRACT

The Fourier spectrum is a method to analyze the frequency content of a seismic record and thus, observe the dominant frequencies of a signal. The dominant frequencies of a seismic record may give information about the characteristics of ground, relating these to the fundamental period of vibration of the ground. Generally, this analysis is done, individually, to the two horizontal components of a seismic record.

Preliminary studies have shown that, in some cases, the individual analysis of the horizontal components might give inconsistent results, resulting in completely different fundamental periods of each horizontal component. Unless a significant landform locates near the accelerographic station, the fundamental period would be expected to be independent of direction of analysis.

This research focuses on the study of the dominant frequencies (or periods) of vibration of horizontal components of seismic records, in such a way that these are independent of the analysis direction to estimate a “unique” dominant period of vibration of the ground for each accelerographic station.

In order to further analyze the dominant frequencies of ground motion records, this work proposes to study the Fourier spectrum of seismic records for several rotation angles and compare these with the results using only the horizontal components (East-West and North-South).

Keywords: Fourier spectrum, frequency, period, seismic record, horizontal components, rotation angles.

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

Cuando un sismo ocurre, el movimiento del suelo se produce en todas las direcciones. Para cuantificarlo, se identifican tres direcciones principales: una en sentido vertical y dos en sentido horizontal (generalmente componente Este-Oeste y componente Norte-Sur). La señal producida durante un evento sísmico es captada en una estación acelerográfica mediante acelerógrafos (sensores) en las 3 componentes indicadas y de cada una de ellas se registra la variación de la aceleración con respecto al tiempo, lo que se conoce como registro sísmico.

Una de las características más importantes de los registros sísmicos es su contenido de frecuencia. Cuando el contenido de frecuencia de un registro sísmico coincide o es cercana a la frecuencia principal de vibración de una estructura, la respuesta sísmica de la estructura se amplifica. De igual manera, la señal del registro sísmico, capturado en la superficie, está influenciada por el medio de propagación de la onda, que en este caso es el suelo bajo la estación acelerográfica.

Uno de los métodos utilizados para el análisis de las frecuencias de registros sísmicos es el Espectro de Fourier. Este análisis se lo aplica generalmente a una de las componentes horizontales, con el cual se obtienen las frecuencias dominantes de la señal.

Como los suelos filtran o amplifican las señales sísmicas, se suele relacionar a la frecuencia dominante de los registros sísmicos con el periodo (inverso de la frecuencia) natural de vibración del suelo.

Sin embargo, no se han encontrado investigaciones acerca de los criterios para seleccionar una de las componentes horizontales en lugar de la otra. Asumir que la frecuencia señalada por su espectro de Fourier representa la frecuencia del suelo puede significar errores.

Suarez (2020) estudió las componentes horizontales de los registros sísmicos obtenidos en el Sismo de Pedernales (16 de abril del 2020). En este estudio se clasificaron los registros sísmicos según su periodo (o frecuencia)

fundamental de vibración asumiendo que estos representan los periodos fundamentales de vibración del suelo de la estación acelerográfica. De los valores obtenidos, algunos presentaron grandes diferencias entre las componentes horizontales de una misma estación, lo que no permitió clasificarlos de manera correcta.

A menos que existan accidentes geográficos importantes cerca de la estación acelerográfica, se puede asumir que las propiedades dinámicas de los suelos son iguales en todas las direcciones, dando como resultado periodos fundamentales de vibración del suelo independientes de la dirección de análisis. Esta hipótesis resulta contradictoria con algunos de los resultados obtenidos por Suarez (2020) por lo que era necesaria una revisión más profunda del método de cálculo empleado y sus resultados.

Debido a que no se encontró una investigación acerca de la variación de frecuencias entre las componentes horizontales o acerca de los criterios para considerar una de las componentes horizontales, se consideró necesario realizar el presente trabajo de investigación, en donde se analizará cómo se comporta el espectro de Fourier en diferentes ángulos de rotación y tiene como finalidad advertir que la frecuencia dominante, en ocasiones, no corresponde a la del suelo.

Para el desarrollo y análisis de resultados, este estudio se ha dividido en 2 partes.

En la primera parte se estudia un set de registros sísmicos (29 pares de componentes horizontales) obtenidos en el Terremoto de Pedernales (16 de abril del 2016). Los registros estudiados consideran estaciones acelerográficas ubicadas a diferentes distancias a la falla y diferentes tipos de suelo. El análisis tiene el objetivo de determinar si el cálculo de las frecuencias dominantes únicamente con los registros sísmicos obtenidos de las estaciones acelerográficas (sin analizar su variación en función de la rotación) es dependiente de la magnitud de la máxima aceleración de la señal (PGA), la distancia a la falla o el tipo de suelo (periodo de vibración).

En la segunda parte se analizan registros sísmicos de una misma estación acelerográfica, pero obtenidas en diferentes eventos sísmicos. El objetivo de

este análisis es determinar si el cálculo de las frecuencias dominantes únicamente con los registros sísmicos obtenidos de las estaciones acelerográficas son dependientes de la máxima aceleración de la señal (PGA) obtenida en cada evento sísmico.

El presente trabajo de titulación está compuesto por 5 capítulos. En el capítulo 1 se encuentran las generalidades del trabajo. En el capítulo 2 se exponen los conceptos relevantes que se emplearon en la investigación. En el capítulo 3 se detalla el origen de la problemática que llevó a cabo la realización de este proyecto. En el capítulo 4 se explica la metodología utilizada para cumplir con los objetivos. En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos en los 2 análisis realizados. Finalmente, en el capítulo 6 se encuentra el resumen, conclusiones y recomendaciones del trabajo.

1.2. Objetivos

Objetivo general.

Analizar como varía el espectro de Fourier de registros sísmicos en función del ángulo de análisis de sensor.

Objetivos específicos

- Identificar en qué casos es posible determinar el periodo fundamental del suelo con la frecuencia señalada por los espectros de Fourier y establecer un parámetro característico de esas estaciones.
- Comparar los resultados de diferentes eventos sísmicos registrados en una misma estación acelerográfica, para comprobar que las frecuencias correspondientes al suelo se mantienen y descartar los valores influenciados por la señal.
- Realizar un algoritmo de programación para rotar las componentes horizontales y calcular el espectro de Fourier para cada ángulo de rotación.

1.3. Alcance

En el presente trabajo se realizaron 2 análisis:

- El primer análisis fue realizado a los 29 pares de registros sísmicos (componentes horizontales) del Sismo de Pedernales utilizados por (Suárez, 2020),

Se calcularon registros sísmicos, combinando las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, que represente el movimiento sísmico a diferentes ángulos de rotación (desde 0° hasta 180°) para luego obtener los Espectros de Fourier correspondientes a cada uno de estos. Por medio de la elaboración de videos, se observó qué frecuencias varían en función de la rotación y cuales se mantienen independientes del ángulo en estudio y se identificaron las frecuencias dominantes para cada una de las estaciones.

Las frecuencias (o periodos) dominantes obtenidos se compararon con aquellos correspondientes a las componentes horizontales originales (Norte-Sur y Este-Oeste) reportadas en Suarez (2020).

Se clasificaron los resultados en función de la facilidad en identificar las frecuencias dominantes para todas las rotaciones de cada estación y se relacionaron estas a otros parámetros como distancia a la falla de la estación, PGA de los registros sísmicos y “tipo de suelo” o periodo dominante de vibración.

- Para el segundo análisis se estudiaron los registros sísmicos de dos (2) estaciones ubicadas en Guayaquil. Para cada una de las estaciones se estudiaron registros sísmicos capturados en diferentes eventos sísmicos. A cada evento sísmico se aplicó la misma metodología del primer análisis para obtener el periodo fundamental de vibración de la estación. Se compararon los resultados obtenidos en cada estación para diferentes eventos con la finalidad de comprobar si los periodos fundamentales de vibración se mantenían iguales. Este análisis partía de la hipótesis que el periodo fundamental del registros podría ser atribuido al periodo fundamental del suelo, y que las propiedades dinámicas del suelo no variarían para cada evento.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1. Sismología.

La Tierra no es estática, está continuamente vibrando. Estos movimientos manifiestan propiedades de ondas, que son perturbaciones propagadas en el espacio. Cuando la energía acumulada en el interior de la Tierra supera la resistencia del suelo, dicha energía se libera, en forma de ondas y en forma de calor, provocando los sismos y produciendo movimientos que pueden ser medidos.

La palabra Sismología proviene de seismos (terremotos) y logos (ciencia), entendido como “la ciencia que estudia los terremotos”, estudia la propagación de las ondas elásticas a través del suelo, asociadas a los terremotos. Aunque los sismos son fenómenos complejos, la sismología provee un entendimiento cercano de sus mecanismos, los procesos por los que ocurre un terremoto y sus efectos en el movimiento del suelo.

2.2. Registros sísmicos.

El movimiento del suelo durante un terremoto sucede en varias direcciones, se requiere una forma cuantitativa de describirlo. Esto se puede realizar identificando tres componentes de rotación y tres de traslación. Las componentes ortogonales de traslación son generalmente más utilizadas; dos componentes horizontales (en el sentido Norte-Sur y Este-Oeste) y una vertical.

La actividad del suelo puede ser medida por sismógrafos, pero estos instrumentos suelen ser muy sensibles, registrando incluso movimientos débiles. Para identificar especialmente sismos considerables, se utilizan los acelerógrafos. Los cuales permiten obtener un gráfico denominado acelerograma, que muestra la variación de aceleraciones en un lugar determinado (Instituto Geofísico - EPN, 2014).

2.3. Análisis de señales sísmicas.

El registro cuantitativo del movimiento sísmico hace uso de modelos matemáticos para describir eventos dinámicos y así, expresar la señal en forma numérica.

2.3.1. Clasificación de señales

Las señales pueden ser periódicas o no periódicas. Una señal es periódica cuando los valores que toma se repiten en intervalos regulares del tiempo. Por el contrario, un movimiento no periódico no se repite en intervalos regulares. La señal emitida por un terremoto es transitoria y de larga duración, resultando en un movimiento no periódico. En la Figura 1 se muestran algunos ejemplos de señales periódicas y no periódicas.

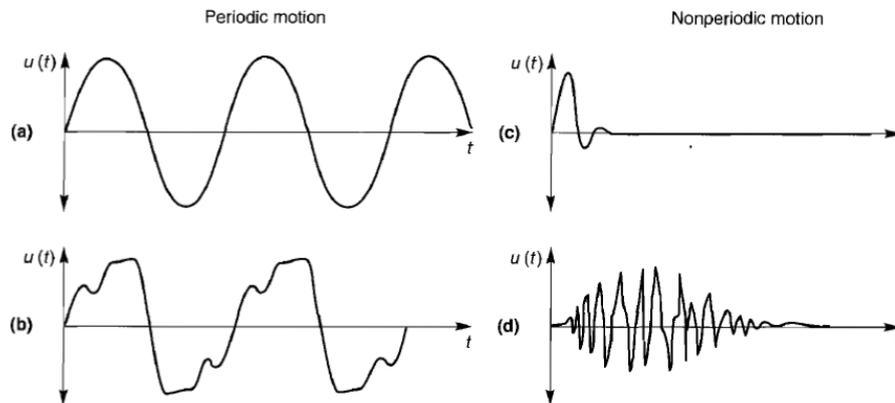
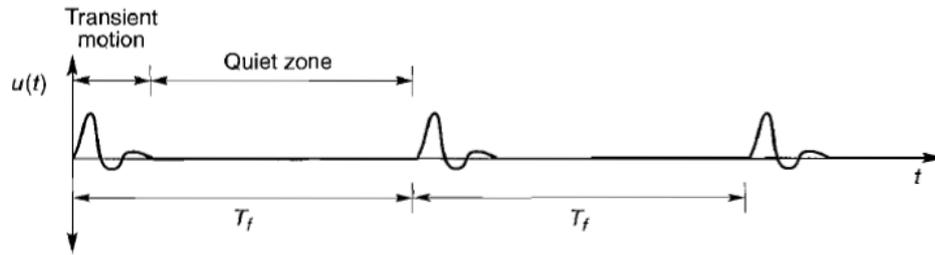


Ilustración 1: Movimiento periódico y no periódico: (a) Movimiento armónico simple; (b) Movimiento periódico común; (c) Movimiento no periódico producto de una carga de impacto; (d) Movimiento no periódico producto de un terremoto. Fuente: (Kramer, 1996)

Así como, una señal periódica compleja (Figura 1.b) puede ser simplificada como un movimiento armónico simple (Figura 1.a), incluso para movimientos no periódicos y transitorios, como un terremoto (Figura 1.d), se puede hacer uso de técnicas matemáticas y ser expresados como la suma de una serie de movimientos armónicos simples. Se asume que la señal se repite a sí misma luego de una “zona tranquila” donde el movimiento no ocurre, como se muestra en la Figura 2.



*Ilustración 2: Artificio para representar un movimiento no periódico como un movimiento periódico.
Fuente: (Kramer, 1996)*

2.4. Caracterización de registros sísmicos

Es necesario describir las características del movimiento del suelo que tengan un interés de estudio. Para propósitos de ingeniería, se determinan tres propiedades importantes: amplitud, contenido de frecuencia y duración del evento.

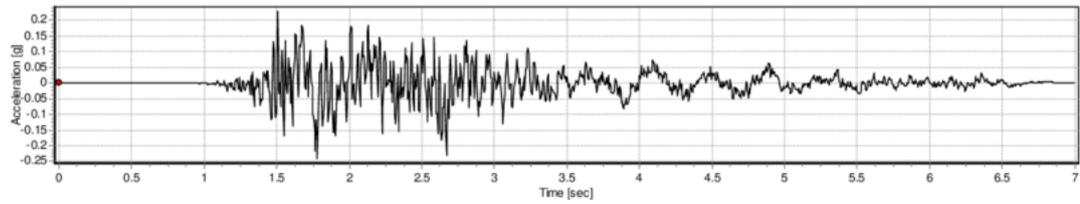
2.4.1 Amplitud.

En la amplitud se registra un parámetro que puede ser: desplazamiento, velocidad o aceleración. En la Ecuación 1 se muestra el desplazamiento en la notación compleja; en la Ecuación 2, la velocidad; y, en la Ecuación 3, la aceleración. La variación de la amplitud con respecto al tiempo se presenta en la Ilustración 3, mediante un gráfico llamado Historia-Tiempo.

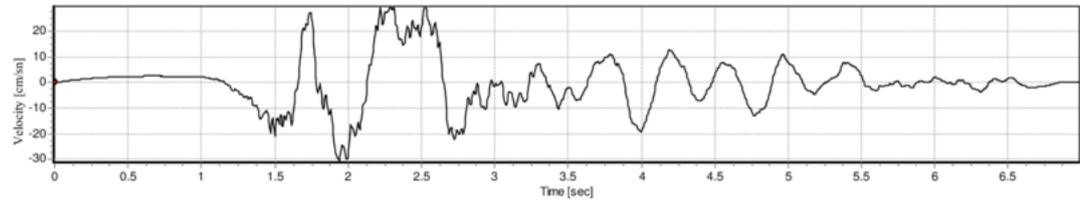
$$u(t) = Ae^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\dot{u}(t) = i\omega Ae^{i\omega t} \quad (2)$$

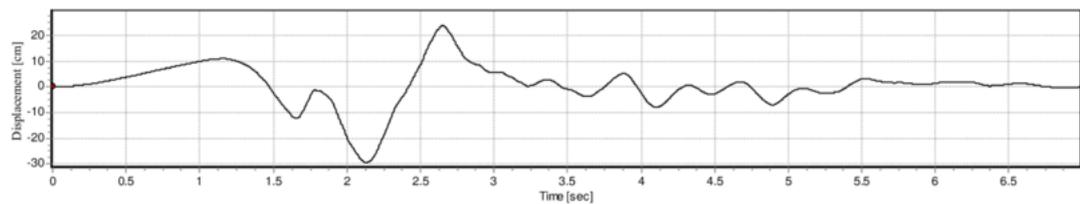
$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 Ae^{i\omega t} \quad (3)$$



(a) The time-histories of ground motion acceleration



(b) The time-histories of ground motion velocity



(c) The time-histories of ground motion displacement

Ilustración 3: Historia-Tiempo de desplazamiento, velocidad y aceleración. Fuente: (Çavdar, 2012)

2.4.2. Contenido de frecuencia.

Las señales generadas durante un movimiento sísmico tienen una amplia gama de frecuencias. El contenido de frecuencia describe la distribución de la amplitud del movimiento a lo largo de diferentes frecuencias. Durante un terremoto, múltiples ondas son transmitidas, el contenido de frecuencia puede variar según las propiedades del medio donde viajan, además, influye en los efectos del movimiento. El estudio de una señal sísmica no estaría completo sin analizar el contenido de frecuencias.

La frecuencia se define como el número de ciclos que ocurren dentro de un periodo particular de tiempo. Es inversa al periodo de vibración, que es el tiempo requerido para que se complete un ciclo. Su unidad se expresa en Hz, igual a 1/s.

2.5. Series de Fourier

El matemático francés Fourier demostró que cualquier función periódica que cumpla ciertas condiciones puede ser expresada como la suma de una serie de sinusoides de diferente amplitud, frecuencia y fase. Las series de Fourier es una herramienta muy útil en el estudio de señales para diferentes ramas

de ciencia e ingeniería. Su uso es más adecuado cuando se trabaja con señales continuas y periódicas.

(Lay & Wallace, 1995) señalan que la sumatoria se puede realizar si la amplitud y la alineación de fase de los términos armónicos se eligen adecuadamente y la suma se realiza sobre una distribución continua de funciones armónicas. En la Ilustración 4 se muestra la obtención del registro Historia-Tiempo utilizando superposición de varias señales.

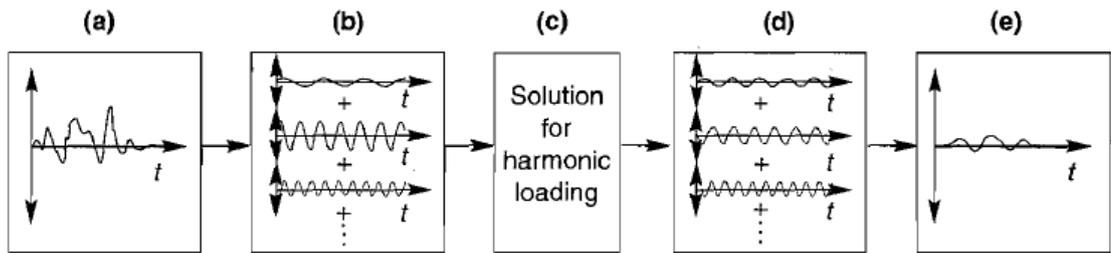


Ilustración 4: Series de Fourier para simplificar una serie de señales complejas y obtener una sola respuesta Historia-Tiempo. (a) Registro de una señal; (b) representación del registro Historia-tiempo como la suma de varias señales armónicas; (c) cálculo de la respuesta para cada señal armónica; (d) suma de las respuestas de cada señal armónica; (e) Historia-tiempo de la respuesta total.

2.6. Transformada Discreta de Fourier

Se utiliza para señales discretas y periódicas. La ecuación de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) se indica en la Ecuación 4. El tiempo requerido para calcularla es proporcional a N^2 . El dominio del tiempo y de frecuencia, son dos alternativas para analizar una señal, la Transformada discreta de Fourier permite cambiar de un dominio a otro (Teymur, 2000).

$$X(\omega_n) = \Delta t \sum_{k=1}^N x(t_k) e^{-i\omega_n t_k} \quad (4)$$

2.7. Transformada rápida de Fourier

(Cooley & Tukey, 1965) desarrollaron un algoritmo computacional más eficiente que la DFT, donde N es una potencia de 2. En consecuencia, el tiempo requerido es proporcional a $N \log_2 N$. En la Ecuación 8 se expresa la ecuación de la Transformada de Fourier.

$$F(\omega_n) = |A(\omega)| e^{i\phi(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

2.8. Espectro de Fourier

El gráfico $A(\omega)$ vs ω_n se llama Espectro de amplitud de Fourier y $\phi(\omega)$ vs ω_n , Espectro de fase de Fourier. El espectro de amplitud de Fourier permite conocer el contenido de frecuencia de un movimiento sísmico. El espectro de fase de Fourier influye en la variación del movimiento del suelo con el tiempo y no muestran formas características.

El espectro de amplitud de Fourier (mostrado en la Ilustración 5) tiene múltiples finalidades. Se utiliza para estudiar mecanismos de origen, analizar la amplificación local de ondas incidentes, efectos de las irregularidades topográficas y estudios de la interacción suelo-estructura.

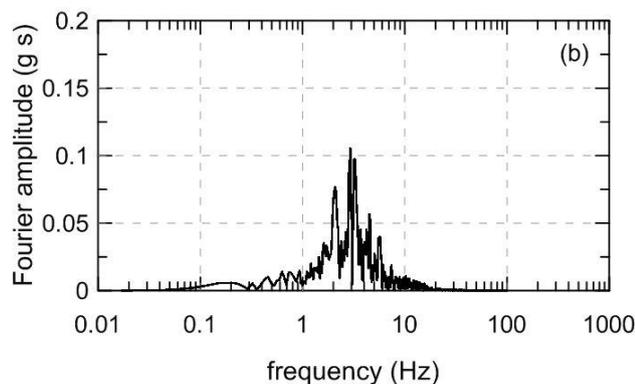


Ilustración 5: Espectro de amplitud de Fourier. Fuente: (Miriano, Cattoni, Tamagnini, & Claudio, 2016)

Dado que, una señal compleja se representa como la suma de varias señales simples y cada una, es una onda sinusoidal con su propia amplitud y frecuencia. El espectro de Fourier representa en el eje de las ordenadas, la frecuencia y en el eje de las abscisas, la amplitud máxima, para cada una de las ondas sinusoidales que constituyen un registro sísmico. Al realizar el espectro de Fourier a un acelerograma, la amplitud graficada es la aceleración máxima de cada una de las ondas sinusoidales, dividida para su correspondiente frecuencia.

CAPÍTULO 3

Planteamiento del Problema

El análisis frecuencial de una señal sísmica es estudiado utilizando el espectro de amplitud de Fourier. Generalmente se utiliza una de las componentes horizontales para graficar el espectro de Fourier, obtener la frecuencia dominante y así, el periodo del suelo.

Sin embargo, en el trabajo de investigación realizado por (Suárez, 2020) se encontraron discrepancias en los resultados obtenidos entre ambas componentes horizontales de una misma estación acelerográfica. El autor estudió los métodos de combinación de las componentes horizontales, utilizados para generar los espectros de respuestas de varias estructuras de 1 grado de libertad. Para poder comparar los resultados de los métodos utilizados, consideró necesario clasificar los registros de acuerdo con el periodo del suelo, las categorías correspondían a periodos altos, intermedios y bajos.

En el trabajo mencionado se utilizaron los registros sísmicos correspondientes al terremoto de Ecuador en la ciudad de Pedernales del 16 de abril del 2016 y del evento sísmico de Maule-Chile en el 2010. En algunas estaciones se evidencia la problemática al obtener dos valores muy dispersos de periodos. El autor escogió el mayor valor entre las dos componentes y así, determinó su clasificación. Los resultados de las 29 estaciones para el sismo en Ecuador utilizadas por (Suárez, 2020), se encuentran resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de frecuencias y periodos para las componentes horizontales

ECUADOR - PEDERNALES 2016			
ESTACION	COMPONENTE	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
APO1	EO	2.64	0.38
	NS	2.09	0.48
APR2	EO	2.08	0.48
	NS	2.08	0.48
APS4	EO	2.42	0.41
	NS	2.37	0.42

ECUADOR - PEDERNALES 2016			
ESTACION	COMPONENTE	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
ASDO	EO	2.05	0.49
	NS	1.98	0.51
AV11	EO	3.14	0.32
	NS	3.35	0.30
AV18	EO	1.84	0.54
	NS	2.04	0.49
AV21	EO	2.42	0.41
	NS	3.36	0.30
AMA1	EO	1.73	0.58
	NS	1.65	0.61
AIB1	EO	0.87	1.15
	NS	1.03	0.97
AIB2	EO	1.14	0.88
	NS	1.25	0.80
AMNT	EO	0.91	1.10
	NS	1.46	0.68
APED	EO	1.55	0.65
	NS	2.10	0.48
PDNS	EO	1.21	0.83
	NS	1.78	0.56
EPNL	EO	0.82	1.22
	NS	1.37	0.73
AGYE	EO	2.29	0.44
	NS	1.27	0.79
AAM2	EO	0.42	2.38
	NS	0.49	2.04
ACH1	EO	0.60	1.67
	NS	0.60	1.67
ACHN	EO	0.74	1.35
	NS	0.68	1.47
ACUE	EO	0.71	1.41
	NS	0.95	1.05
AES2	EO	0.70	1.43
	NS	0.66	1.52
AGY1	EO	0.59	1.69
	NS	0.62	1.61

ECUADOR - PEDERNALES 2016			
ESTACION	COMPONENTE	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
AGY2	EO	0.58	1.72
	NS	0.60	1.67
ALAT	EO	0.74	1.35
	NS	0.53	1.89
ALIB	EO	0.52	1.92
	NS	0.87	1.15
ALJ1	EO	0.61	1.64
	NS	0.62	1.61
ALOR	EO	0.57	1.75
	NS	0.42	2.38
AMIL	EO	0.29	3.45
	NS	0.92	1.09
AOTA	EO	0.71	1.41
	NS	0.60	1.67
ATUL	EO	0.73	1.37
	NS	1.28	0.78

Algunas estaciones mantienen un rango de frecuencias similares para ambas componentes. Al asumir que la frecuencia dominante del registro es la del suelo, se espera que la frecuencia se mantenga en un rango cercano para una misma estación, dado que es el mismo suelo. Sin embargo, hay estaciones en las que esto no se cumple.

Debido a que el autor no estudió la variación de los resultados y no se encontró una investigación acerca de la variación de frecuencias entre las componentes horizontales, se consideró necesario realizar el presente trabajo de investigación, en donde se analizará cómo se comporta el espectro de Fourier según el ángulo de orientación del sensor.

CAPÍTULO 4

4. Metodología

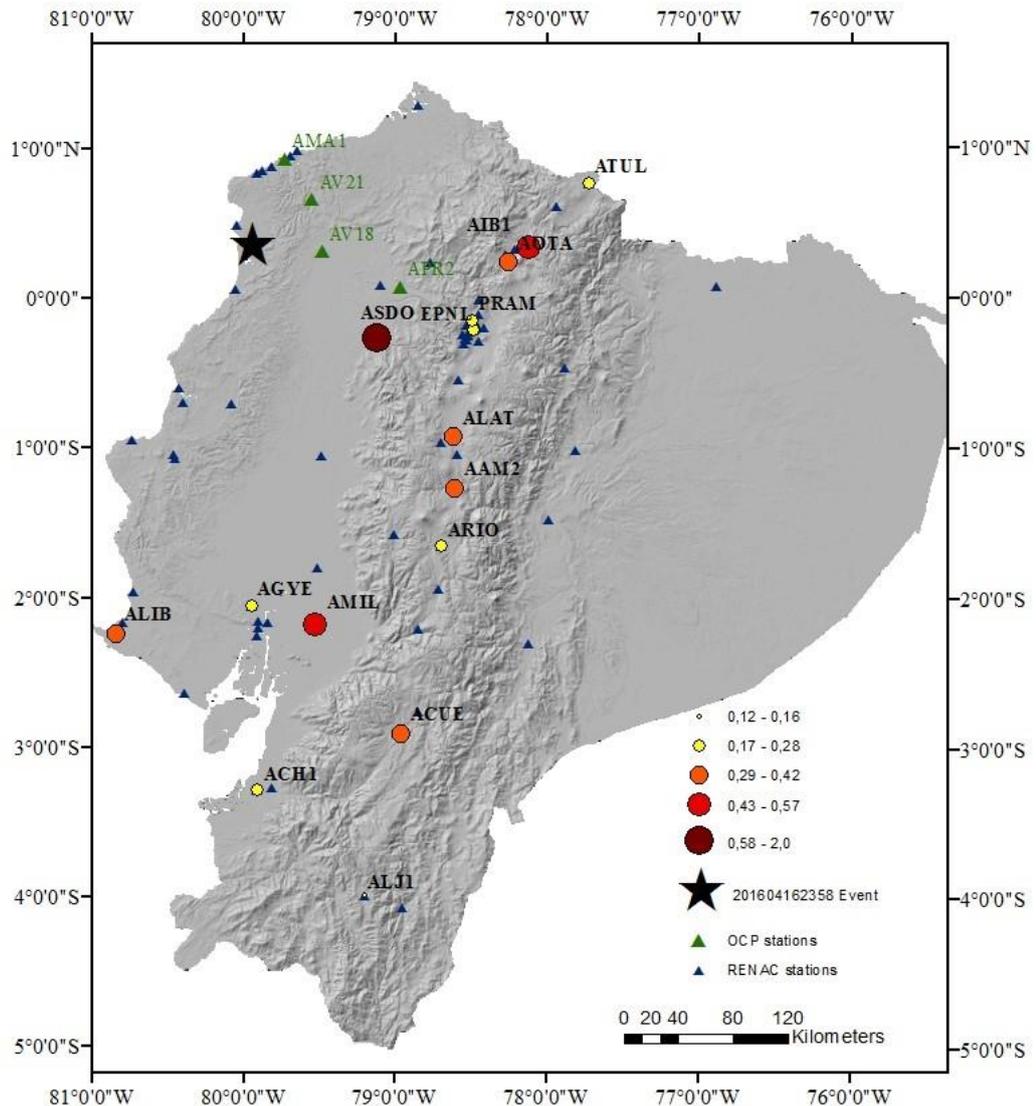
En este capítulo se describirán los 2 análisis realizados en el presente trabajo. El primer análisis fue realizado utilizando estaciones acelerográficas distribuidas en varias partes de Ecuador y que registraron el sismo del 2016 en Pedernales. Se busca describir el comportamiento del Espectro de Fourier influenciado por el ángulo de orientación del sensor.

Para el segundo análisis se utilizaron registros de diferentes eventos sísmicos, con el objetivo de comparar los resultados de una misma estación acelerográfica. Se estudiará si se mantienen las frecuencias del Espectro de Fourier para diferentes eventos, dado que las condiciones del suelo no han variado.

4.1. Estudio para registros sísmicos de Sismo de Pedernales

4.1.1 Red de acelerógrafos en Ecuador

Los registros sísmicos utilizados en este trabajo se obtuvieron de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). La distribución de las 29 estaciones que registraron el sismo del 16 de abril del 2016 se muestra en la Ilustración 6.



*Ilustración 6: Distribución de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador.
Fuente: (Instituto Geofísico - EPN, 2016)*

4.1.2. Registros sísmicos

Las estaciones acelerográficas miden 3 componentes del movimiento: 2 horizontales Este-Oeste y Norte-Sur, y una vertical. En este trabajo fueron utilizados los registros sísmicos de las componentes horizontales, los cuales se comprobaron que estén corregidos. Mediante la gráfica Historia-Tiempo de desplazamiento, mostrada en la Ilustración 7, se verifica la corrección por línea base. Si al final del gráfico, los valores llegan a 0, efectivamente se ha realizado la corrección.

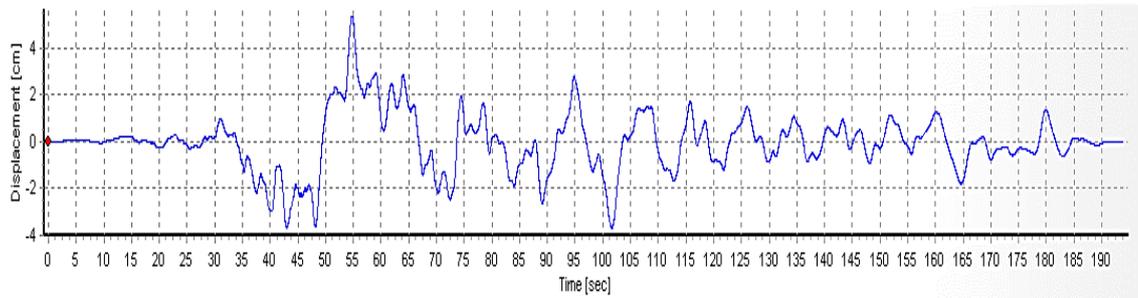


Ilustración 7: Gráfica Historia-Tiempo de desplazamiento de un registro de la red RENAC

4.1.3. Rotación de registros

Se utilizó la ecuación mostrada en la Ilustración 8, descrita por (Boore, Watson-Lamprey, & Abrahamson, 2006), el cual propone un método de combinación de las componentes horizontales independiente de la posición del acelerógrafo. Sugiere rotar las componentes de 0° a 90° y luego obtener el espectro de respuesta de cada uno de los registros rotados.

$$\begin{aligned}
 Osc_1(t, \theta) &= Osc_1(t, 0) \times \cos(\theta) \\
 &\quad + Osc_2(t, 0) \times \sin(\theta) \\
 Osc_2(t, \theta) &= -Osc_1(t, 0) \times \sin(\theta) \\
 &\quad + Osc_2(t, 0) \times \cos(\theta),
 \end{aligned}$$

Ilustración 8: Ecuaciones de las combinaciones lineales utilizadas en (Boore, Watson-Lamprey, & Abrahamson, 2006) Pg.1505

Con el objetivo de analizar como varían los resultados para cada ángulo de rotación, se rotó la componente EO desde 0° hasta 180°, cabe recalcar que al rotar dicha componente a 90° esta se convertirá en su componente ortogonal, NS.

4.1.4. Espectro de Fourier

Al realizar el espectro de Fourier a un acelerograma, la amplitud graficada es la aceleración máxima de cada una de las ondas sinusoidales que forman una señal compleja, dividida para su correspondiente frecuencia. Los acelerogramas utilizados en el presente trabajo tienen unidades de $\frac{cm}{s^2}$; por lo

tanto, la Magnitud de Fourier toma unidades de $\frac{cm}{s^2} / Hz = cm/s$.

Se revisaron los Espectros de Fourier para cada ángulo de rotación y se identificaron los picos; es decir, el punto donde la magnitud es máxima y, el cual señala la frecuencia dominante. De esta manera, se observó con mayor claridad si los picos cambian de ubicación y en qué frecuencias ocurren o si estos se mantienen para un mismo valor de frecuencia durante toda la rotación.

4.1.5. Clasificación de Estaciones Acelerográficas

Una vez identificados los valores de frecuencia, se calcularon los periodos, con el objetivo de comprobar si las variaciones de frecuencias son representativas o, a pesar de que existan picos en diferentes ubicaciones, el periodo se mantiene en un rango muy cercano.

Luego de realizar el análisis de resultados de las 29 estaciones acelerográficas estudiadas, se clasificarán dichas estaciones de acuerdo a tres categorías:

1. Periodo Fundamental evidente: estaciones donde sea notoria la formación de un pico en un solo valor de frecuencia durante toda la rotación, o, aunque los picos cambien de ubicación, las frecuencias señaladas son muy cercanas y el periodo calculado se mantiene en un rango muy similar.
 - Caso A: se forma un pico durante toda la rotación, aunque este cambie de magnitud, el valor indicado de frecuencia es siempre el mismo. Como se indica en la Ilustración 9, el pico varía en magnitud, pero se mantiene en una frecuencia de 2Hz.

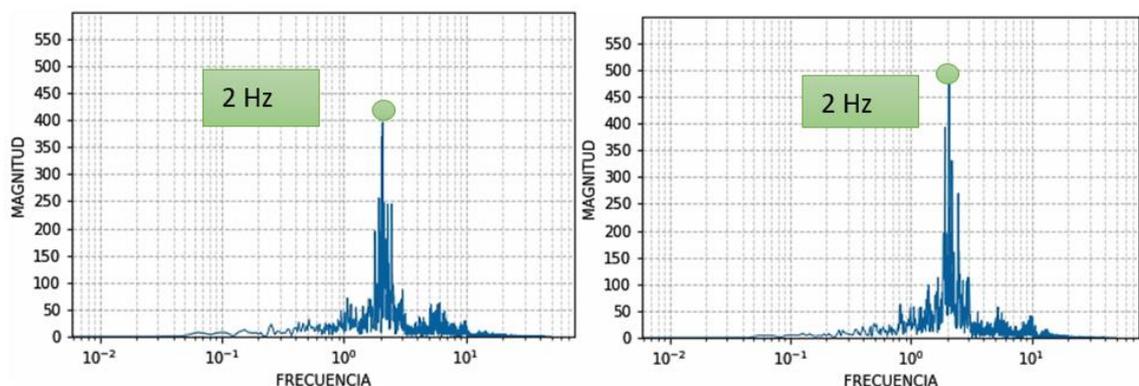


Ilustración 9: Ejemplo de categoría: Periodo fundamental evidente. Caso A

- Caso B: durante la rotación se forman varios picos, pero indican un rango de frecuencias muy cercano. Como se observa en Ilustración 10, sucede un pico en 0.86 Hz y luego uno diferente se forma en 1 Hz.

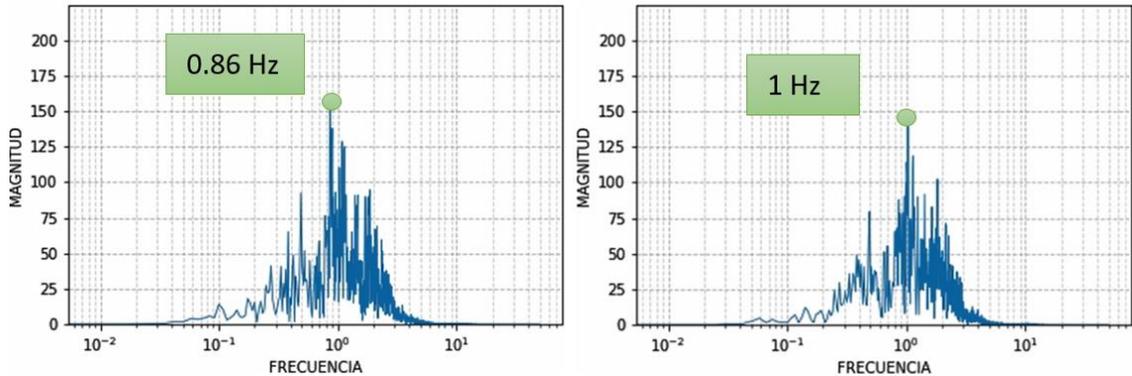


Ilustración 10: Ejemplo de categoría: Periodo fundamental evidente. Caso B

2. Dos Periodos importantes: registros en los que se evidencien 2 picos principales, para ciertos ángulos se observa un pico en un valor de frecuencia, pero al continuar la rotación, dicho pico desaparece y se forma otro pico en una frecuencia muy diferente. Por lo tanto, se obtienen 2 valores de frecuencias y 2 periodos.

En la Ilustración 11 se encuentra un ejemplo: en la figura a la izquierda se forma un pico en 0.7 Hz para ciertos ángulos, para el resto de la rotación dicho pico ha desaparecido (figura a la derecha) y se observa un pico formado en 1.3 Hz. Ambos picos son importantes, pero indican frecuencias muy diferentes.

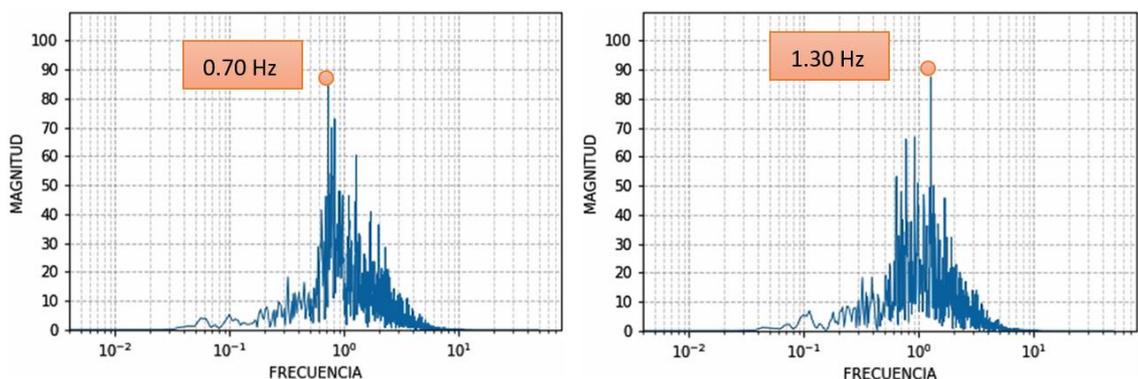


Ilustración 11: Ejemplo de categoría: 2 Periodos Importantes

3. Periodos diferentes: registros en los cuales al rotar desde 0° hasta 180° , los picos cambian de ubicación, se identifican al menos 3 frecuencias y los periodos calculados son de considerable diferencia. También se encuentran en esta categoría las estaciones donde no es posible distinguir un pico predominante, dado que varios de ellos se asemejan en magnitud.
- Caso A: en la Ilustración 12 se evidencia la formación de 3 picos en frecuencias diferentes y lejanas.

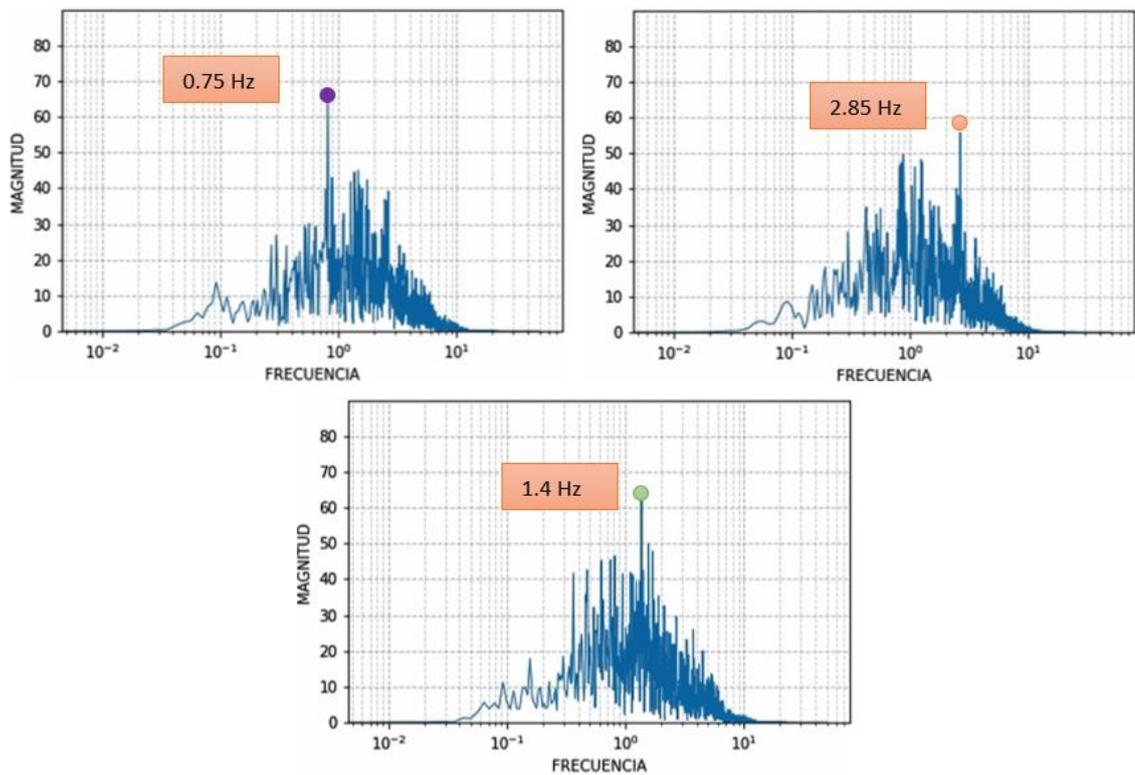


Ilustración 12: Ejemplo de categoría: Periodos diferentes. Caso A

- Caso B: en la Ilustración 13 se observa el caso donde no es posible determinar una frecuencia predominante, dado que los picos formados son similares en magnitud y no hay ningún pico que sobresalga en comparación con los otros.

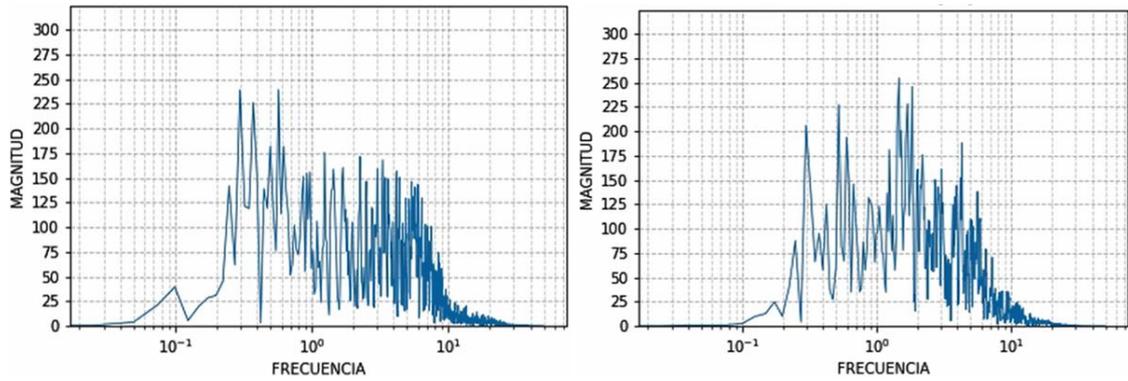


Ilustración 13: Ejemplo de categoría: Periodos diferentes. Caso B

Al realizar la clasificación de los registros, se busca encontrar un parámetro característico para cada categoría. La distancia a la que se encuentra la estación acelerográfica con respecto al epicentro del sismo podría influenciar en el comportamiento del Espectro de Fourier, así como el Peak Ground Acceleration (PGA).

Las distancias a la falla y el PGA fueron obtenidos del Informe Sísmico del Instituto Geofísico de La Escuela Politécnica Nacional. (Singaucho, Laurendeau, Viracucha, & Ruiz, 2016) reportaron los datos de las estaciones que registraron el sismo del 16 de abril, tales como: latitud, longitud, altitud, PGA y la distancia a la falla.

4.2. Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos

4.2.1. Estaciones en Guayaquil

Las estaciones utilizadas forman parte del Centro de Monitoreo Sísmico (CEMSIS), ubicado en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG), una red de 7 acelerógrafos distribuidos en diferentes partes de Guayaquil.

En la Ilustración 14 se indica la ubicación de las 2 estaciones utilizadas: CICG ubicada en el Colegio de Ingenieros Civiles de Guayaquil y UCSG, situada en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

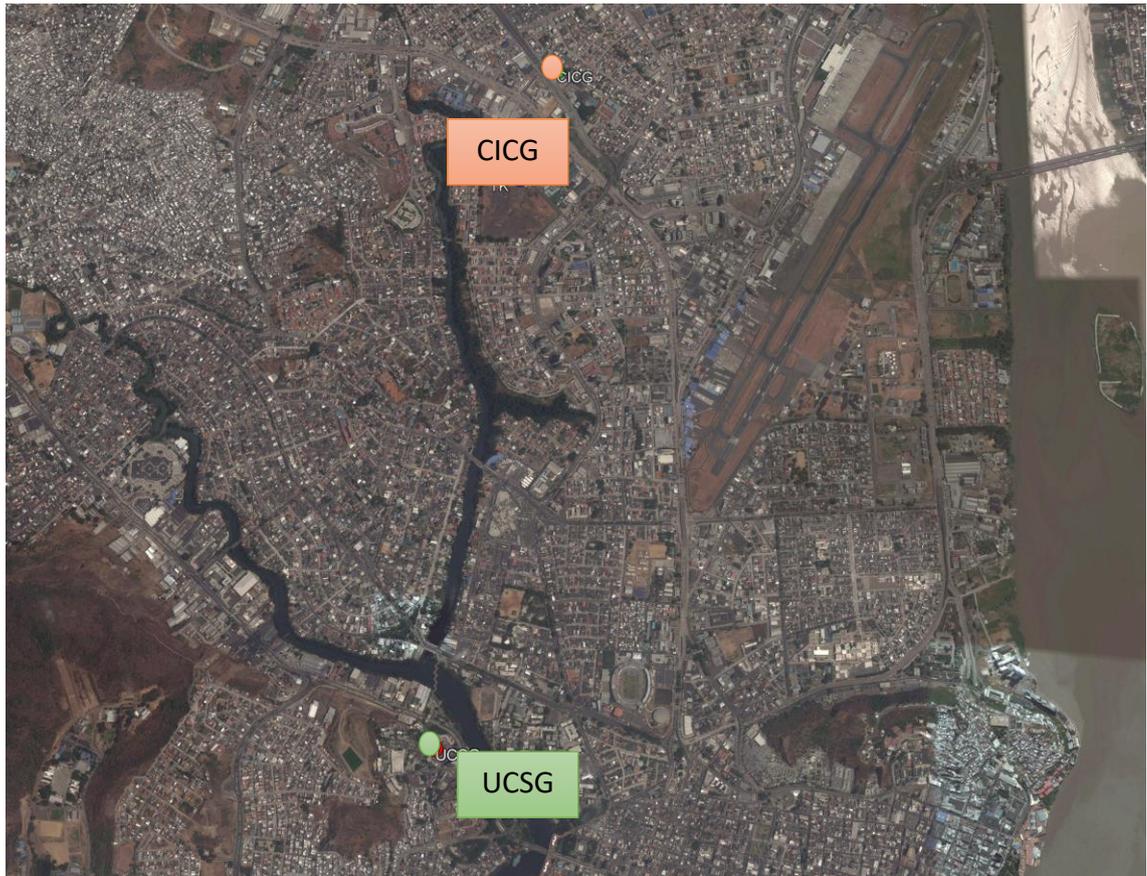


Ilustración 14: Estaciones UCSG y CICG

4.2.2. Registros sísmicos

Se obtuvieron los registros de 3 sismos sucedidos en Ecuador:

- Pedernales, 16 de abril del 2016: magnitud de 7.8 Mw y 20 Km de profundidad.
- Bahía de Caráquez, 03 de diciembre del 2017: magnitud de 6.1 Mw y 17 Km de profundidad.
- Guayaquil, 17 de noviembre del 2017: a 20.55 km del cantón Balao, con magnitud de 6.2 Mw y 8.5 km de profundidad.

Así como en el estudio anterior (Sección 4.1.2), se comprobó que los registros utilizados estén corregidos, realizando la gráfica Historia-Tiempo de desplazamientos.

4.2.3. Rotación de registros

Los registros fueron rotados desde 0° hasta 180° , utilizando la ecuación descrita en la Sección 4.1.3, para el estudio de los registros sísmicos del sismo de Pedernales.

4.2.4. Espectros de Fourier

Se obtuvieron los Espectros de Fourier para cada ángulo de rotación, desde 0° hasta 180°. Se identificaron los picos; es decir, el punto donde la magnitud es máxima y, el cual señala la frecuencia dominante. Se registraron las frecuencias marcadas durante la rotación, para luego calcular el periodo correspondiente.

4.2.5 Comparación de resultados

En la Tabla 2 se indica cómo se organizaron los resultados para cada estación. Se comparan los resultados de 2 eventos sísmicos registrados en una estación acelerográfica, para analizar si se mantienen los periodos para diferentes eventos, dado que las condiciones del suelo no han variado se debería mantener el valor correspondiente al periodo fundamental del suelo.

Tabla 2: Registros sísmicos en estaciones CEMISIS

ESTACION	SISMO		
UCSG	PEDERNALES, 2016	BAHIA DE CARAQUEZ, 2017	
CICG		BAHIA DE CARAQUEZ, 2017	GUAYAQUIL, 2017

Para la estación UCSG se van a comparar los periodos obtenidos con los sismos de Pedernales, 2016 y Bahía de Caráquez, 2017. Para la estación CICG, se utilizarán los registros de Bahía de Caráquez, 2017 y del sismo Guayaquil, 2017.

CAPÍTULO 5

5. Resultados y Análisis

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos en los 2 estudios propuestos. Cada registro fue rotado desde 0° hasta 180° , se obtuvo el espectro de Fourier para cada ángulo y se observó secuencialmente mediante un video. Los videos para cada una de las estaciones estudiadas quedarán registrados en la memoria adjunta al presente trabajo de titulación, en formato CD.

Para que el lector pueda conocer el comportamiento de los registros sísmicos, se mostrarán las imágenes que se consideren relevantes y que testifiquen la variación del Espectro de Fourier durante la rotación.

5.1. Estudio para registros sísmicos del sismo de Pedernales

Se analizan los resultados obtenidos de las estaciones acelerográficas distribuidas en diversas partes de Ecuador.

5.1.1. Red de acelerógrafos en Ecuador

Se mostrarán las imágenes que evidencien el comportamiento de los registros sísmicos y se explicarán sus características principales.

- Estación AGYE

En la Figura 15.a; es decir, la componente Este-Oeste, el punto más alto indica una frecuencia de 2.33 Hz, no obstante, ese pico no es predominante ya que varios picos son similares en magnitud. Uno de esos picos, ubicado en 1.27 Hz, se convierte rápidamente en el máximo (Figura 15.b) y continúa creciendo, hasta distinguirse claramente del resto (Figura 15.c). En la Figura 15.d y 15.e, va disminuyendo y un pico se va formando en una frecuencia muy cercana, dicho pico se convierte en el máximo en 1.87 Hz (Figura 15.f). A los 115° se observan 3 picos entre frecuencias de 1.27 Hz a 1.87 Hz, dichos picos se reducen y se forma otro más grande en la frecuencia inicial de 2.33 Hz (Figuras 15.h y 15.i).

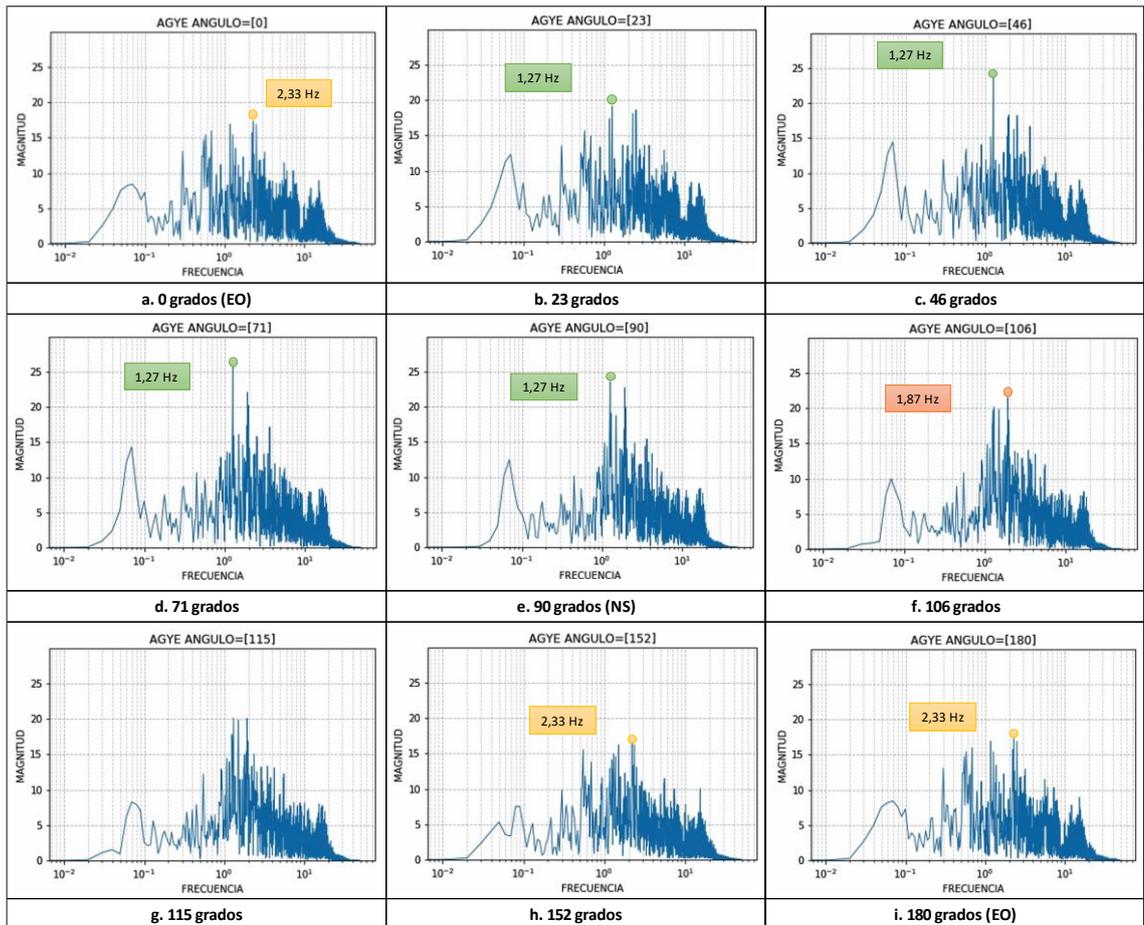


Ilustración 15: Rotación 0° - 180° estación AGYE

Aunque se formen picos mayores en magnitud, es importante reconocer que los picos formados entre un rango de frecuencias de 1.27 Hz – 1.87 Hz no desaparecen durante la rotación. Para algunos ángulos se destacan claramente, para otros, aunque disminuyan en magnitud siguen cercanos al pico máximo.

La componente Norte-Sur señalaba una frecuencia de 1.27 Hz y Este-Oeste, 2.33 Hz. Pero durante la rotación se identificó que el pico en 2.33 Hz no era representativo, y los picos importantes se mantienen en un rango cercano de 1.27 Hz – 1.87 Hz. Por lo tanto, se logró determinar un rango de periodos similares.

- Estación ATUL

En esta estación se distinguen 2 picos importantes, los cuales se han marcado en color amarillo y verde. Al iniciar la rotación (Figura 16.a), la frecuencia señalada es 0.73 Hz, el pico en amarillo va disminuyendo (Figura 16.b), a los

57° es superado por un pico (marcado en color verde) en la frecuencia 1.28 Hz (Figura 16.c). Dicho pico crece en la Figura 16.d y en la componente NS empieza a disminuir en magnitud (Figura 16.e). A los 118° vuelve a crecer un pico en 0.73 Hz (Figura 16.f), este continúa creciendo en las Figuras 16.g y 16.h y el pico en verde disminuye, hasta volver a la componente EO en donde el pico en amarillo es predominante y el pico en verde ya no es visible (Figura 16.i).

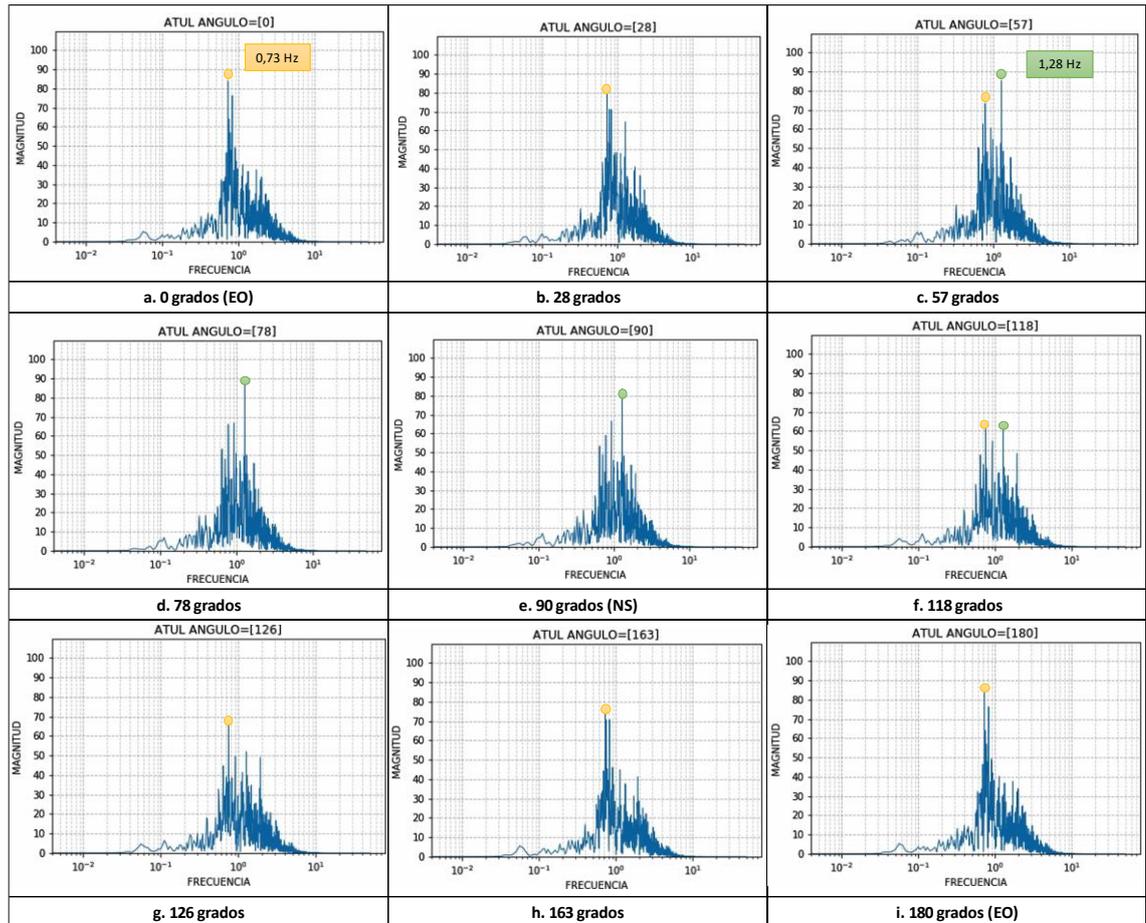


Ilustración 16: Rotación 0° - 180° estación ATUL

Se reconocen 2 frecuencias importantes, para ciertos ángulos domina un pico y para otros, se forma un pico en un valor diferente de frecuencia.

- Estación EPNL

Para esta estación no es posible determinar un rango de frecuencias importantes, ya que los valores donde se forman los picos son muy variados. Inicialmente la frecuencia es de 0.82 Hz (Figura 17.a), este pico disminuye y el valor máximo está en 2.70 Hz, como se observa en el ángulo 21° (Figura

17.b). En la Figura 17.c el pico más alto está en 2.7 Hz, pero se observa un pico en 1.25 Hz que va creciendo, hasta el ángulo 68° (Figura 17.d). A los 90°, se forma un pico en una frecuencia muy cercana: 1.35 Hz (Figura 17.e), el cual se mantiene a los 102° (Figura 17.f) y disminuye a los 121° (Figura 17.g), hasta volver a la frecuencia inicial de 0.82 Hz en la componente EO (Figura 17.h y 17.i).

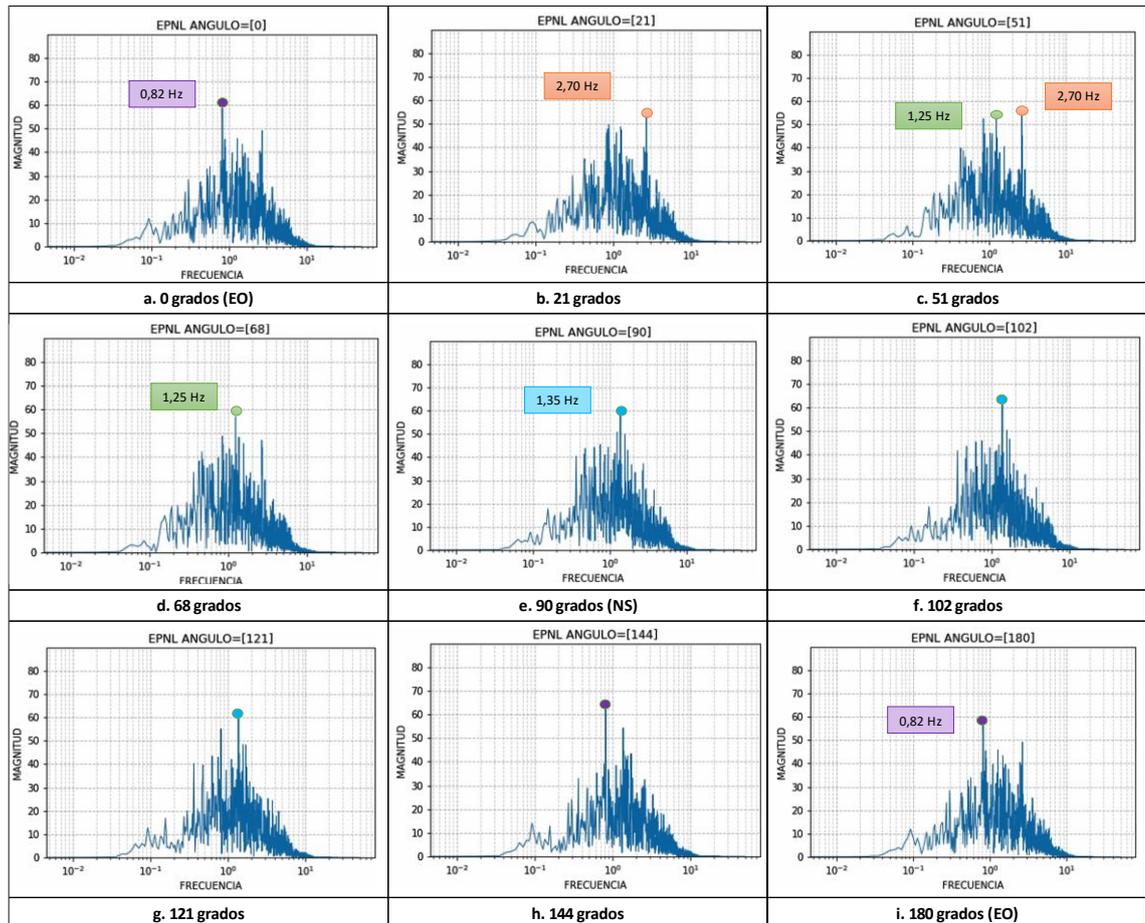


Ilustración 17: Rotación 0° - 180° estación EPNL

Durante la rotación, el pico más alto toma lugar en 4 valores diferentes de frecuencias: 0.82 Hz, 2.70 Hz y en un rango de 1.25 Hz – 1.35 Hz.

Se mostraron los resultados de 3 estaciones sísmicas, el comportamiento del Espectro de Fourier fue diferente para cada estación. En el Anexo 1 se muestra cómo varía el Espectro de Fourier según el ángulo de orientación del sensor para las 26 estaciones restantes.

5.1.2. Clasificación de Estaciones Acelerográficas

En la sección anterior se realizó la descripción del comportamiento del Espectro de Fourier durante la rotación. El análisis fue realizado en base a las frecuencias y para clasificar las estaciones, se calcularán los periodos, que es el inverso de la frecuencia.

En la Tabla 3 se indica el resumen de las frecuencias para cada estación y los periodos correspondientes.

Tabla 3: Resumen de Frecuencias y Periodos en estaciones RENAC

ESTACION	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
AAM2	0.42 - 0.49	2.04 - 2.38
	0.3	3.33
ACHN	0.68 - 0.74	1.35 - 1.47
ALAT	0.53	1.89
	0.74	1.35
	2.98	0.34
ALIB	0.48 - 0.52	1.92 - 2.08
	0.87	1.15
ALJ1	0.61 - 0.68	1.47 - 1.64
ALOR	0.41 - 0.45	2.22 - 2.44
	0.57	1.75
AMA1	1.72 - 2.1	0.48 - 0.6
AMIL	0.29	3.45
	0.92	1.09
AOTA	0.60 - 0.70	1.43 - 1.67
APED	1.60 - 2.00	0.50 - 0.63

ESTACION	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
APO1	2.10 - 2.64	0.38 - 0.48
APR2	2.08	0.48
ASDO	1.98 - 2.05	0.49 - 0.51
ATUL	1.28	0.78
	0.73	1.37
ACUE	0.69 - 0.72	1.39 - 1.45
AES2	0.66 - 0.69	1.45 - 1.52
	0.48	2.08
AGY2	0.58 - 0.59	1.69 - 1.72
AGYE	1.27 - 1.87	0.53 - 0.79
AIB1	0.87 - 1.03	0.97 - 1.15
AIB2	1.14 - 1.25	0.80 - 0.88
AV11	2.81 - 3.35	0.30 - 0.36
AV18	1.75 - 2.03	0.49 - 0.57
AV21	2.42 - 3.36	0.30 - 0.41
EPNL	2.7	0.37
	1.25 - 1.35	0.74 - 0.80
	0.82	1.22
PDNS	1.23 - 1.78	0.56 - 0.81
APS4	2.30 - 2.52	0.40 - 0.43

ESTACION	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
ACH1	0.52	1.92
	0.60 - 0.67	1.49 - 1.67
AGY1	0.58 - 0.61	1.64 - 1.72
AMNT	0.29	3.45
	0.57	1.75
	1.55 - 1.8	0.56 - 0.65

En la Tabla 4 se presenta el resumen de los resultados, donde las estaciones han sido clasificadas en 3 categorías: Periodo Fundamental Evidente, Dos Periodos Importantes y Periodos Diferentes. Se incluye el PGA, la distancia a la falla y se indica el/los periodos en los cuales ocurren los picos predominantes.

CATEGORÍA
PERIODO FUNDAMENTAL EVIDENTE
DOS PERIODOS IMPORTANTES
PERIODOS DIFERENTES

Tabla 4: Clasificación de registros - RENAC

ESTACION	PGA (%g)	PERIODO (s)	DISTANCIA (KM)	CIUDAD
AV11	0.04	0.30 - 0.36	181	QUITO
AV21	0.16	0.30 - 0.41	54	ESMERALDAS
APO1	0.38	0.38 - 0.48	167	PORTOVIEJO
APS4	0.01	0.40 - 0.43	220	IBARRA

ESTACION	PGA (%g)	PERIODO (s)			DISTANCIA (KM)	CIUDAD
AMA1	0.41	0.45 - 0.6			67	ESMERALDAS
APR2	0.11	0.48			113	QUITO
ASDO	0.21	0.49 - 0.51			115	SANTO DOMINGO
AV18	0.15	0.49 - 0.57			52	ESMERALDAS
APED	1.41	0.50 - 0.63			36	PEDERNALES
AGYE	0.02	0.53 - 0.79			270	GUAYAQUIL
PDNS	1.03	0.56 - 0.81			29	PEDERNALES
AIB2	0.03	0.80 - 0.88			204	IBARRA
AIB1	0.06	0.97 - 1.15			202	IBARRA
ACHN	0.37	1.35 - 1.47			120	CHONE
ACUE	0.04	1.39 - 1.45			381	CUENCA
AOTA	0.04	1.43 - 1.67			188	OTAVALO
ALJ1	0.02	1.47 - 1.64			492	LOJA
AGY1	0.07	1.64 - 1.72			270	GUAYAQUIL
AGY2	0.10	1.69 - 1.72			270	GUAYAQUIL
ATUL	0.02	0.78	1.37		251	TULCAN
AMIL	0.05	1.09	3.45		288	MILAGRO
ALIB	0.04	1.15	1.92 - 2.08		308	LIBERTAD
ALOR	0.03	1.75	2.22 - 2.44		159	SAN LORENZO
AES2	0.15	1.45 - 1.52	2.08		76	ESMERALDAS
ACH1	0.03	1.49 - 1.67	1.92		407	MACHALA
AAM2	0.04	2.04 - 2.38	3.33		235	AMBATO
ALAT	0.03	0.34	1.35	1.89	206	LATACUNGA
AMNT	0.52	0.56 - 0.65	1.75	3.45	171	MANTA
EPNL	0.03	0.37	0.74 - 0.80	1.22	174	QUITO

En la Tabla 5 se muestran las categorías en orden a los valores de periodos.

Tabla 5: Registros ordenados según Periodo

ESTACION	PERIODO (s)			CIUDAD
AV11	0.30 - 0.36			QUITO
AV21	0.30 - 0.41			ESMERALDAS
ALAT	0.34	1.35	1.89	LATACUNGA
EPNL	0.37	0.74 - 0.80	1.22	QUITO
APO1	0.38 - 0.48			PORTOVIEJO
APS4	0.40 - 0.43			IBARRA
AMA1	0.45 - 0.6			ESMERALDAS
APR2	0.48			QUITO
ASDO	0.49 - 0.51			SANTO DOMINGO
AV18	0.49 - 0.57			ESMERALDAS
APED	0.50 - 0.63			PEDERNALES
AGYE	0.53 - 0.79			GUAYAQUIL
AMNT	0.56 - 0.65	1.75	3.45	MANTA
PDNS	0.56 - 0.81			PEDERNALES
ATUL	0.78	1.37		TULCAN
AIB2	0.80 - 0.88			IBARRA
AIB1	0.97 - 1.15			IBARRA
AMIL	1.09	3.45		MILAGRO
ALIB	1.15	1.92 - 2.08		LIBERTAD
ACHN	1.35 - 1.47			CHONE
ACUE	1.39 - 1.45			CUENCA
AOTA	1.43 - 1.67			OTAVALO
AES2	1.45 - 1.52	2.08		ESMERALDAS
ALJ1	1.47 - 1.64			LOJA

ESTACION	PERIODO (s)		CIUDAD
ACH1	1.49 - 1.67	1.92	MACHALA
AGY1	1.64 - 1.72		GUAYAQUIL
AGY2	1.69 - 1.72		GUAYAQUIL
ALOR	1.75	2.22 - 2.44	SAN LORENZO
AAM2	2.04 - 2.38	3.33	AMBATO

Se buscó relacionar cada categoría en base a un rango de periodos característico. Esto no fue posible dado que en cada categoría existe gran variación de periodos. Las estaciones correspondientes a Periodo fundamental evidente tienen periodos desde 0.30 s y 1.72 s. La clasificación de Dos periodos importantes tiene periodos más altos que el grupo anterior, pero las respuestas varían entre 0.78 s y 3.33 s. Los registros de Periodos diferentes, tiene periodos desde 0.34 s hasta 3.45 s.

En la Tabla 6 se muestran las categorías en orden a los valores de PGA.

Tabla 6: Categorías ordenadas según valores de PGA

ESTACION	PGA (%g)	CIUDAD
APS4	0.01	IBARRA
ALJ1	0.02	LOJA
ATUL	0.02	TULCAN
AGYE	0.02	GUAYAQUIL
ACH1	0.03	MACHALA
ALOR	0.03	SAN LORENZO
EPNL	0.03	QUITO
ALAT	0.03	LATACUNGA
AIB2	0.03	IBARRA
AAM2	0.04	AMBATO

ESTACION	PGA (%g)	CIUDAD
JACUE	0.04	CUENCA
AV11	0.04	QUITO
ALIB	0.04	LIBERTAD
AOTA	0.04	OTAVALO
AMIL	0.05	MILAGRO
AIB1	0.06	IBARRA
AGY1	0.07	GUAYAQUIL
AGY2	0.10	GUAYAQUIL
APR2	0.11	QUITO
AV18	0.15	ESMERALDAS
AES2	0.15	ESMERALDAS
AV21	0.16	ESMERALDAS
ASDO	0.21	SANTO DOMINGO
ACHN	0.37	CHONE
APO1	0.38	PORTOVIEJO
AMA1	0.41	ESMERALDAS
AMNT	0.52	MANTA
PDNS	1.03	PEDERNALES
APED	1.41	PEDERNALES

Se buscó relacionar cada categoría en base a los valores de PGA. Esto no fue posible dado que en cada categoría existe gran variación. Las estaciones correspondientes a Periodo fundamental evidente tienen valores desde 0.01 hasta 1.41. La clasificación de Dos periodos importantes tiene valores 0.02 y 0.15. Los registros de Periodos diferentes, tienen PGA desde 0.03 hasta 0.52.

Al rotar desde 0° a 180° se puede observar cuáles son los picos representativos, los cuales pueden no ocurrir en una de las componentes

horizontales. Asumir que la frecuencia dominante del suelo es la indicada en el Espectro de Fourier de una de las componentes horizontales, podría representar errores, dado que los resultados pueden ser afectados por la señal y variar con el ángulo de orientación del sensor.

El valor de PGA, los periodos y la distancia a la falla no son indicadores de que la frecuencia fundamental se mantenga durante toda la rotación. Las 3 categorías establecidas arrojaron diferentes resultados y no se logró determinar un parámetro característico.

5.2. Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos

Se analizan y comparan los resultados de diferentes eventos sísmicos en una misma estación acelerográfica.

5.2.1. Estaciones en Guayaquil

Se mostrarán las imágenes que evidencien el comportamiento de los Espectros de Fourier y se registrarán las frecuencias indicadas. Para la estación UCSG se utilizan los registros del sismo de Pedernales, 2016 y el de Bahía de Caráquez, 2017. Para la estación CICG, del sismo de Guayaquil, 2017 y el de Bahía de Caráquez, 2017.

Estación UCSG

- Pedernales, 2016. $M_w = 6.8$

En la Ilustración 18 se observan los picos formados durante la rotación. Al rotar los registros, los picos cambian de posición, indicando diferentes valores de frecuencias. A los 0 grados la frecuencia es 2.32 Hz, a los 26° cambia a 2.51 Hz, desde los 41° el valor máximo se ubica en 1.27 Hz y se mantiene así para 70 y 90 grados, hasta los 101° donde indica 1.90 Hz y luego vuelve a formarse el pico inicial en la frecuencia de 2.32 Hz (Figuras 18.g, 18.h, 18.i).

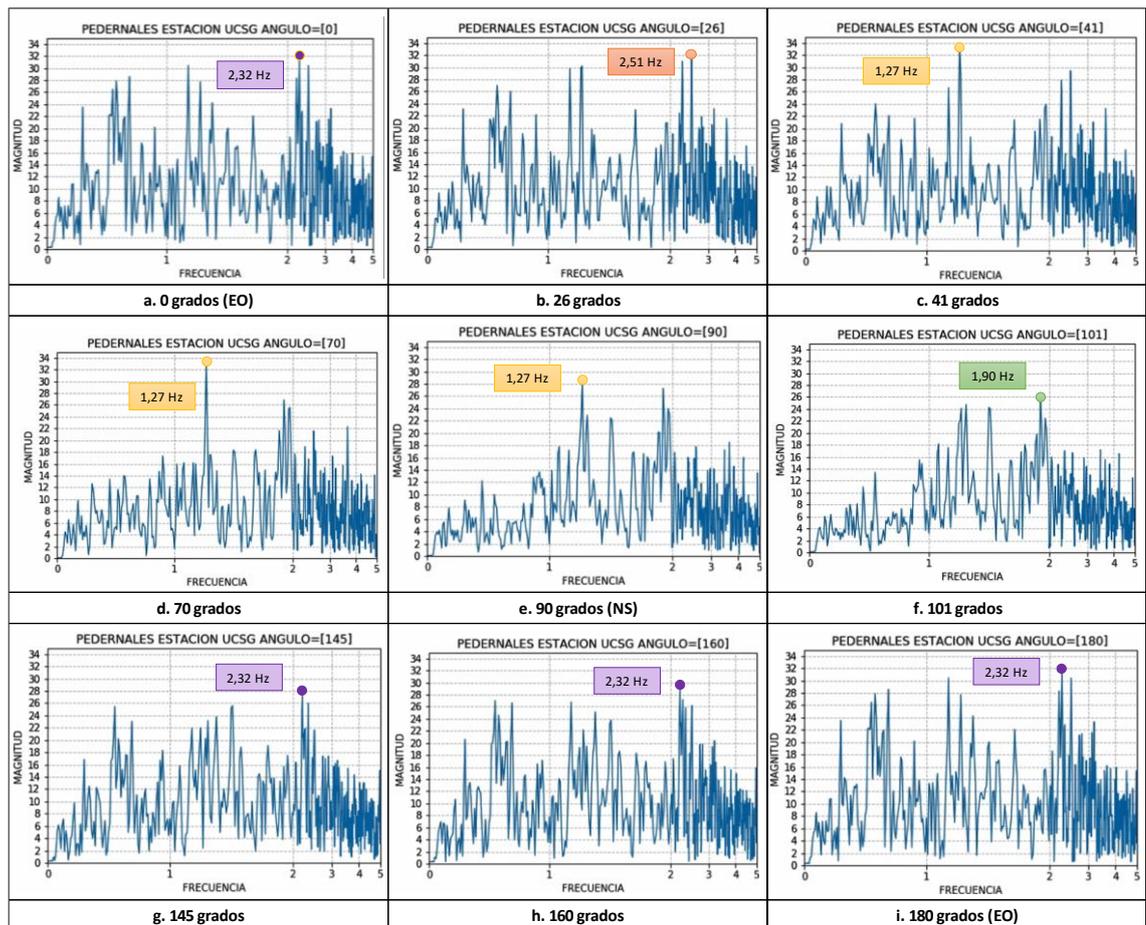


Ilustración 18: Rotación 0° - 180° estación Pedernales

Se registran 4 valores de frecuencias: 2.32 Hz, 2.51 Hz, 1.27 Hz y 1.90 Hz.

➤ Bahía de Caráquez, 2017: Mw = 6.1

Durante la rotación, se identifican 3 picos, los cuales han sido marcados en colores: verde, rojo y amarillo. A los 0° se observa un pico en 1.90 Hz (color verde), a los 14° es superado por uno muy cercano (color rojo) en 1.87 Hz. Este se mantiene en la Figura 19.c, en la Figura 19.d va disminuyendo en magnitud y a los 90° (componente EO), el pico más alto está en 1.52 Hz (color amarillo). No obstante, ese pico no es predominante, no destaca en magnitud en comparación con los otros picos formados en ese ángulo, además es superado rápidamente (Figura 19.f), en donde la frecuencia vuelve a ser 1.87 Hz. Dicho valor se mantiene en las Figuras 19.g y 19.h, hasta regresar a la componente EO (180 grados) donde la frecuencia es 1.90 Hz.

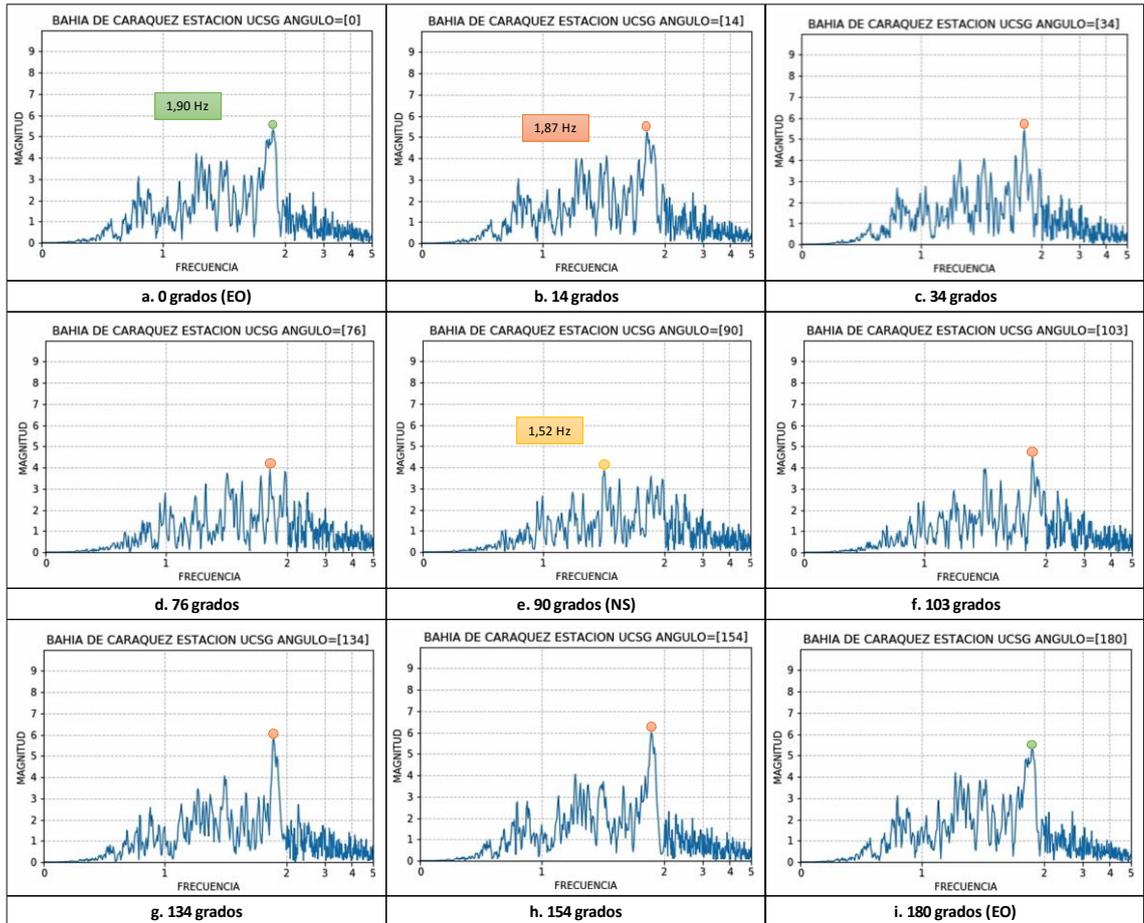


Ilustración 19: Rotación 0° - 180° estación Bahía de Caráquez

Al analizar los resultados para diferentes ángulos, se puede observar que los picos predominantes suceden en frecuencias entre 1.90-1.87 Hz.

Se mostraron los Espectros de Fourier para la estación UCSG, identificando en que frecuencias ocurren los picos. Las gráficas para la estación CIGG se pueden encontrar en el Anexo 2.

5.2.2. Comparación de resultados

En la Tabla 7 se muestra el resumen de las frecuencias observadas y los periodos calculados para las 2 estaciones estudiadas.

Tabla 7: Resultados de Estaciones CEMESIS

		SISMO					
ESTACION	PEDERNALES, 2016		BAHIA DE CARAQUEZ, 2017		GUAYAQUIL, 2017		
	fr (Hz)	T (s)	fr (Hz)	T (s)	fr (Hz)	T (s)	
UCSG	2.51	0.40	1.87 - 1.90	0.53			
	2.32	0.43					
	1.90	0.53					
	1.27	0.79					
CICG			6.43 - 7.1	0.14 - 0.16	6.45 - 6.89	0.15 - 0.16	

En la estación UCSG, para el sismo de Pedernales se obtuvieron 4 valores de periodos: 0.40 s, 0.43 s, 0.53 s y 0.79 s y para el sismo de Bahía de Caráquez se registra un periodo de 0.53 s.

En la estación CICG, en el sismo de Bahía de Caráquez el periodo es 0.14 s – 0.16 s, y para el sismo Guayaquil, se obtuvo un rango muy similar: 0.15 s – 0.16 s.

Los resultados obtenidos al comparar los periodos de varios eventos sísmicos fueron muy similares. Si se tiene varias posibles respuestas se podría comparar los resultados con otros sismos y así, evidenciar cual es el periodo del suelo y que valores han sido influenciados por la señal. Al ser la misma estación, el periodo fundamental del suelo debe mantenerse.

CAPÍTULO 6

6. Resumen, conclusiones y recomendaciones:

6.1. Resumen

El espectro de Fourier es una herramienta muy utilizada para analizar el contenido de frecuencias de un registro sísmico y, en muchas ocasiones, estimar el periodo fundamental del suelo. Los análisis se hacen, generalmente, para las componentes horizontales tal como fueron grabadas por las estaciones sísmicas, siendo muy común utilizar solo una de ellas.

En estudios previos, donde se han calculado las frecuencias dominantes de las dos (2) componentes horizontales de un registro sísmico, se evidenció, en algunos casos, grandes diferencias entre las frecuencias dominantes de las componentes horizontales.

Si se asume que las propiedades dinámicas del suelo en un sitio específico son independientes de la dirección de análisis, y que las frecuencias dominantes de los registros se atribuyen a los periodos de vibración del suelo, se esperaría tener frecuencias dominantes del suelo similares para ambas componentes horizontales. Estas hipótesis se contraponen con los resultados de estudios anteriores.

Con la finalidad de analizar con mayor profundidad las frecuencias dominantes de los registros sísmicos, este trabajo plantea estudiar los Espectros de Fourier de registros sísmicos para varios ángulos de rotación y compararlos con los valores obtenidos para las componentes horizontales originales (Este-Oeste y Norte-Sur).

En el presente trabajo se realizaron 2 tipos de análisis:

El primer análisis fue realizado a los 29 pares de registros sísmicos (componentes horizontales) del Sismo de Pedernales utilizados por Suarez (2020).

Las frecuencias (o periodos) dominantes obtenidos mediante el análisis de varios ángulos de rotación fueron comparados con aquellos correspondientes

a las componentes horizontales originales (Norte-Sur y Este-Oeste) reportadas en Suarez (2020).

Se clasificaron los resultados en función de la facilidad en identificar las frecuencias dominantes para todas las rotaciones de cada estación y se relacionaron estas a otros parámetros como distancia a la falla de la estación, PGA de los registros sísmicos y “tipo de suelo” o periodo dominante de vibración.

Para el segundo análisis se estudiaron los registros sísmicos de dos (2) estaciones ubicadas en Guayaquil.

Para cada una de las estaciones se estudiaron registros sísmicos capturados en diferentes eventos sísmicos. A cada evento sísmico se obtuvieron las frecuencias (o periodos) dominantes mediante el análisis de varios ángulos de rotación

Se compararon los resultados obtenidos en cada estación para diferentes eventos con la finalidad de comprobar si los periodos fundamentales de vibración se mantenían iguales.

Este análisis partía de la hipótesis que el periodo fundamental de los registros podría ser atribuido al periodo fundamental del suelo, y que las propiedades dinámicas del suelo no variarían para cada evento.

- **6.2. Conclusiones**

- Utilizar una de las componentes horizontales originales para realizar el Espectro de Fourier y así, obtener la frecuencia dominante del suelo, no es recomendable, dado que los valores pueden ser diferentes entre componentes. Los resultados pueden ser afectados por la señal y no representar el periodo del suelo.
- En algunos casos, estudiar los resultados rotando los registros desde 0° a 180°, se puede identificar frecuencias dominantes que pueden no observarse en los espectros de Fourier de las componentes horizontales originales (Norte-Sur y Este-Oeste). Este es el caso de la estación AGYE, donde se obtuvo frecuencias dominantes de 1.27 Hz y

2.33 Hz para las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente (Suarez, 2020); en cambio, en el análisis para todos los ángulos, las frecuencias dominantes se mantenían en un rango cercano de 1.27 Hz – 1.87 Hz. Este análisis permitió identificar que las frecuencias de 2,33 Hz no eran representativas de toda la señal y por lo tanto no podía ser atribuida al periodo natural de vibración del suelo.

- No se encontró relación alguna entre los casos donde se obtuvo frecuencias dominantes independientes del ángulo de rotación de análisis y el valor del PGA de los registros o la distancia a la falla de la estación. Este análisis permite establecer que la facilidad para establecer el periodo de vibración del suelo mediante el análisis de las frecuencias dominantes de los registros sísmicos es independiente de la magnitud o aceleraciones del sismo.
- Los resultados obtenidos al comparar las frecuencias dominantes de los registros de una misma estación para diferentes eventos sísmicos fueron muy similares. Esto significa que las frecuencias dominantes se mantienen independientes de la magnitud del sismo, con lo cual podría atribuirse esta propiedad a las propiedades dinámicas del suelo.

6.3. Recomendaciones

- Realizar el análisis multidireccional del Espectro de Fourier, propuesto en este trabajo, en registros sísmicos en cuyas estaciones se hayan realizados estudios geofísicos para determinar los periodos naturales del suelo, y comparar sus resultados.
- Realizar el análisis multidireccional del Espectro de Fourier, propuesto en este trabajo, en registros de otros eventos sísmicos en las 29 estaciones consideradas en este trabajo y determinar si hay variaciones importantes en los valores de las frecuencias dominantes.
- En términos generales, se recomienda no usar las frecuencias dominantes de los registros sísmicos de las componentes horizontales originales como parámetros para establecer el periodo fundamental del suelo en una estación acelerográfica.
- En el caso de querer obtener el periodo dominante del suelo por medio del análisis de las frecuencias de un registro sísmico se recomienda

utilizar la metodología realizada en este trabajo para identificar frecuencias dominantes independientes del ángulo de análisis. Si los resultados no muestran frecuencias que sean evidentemente dominantes para todos los ángulos descartar los resultados obtenidos.

- Estudiar las frecuencias dominantes de diferentes direcciones de un registro sísmico utilizando otros métodos de análisis diferentes al Espectro de Fourier.

BIBLIOGRAFÍA

- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., & Abrahamson, N. A. (agosto de 2006). *Orientation-Independent Measures of Ground Motion*. Obtenido de Bulletin of the Seismological Society of America, 96(4 A), 1502–1511: <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Çavdar, Ö. (febrero de 2012). *Probabilistic sensitivity analysis of two suspension bridges in Istanbul, Turkey to near- and far-fault ground motion*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/258685094_Probabilistic_sensitivity_analysis_of_two_suspension_bridges_in_Istanbul_Turkey_to_near-_and_far-fault_ground_motion
- Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. En J. W. Cooley, & J. W. Tukey, *Mathematics of Computation* (págs. Vol. 19, No.4, pp. 297-301). JSTOR.
- Instituto Geofísico - EPN. (26 de junio de 2014). *Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC)*. Obtenido de Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/instrumentacion/tag/RENAC>
- Instituto Geofísico - EPN. (22 de abril de 2016). *Evaluación preliminar de los acelerógrafos disponibles del sismo del 16 abril de magnitud 7.8*. Obtenido de Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1323-informe-sismico-especial-n-17-2016>
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. En S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering* (pág. 528). New Jersey: Prentice Hall.
- Lay, T., & Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. California: Academic Press.
- Miriano, Cattoni, C. &, Tamagnini, E. &, & Claudio. (febrero de 2016). *Advanced numerical modeling of seismic response of a propped r.c. diaphragm wall*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/276846658_Advanced_numerical_modeling_of_seismic_response_of_a_propped_rc_diaphragm_wall
- Singaicho, J. C., Laurendeau, A., Viracucha, C., & Ruiz, M. (2016). *Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8. Intensidades y aceleraciones*. Quito: Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional.
- Suárez, M. (26 de febrero de 2020). *Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos:*

GMax, GM, GMRotDpp, GMRotlpp y SRSS. Obtenido de Repositorio Digital UCSG: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14419>

Suárez, M. (26 de febrero de 2020). *Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotlpp y SRSS*. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14419>

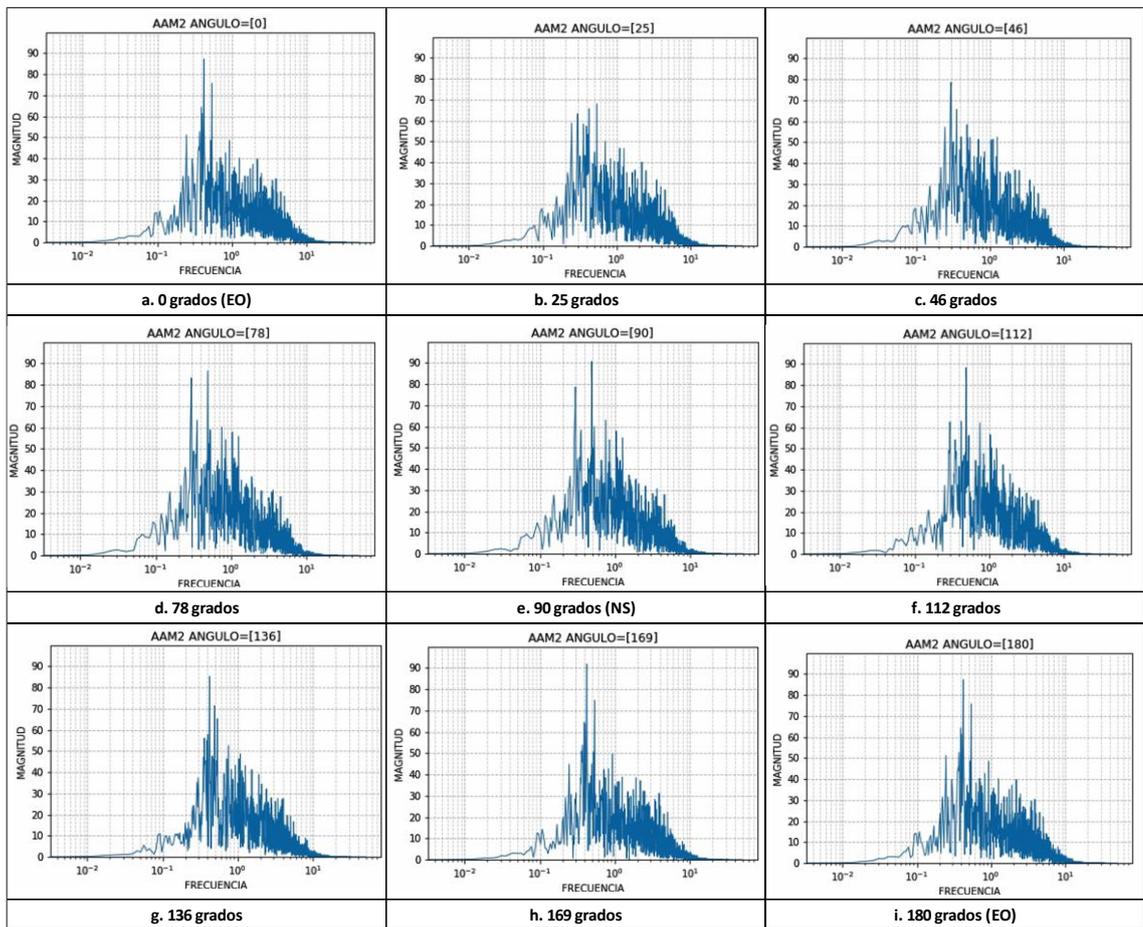
Teymur, B. (2000). *Analysis of Earthquake Motions Recorded During the Kocaeli Earthquake, Turkey 1999*. Obtenido de University of Cambridge : http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/publications/TR/TR312.pdf

7. ANEXOS

ANEXO 1: estudio para registros sísmicos del sismo de Pedernales

➤ Estación AAM2

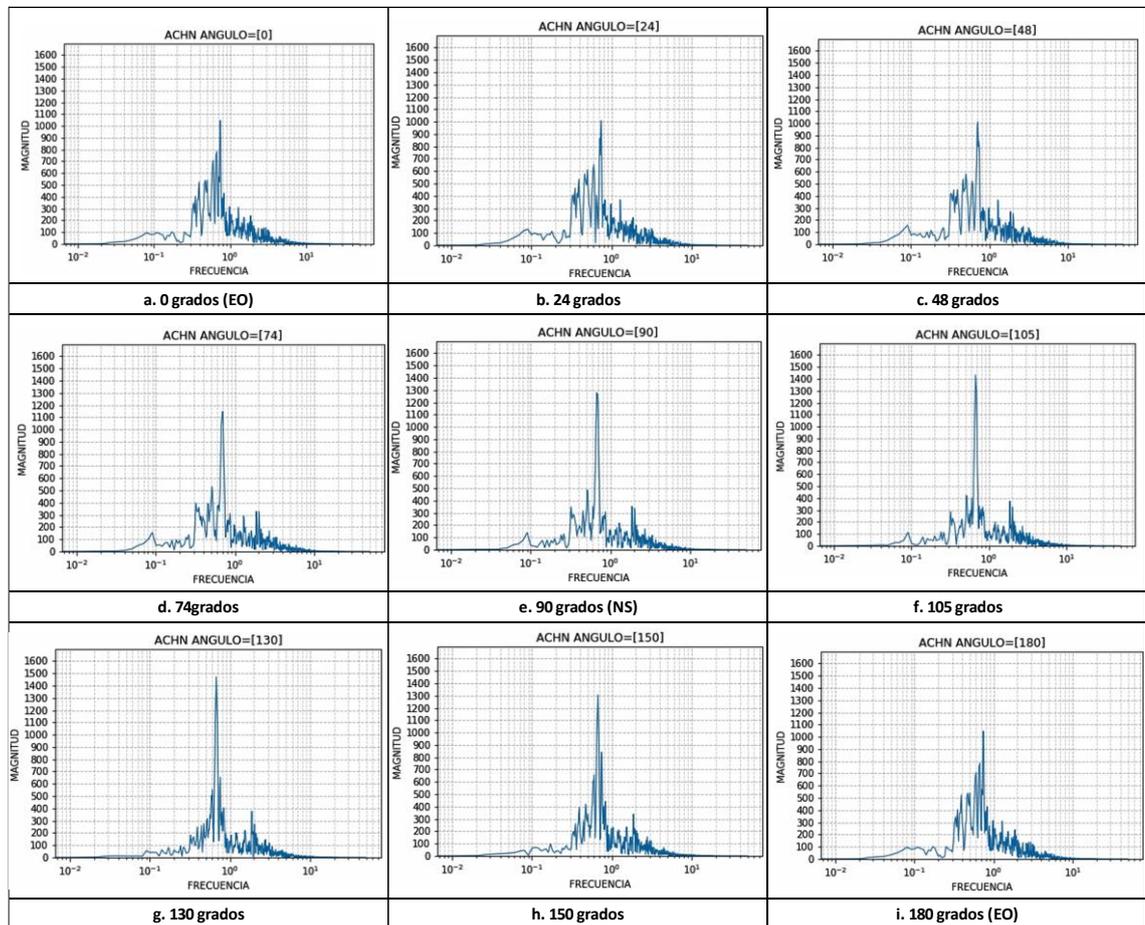
Como se observa a los 0°, la frecuencia inicial es marcada por un pico en 0.42 Hz. A los 25° va disminuyendo en magnitud y a los 46° se forma otro pico en 0.3 Hz. Este es superado a los 78° por un pico en 0.49 Hz y se mantiene siendo el máximo en la componente NS y a los 112°. El pico inicial se vuelve a formar a partir de 136° hasta 169° y 180° (EO). Es evidente la formación de un pico importante en un rango de frecuencias entre 0.42 Hz – 0.49 Hz y de otro en 0.30 Hz.



➤ Estación ACHN

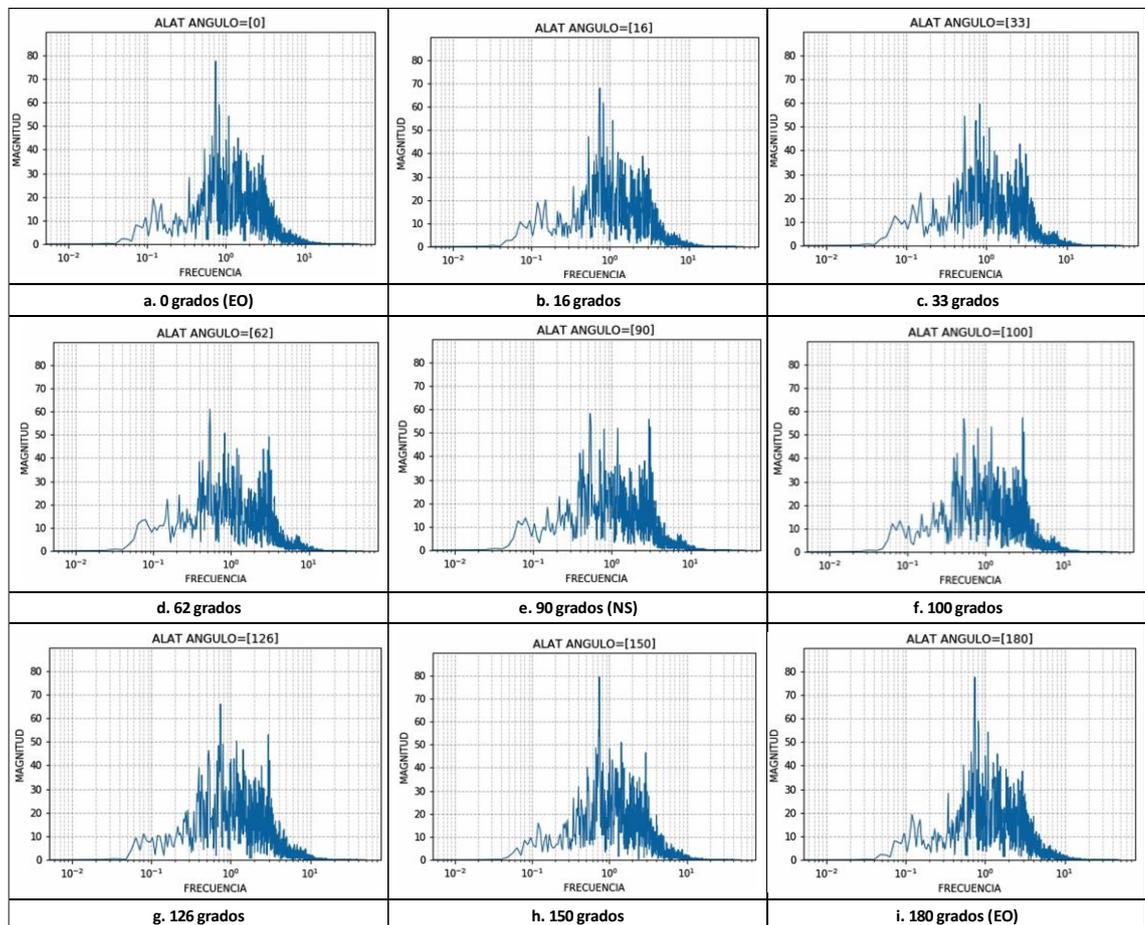
Al rotar desde 0° a 180°, se puede observar que se forma un pico principal para diferentes ángulos, este se traslada entre frecuencias de 0.68 Hz – 0.74 Hz.

A los 0° el pico se encuentra en 0.68 Hz pero desde los 24° se va formando un pico muy cercano, hasta superarlo en magnitud en 0.74 Hz (48 grados), dicho pico crece a los 74°, 90° (NS), 105° y 130°. A los 150° está disminuyendo hasta volver al pico inicial en 0.68 Hz (EO).



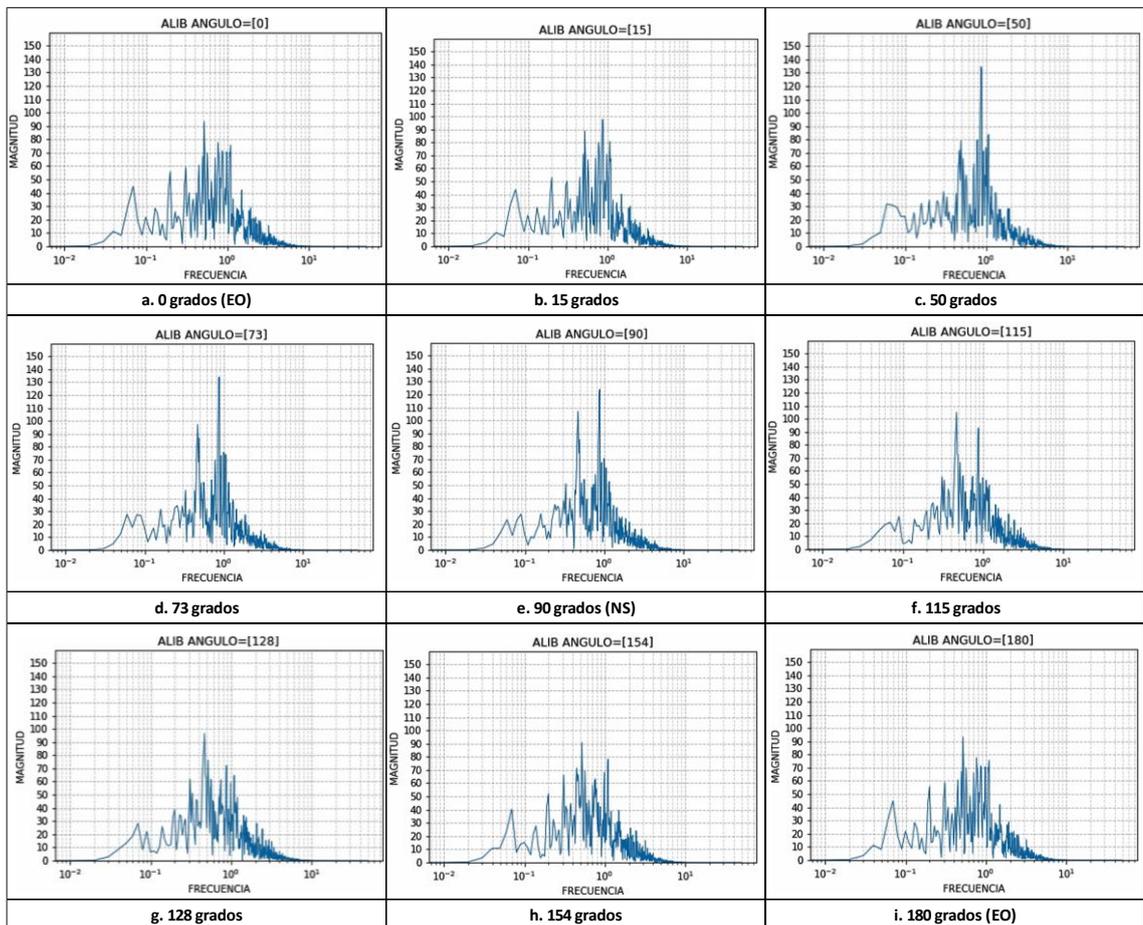
➤ Estación ALAT

En la estación ALAT, se forma un pico en 0.74 Hz en la componente EO. Luego este disminuye (16 grados) y a los 33° es superado por un pico ubicado en 0.80 Hz, pero disminuyen rápidamente y a los 62° se observa un pico en 0.53 Hz. Para la componente NS se forman varios picos de similar magnitud, pero en varias frecuencias, como 0.53 Hz y 2.98 Hz. A los 100° tampoco es posible distinguir un pico predominante. Desde los 126° se vuelve a formar el pico en 0.74 Hz hasta volver a la componente EO (180°).



➤ Estación ALIB

Los resultados indican 2 frecuencias importantes: a los 0° la frecuencia señalada es 0.52 Hz, pero ha disminuido a los 15° y otro pico es mayor y señala 0.87 Hz. Este pico es el máximo a los 50, 73, y 90 grados. Se observa que ha disminuido a los 115°, donde la frecuencia es 0.48 Hz, hasta los 154°. A partir de allí, se vuelve a formar un pico en 0.52 Hz (componente EO). Los picos dependen del ángulo de rotación, para ciertos ángulos se ubican en un rango de 0.48 Hz – 0.52 Hz y, para otros, en 0.87 Hz.

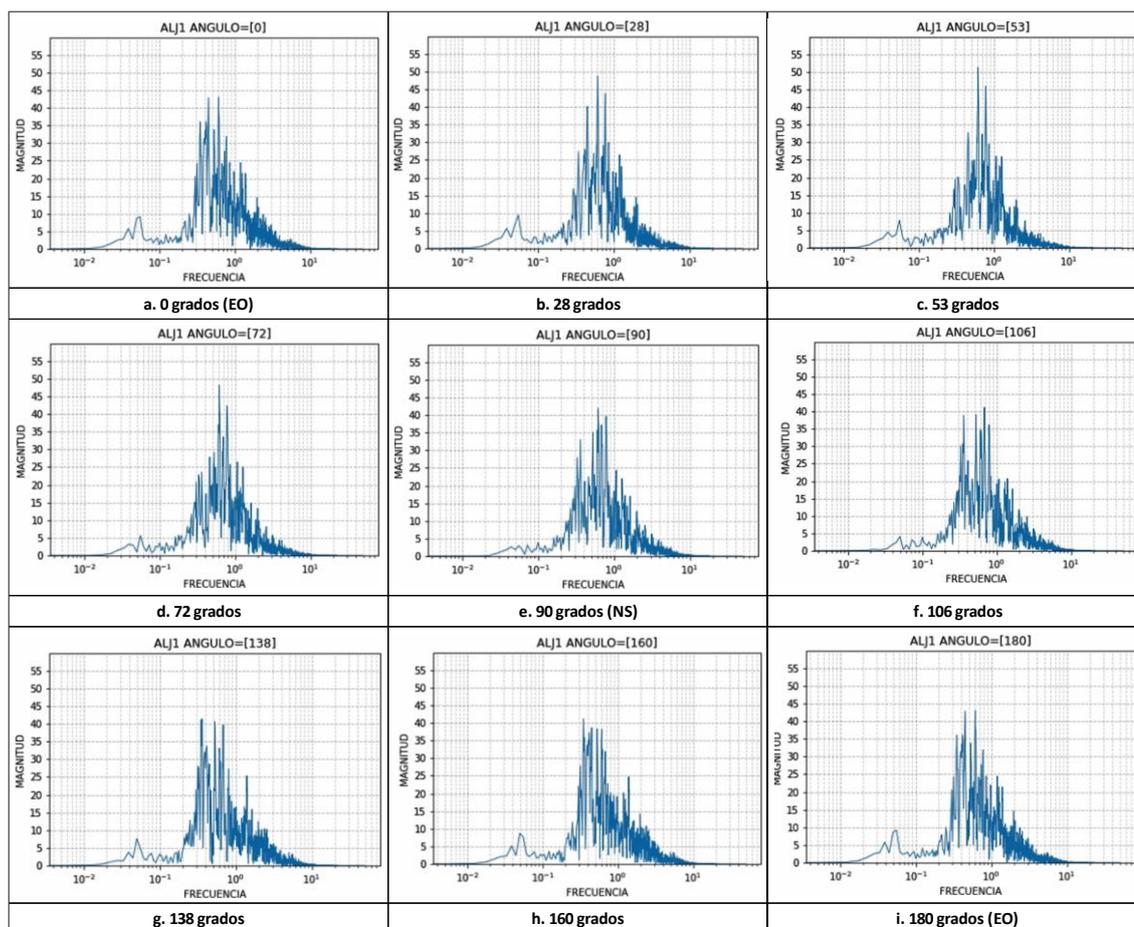


➤ Estación ALJ1

En la componente EO y a los 28° el pico se encuentra en 0.61 Hz, luego es superado por uno en 0.68 Hz (53°), que se mantiene a los 72° y en la componente NS.

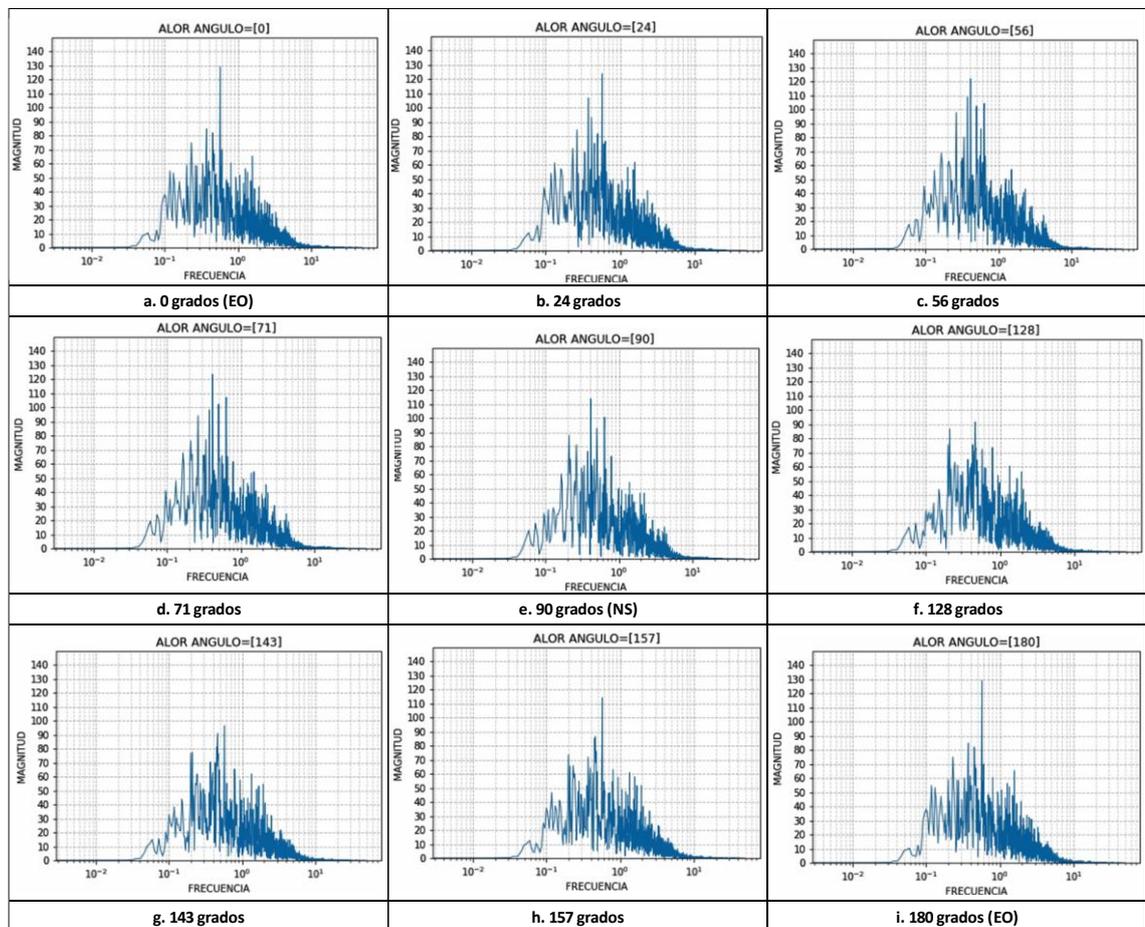
Para ciertos puntos, no se diferencia un punto predominante, como se observa a los 106°, 138° y 160°, donde la frecuencia es 0.35 Hz, pero existen picos parecidos en magnitud. En la componente EO (180°) el pico en 0.35 Hz ha disminuido, pero se mantienen los picos ubicados entre 0.61 Hz – 0.68 Hz.

El pico en 0.35 Hz no es predominante, no se destaca en magnitud con respecto a los otros valores y los picos entre 0.61 Hz – 0.68 Hz se mantienen durante toda la rotación.



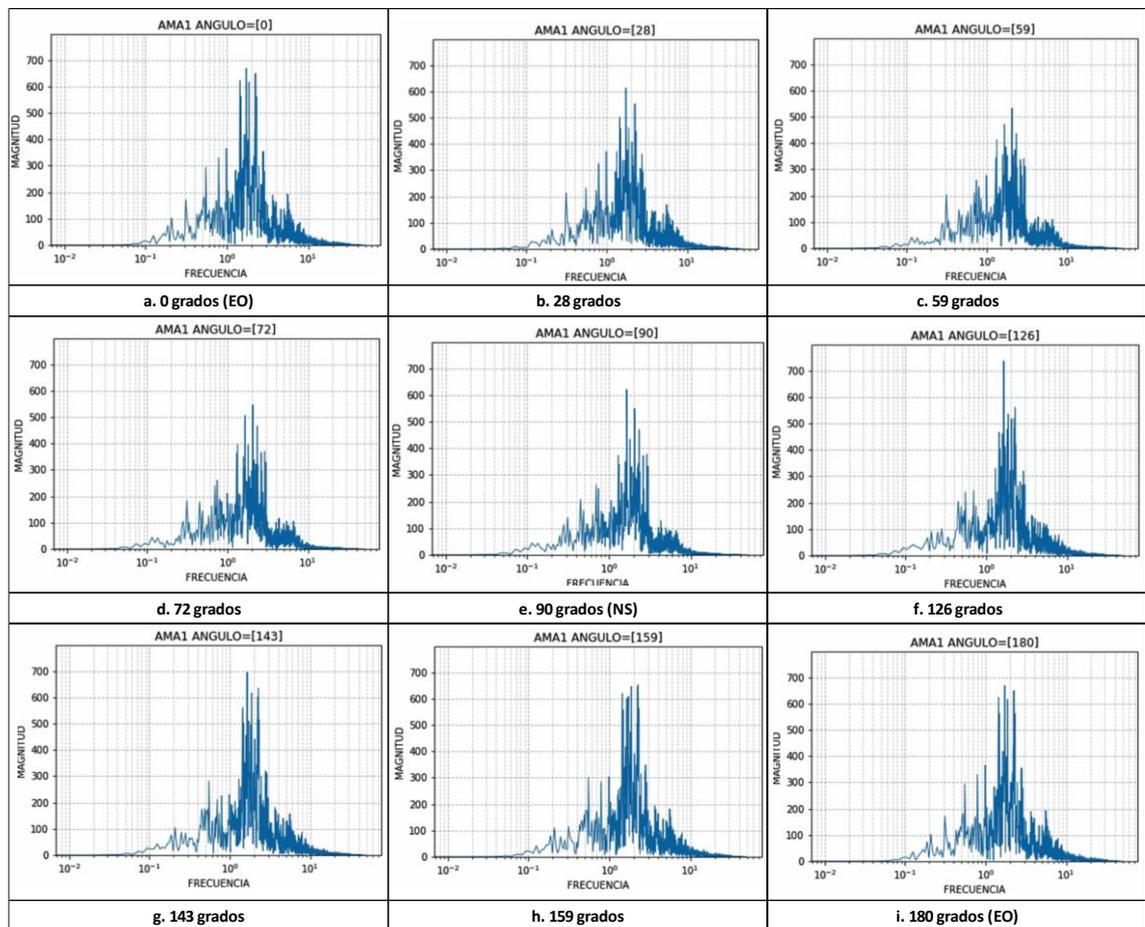
➤ Estación ALOR

Durante la rotación, los picos se ubican en 3 frecuencias, un pico se forma en la componente EO en 0.57 Hz, a los 24° decrece y a los 56° otro pico es el máximo y señala una frecuencia de 0.48 Hz. A los 71° es superado por uno en 0.41 Hz y se mantiene para 90° y 128°. Desde los 128° vuelve a formarse un pico en la frecuencia inicial de 0.57 Hz y crece para 143°, 157° y 180° (EO).



➤ Estación AMA1

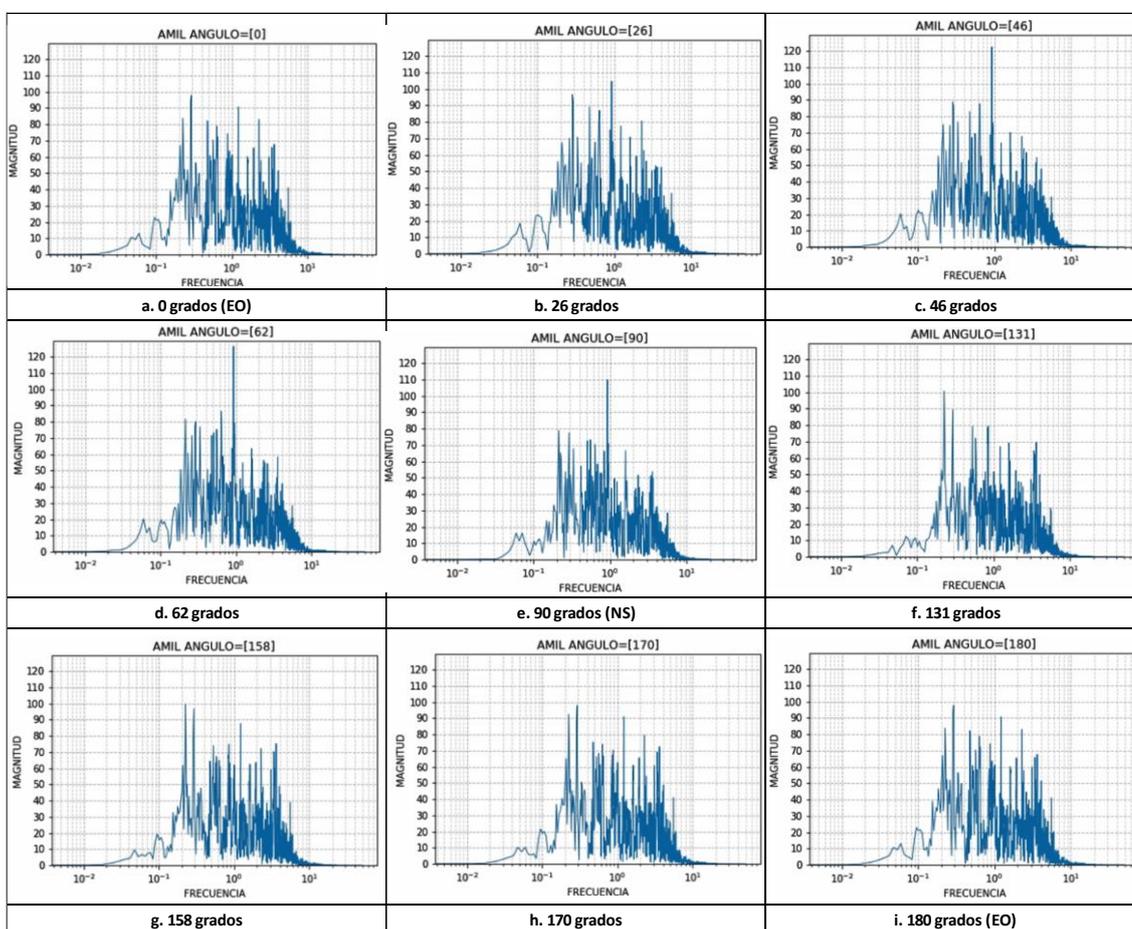
Los picos suceden para valores muy cercanos de frecuencias: desde los 0° hasta los 28° el valor máximo se encuentra en 1.72 Hz, a los 59° dicho pico disminuye y el máximo se ubica en 2.1 Hz, el cual se mantiene a los 72° y 90°. En el ángulo 126° se forma un pico muy cercano, en 1.68 Hz. Se logra establecer un rango de frecuencias importantes, los picos solo ocurren para frecuencias entre 1.68 Hz – 2.1 Hz.



➤ Estación AMIL

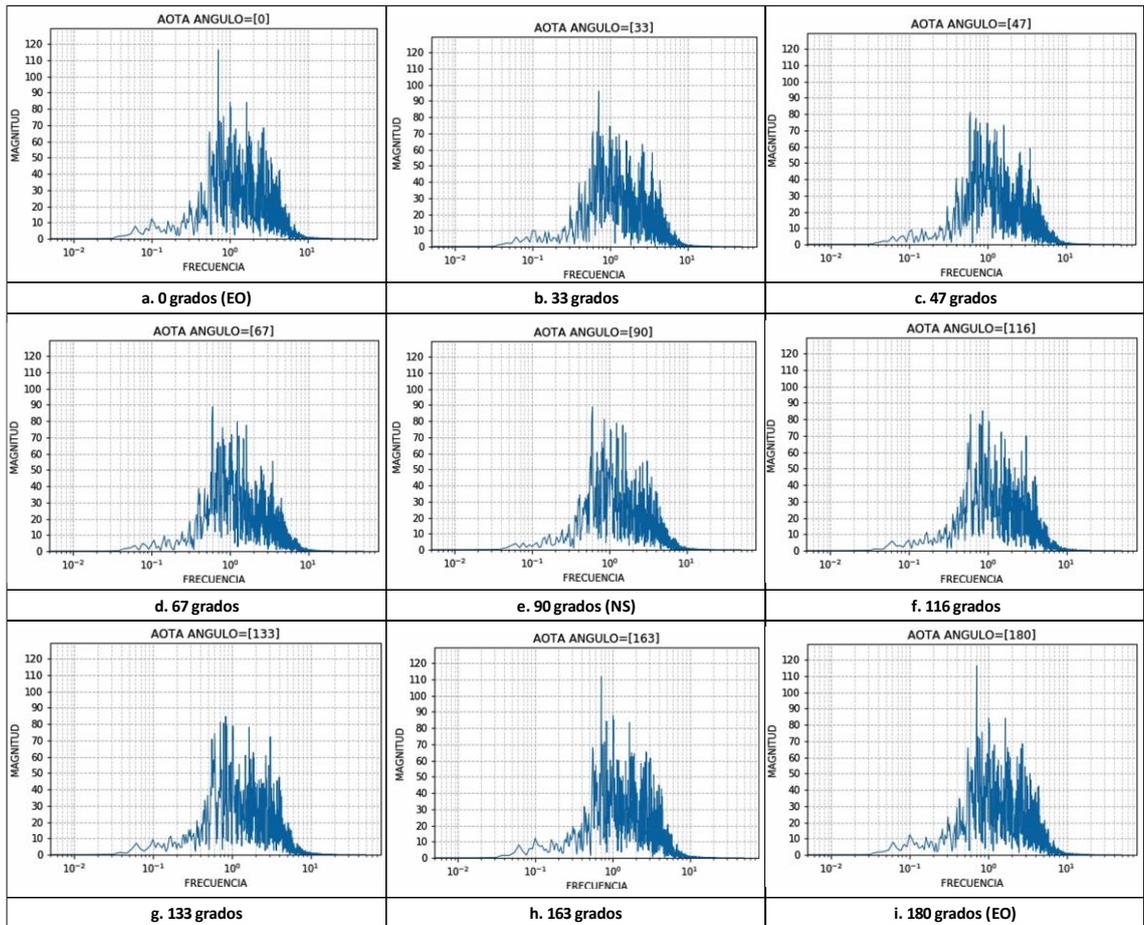
Para este registro se identifican 2 frecuencias importantes. Al inicio de la rotación se forma un pico en 0.29 Hz, el cual disminuye para ciertos ángulos, como se puede observar en el ángulo 26°, 46°, 62° y 90°, donde el pico indica 0.92 Hz.

Al continuar la rotación, la magnitud máxima a los 131° y a los 158° indica una frecuencia de 0.22 Hz, hasta volver a la frecuencia inicial de 0.29 Hz. Los picos se forman en dos frecuencias: un rango de 0.22 Hz – 0.29 Hz y 0.92 Hz.



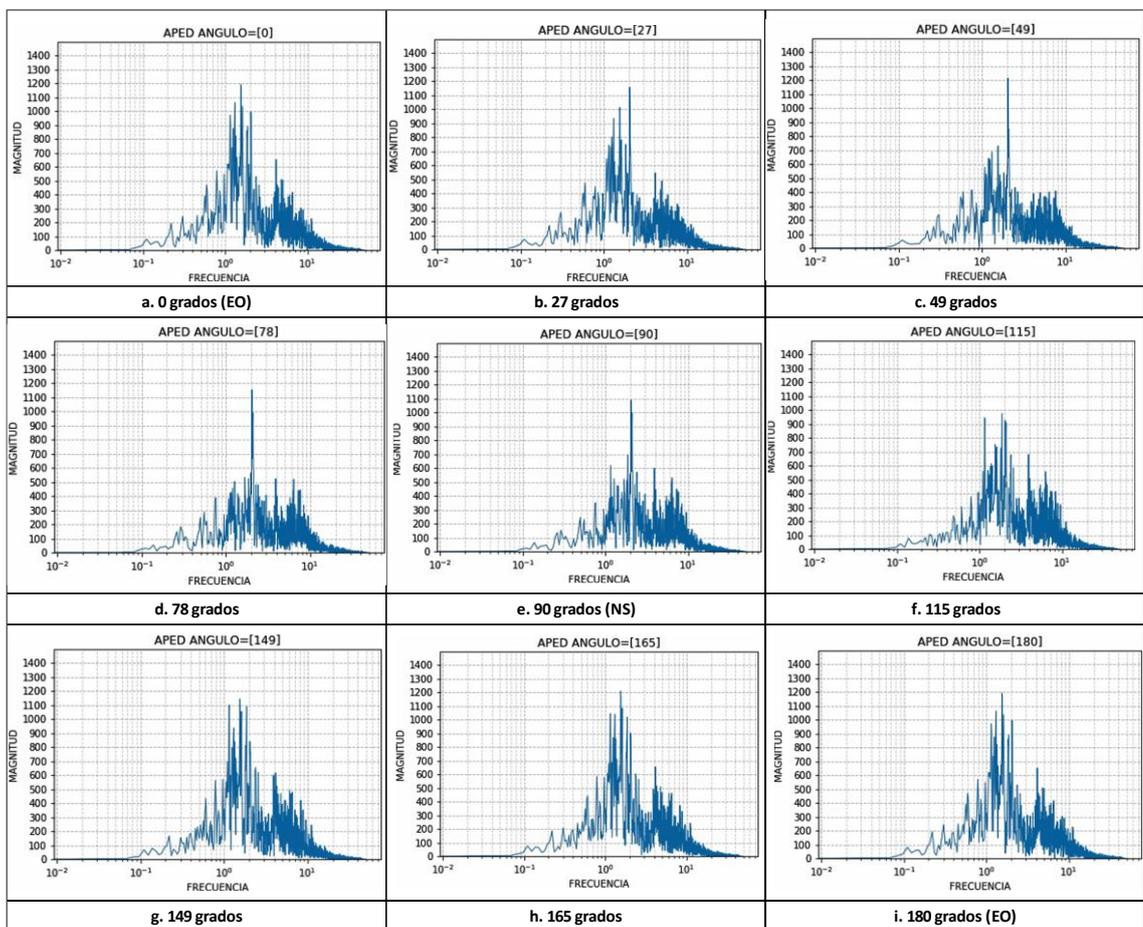
➤ Estación AOTA

La rotación empieza con un pico ubicado en 0.70 Hz, a los 67° se forma otro pico en 0.60 Hz. y a los 116° vuelve a 0.70 Hz. Las frecuencias señaladas son muy cercanas, entre un rango de 0.6 Hz – 0.70 Hz.



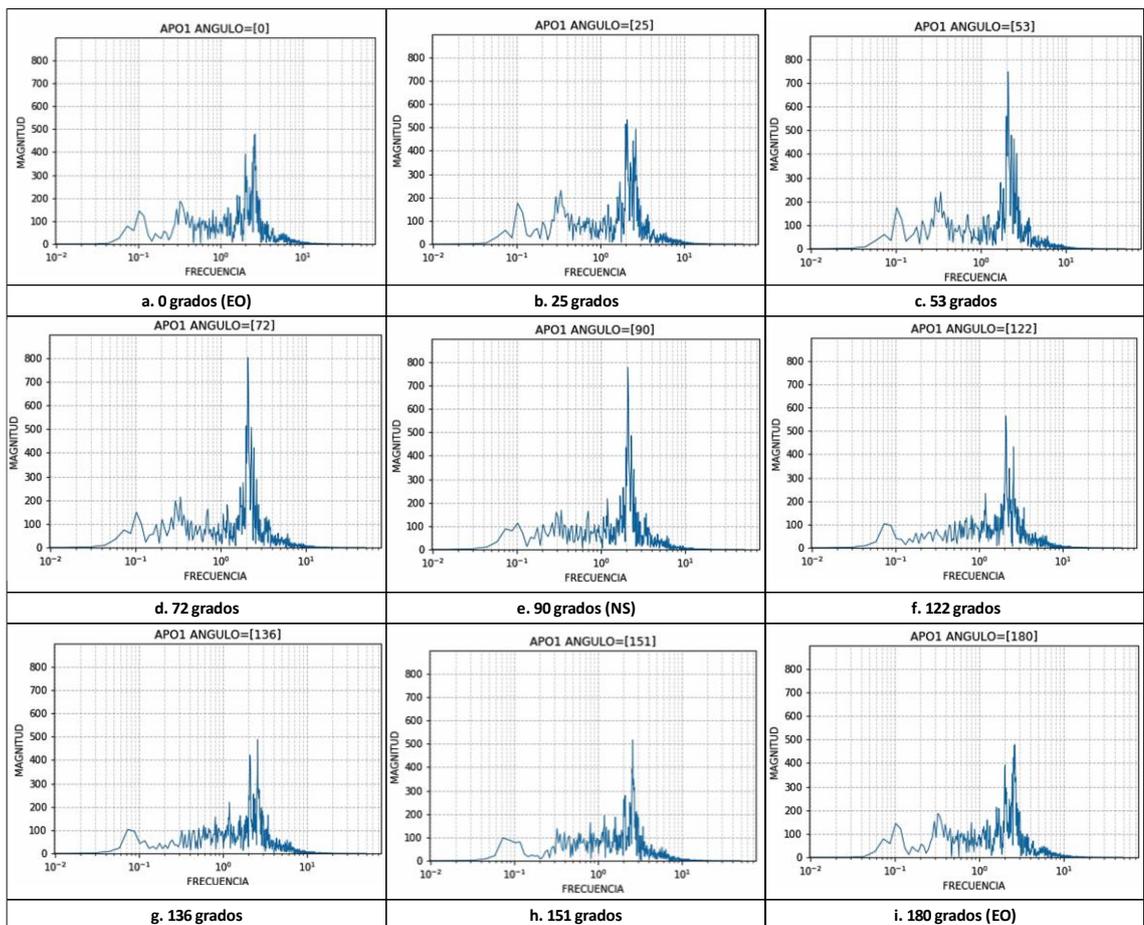
➤ Estación APED

En la componente EO se forma un pico en 1.6 Hz, luego disminuye en conjunto con los picos cercanos, excepto uno ubicado en 1.70 Hz, el cual crece y destaca durante la rotación, hasta los 149° donde vuelve a la frecuencia inicial de 1.60 Hz.



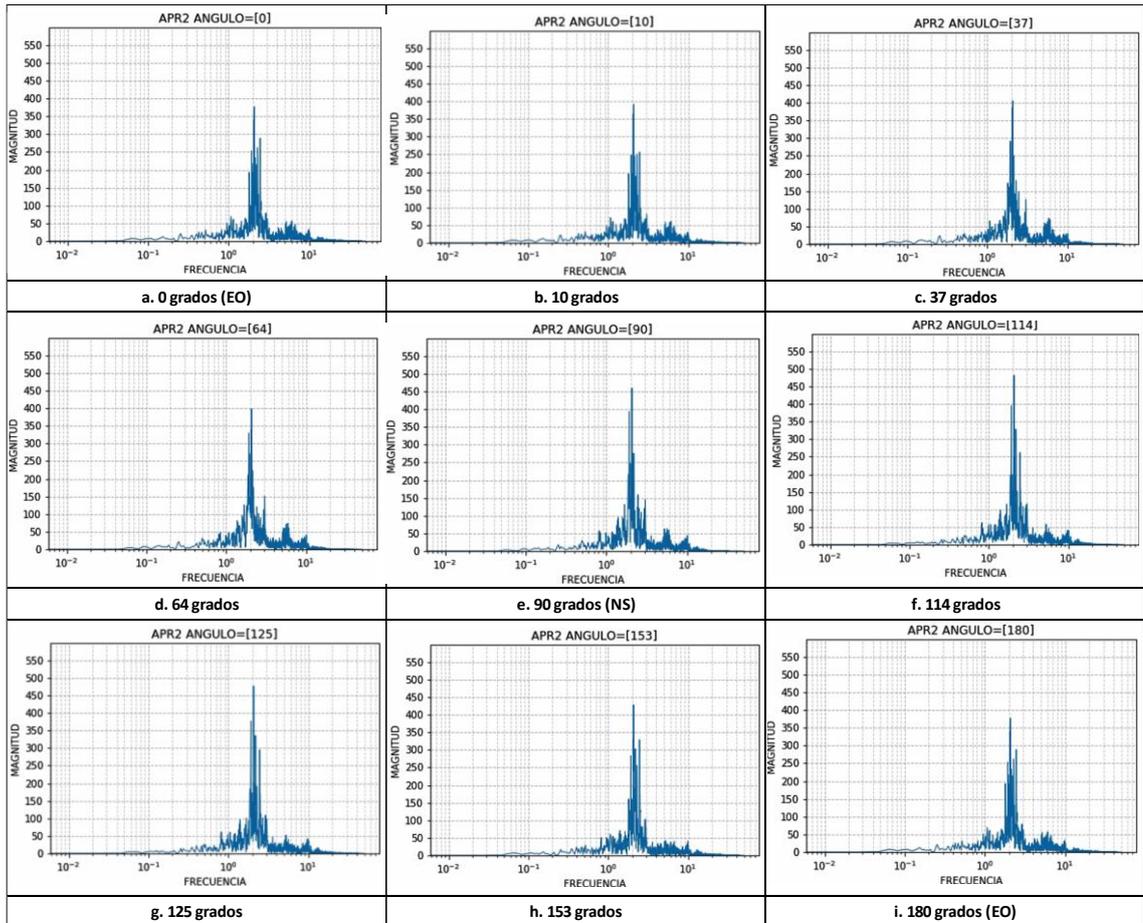
➤ Estación APO1

Los picos se forman en frecuencias cercanas, a los 0° un pico se encuentra en 2.64 Hz, a los 25° se forma otro en 2.10 Hz, el cual crece durante la rotación. Hasta los 136° donde vuelve a la frecuencia inicial de 2.64 Hz y así hasta convertirse en la componente EO (180°).



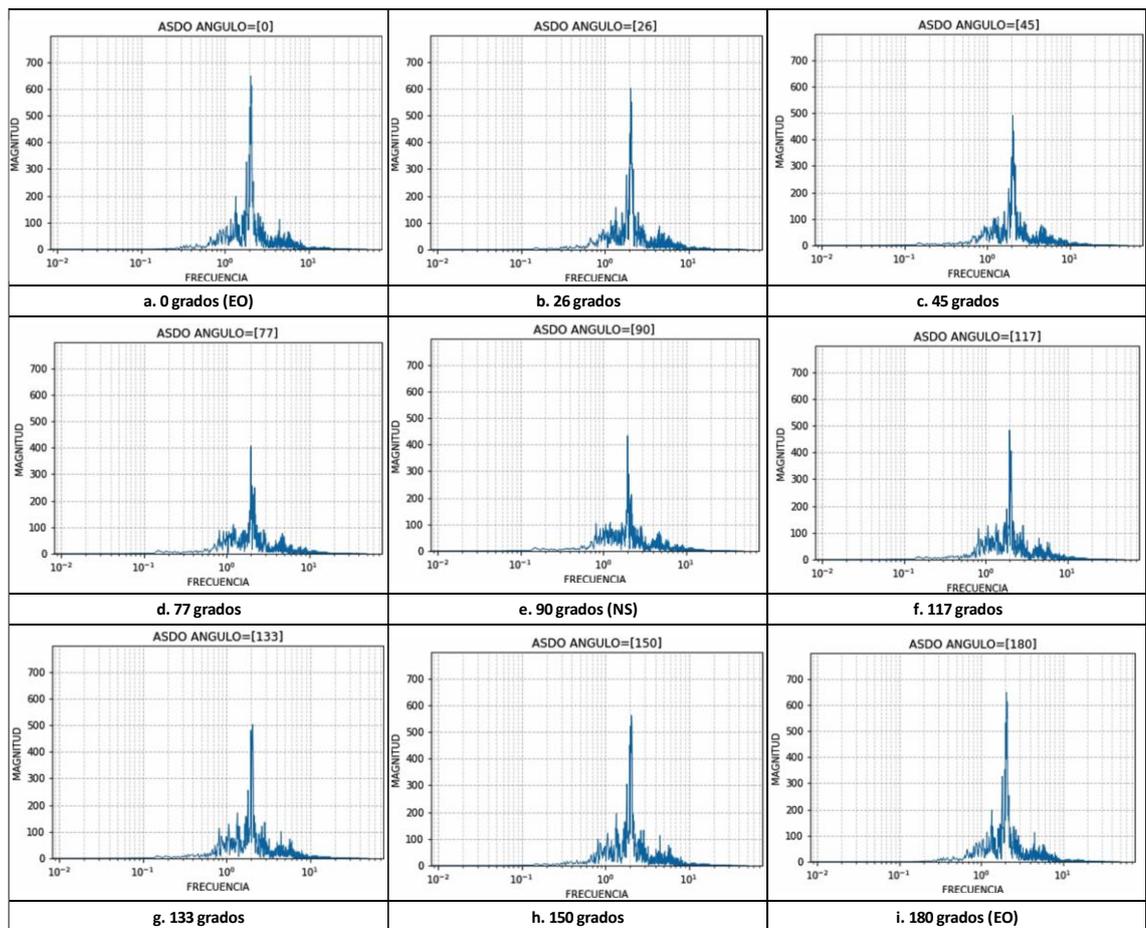
➤ Estación APR2

La frecuencia dominante indicada es la misma: 2.08 Hz. Al hacer la rotación para todos los ángulos, el pico cambia de magnitud, pero se mantiene en la misma frecuencia, como se observa a los 10° y 125°.



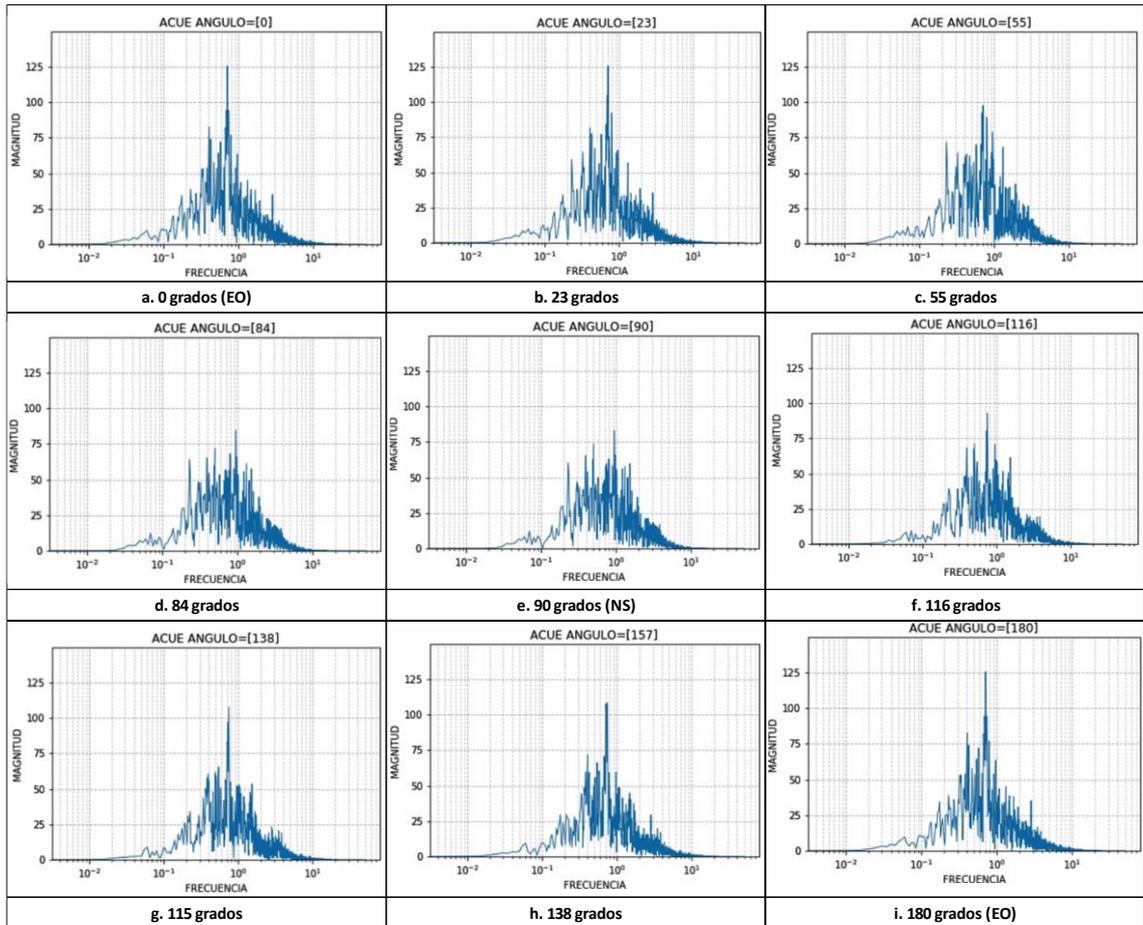
➤ Estación ASDO

Al rotar los registros, se hace evidente la formación de un pico, el cual varía en magnitud, pero se mantiene en un rango de frecuencias entre 2.05 y 1.98 Hz.



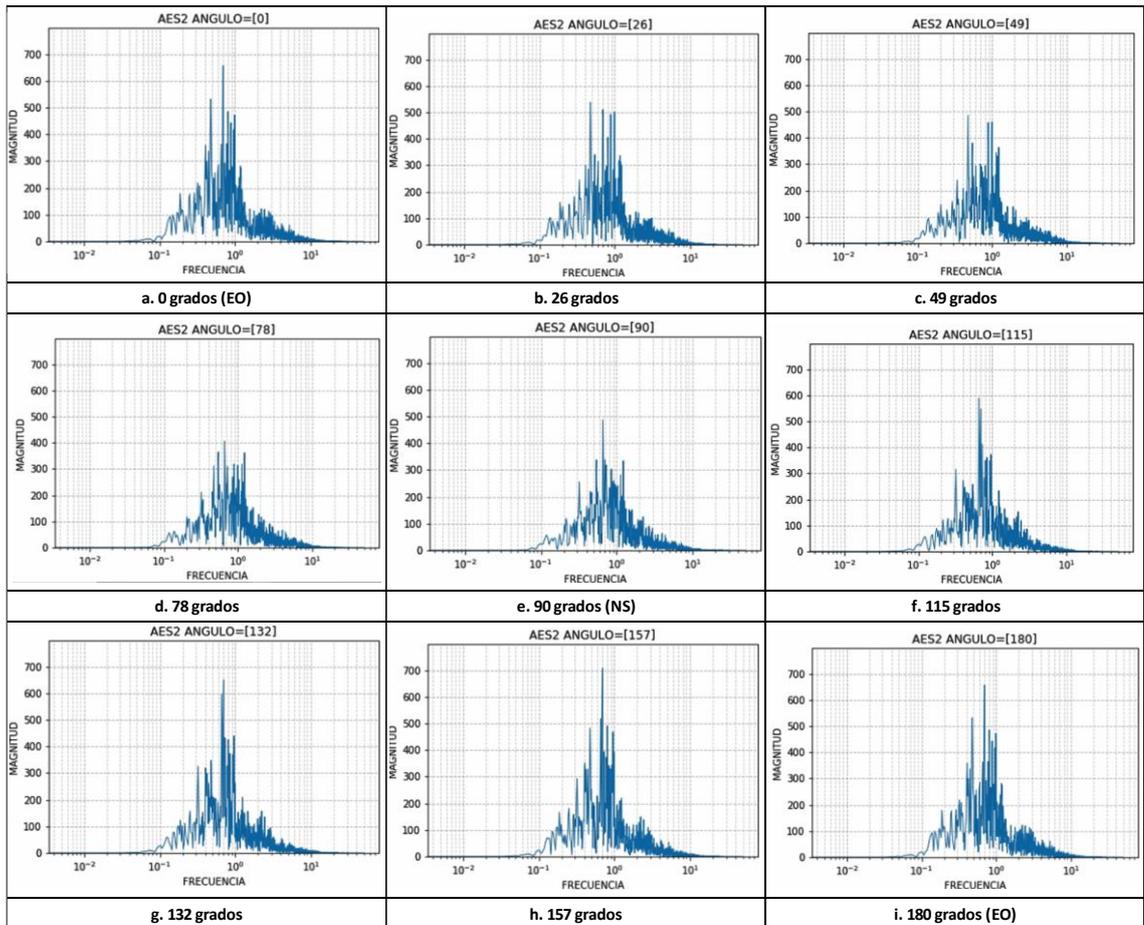
➤ Estación ACUE

Al rotar desde 0° a 180°, se identifica la formación de los picos en un rango de frecuencias cercanas. Los picos se forman en frecuencias muy similares: 0.69 Hz y 0.72 Hz.



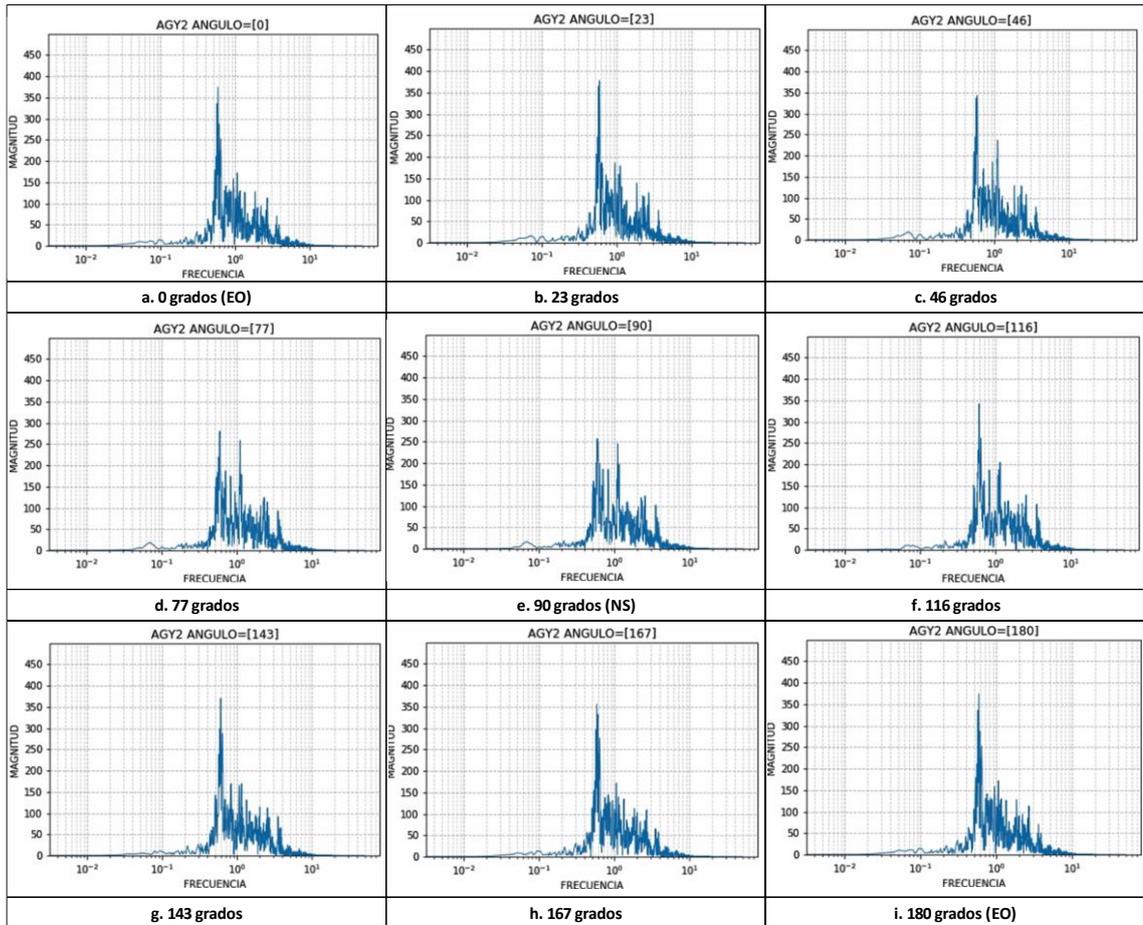
➤ Estación AES2

Para la estación AES2, se forman 2 picos importantes. En 0° y en 115°, los picos son muy cercanos: 0.69 Hz y 0.66 Hz, respectivamente. Pero dichos picos desaparecen para ciertos ángulos, como se observa a los 49°, donde la frecuencia es 0.48 Hz.



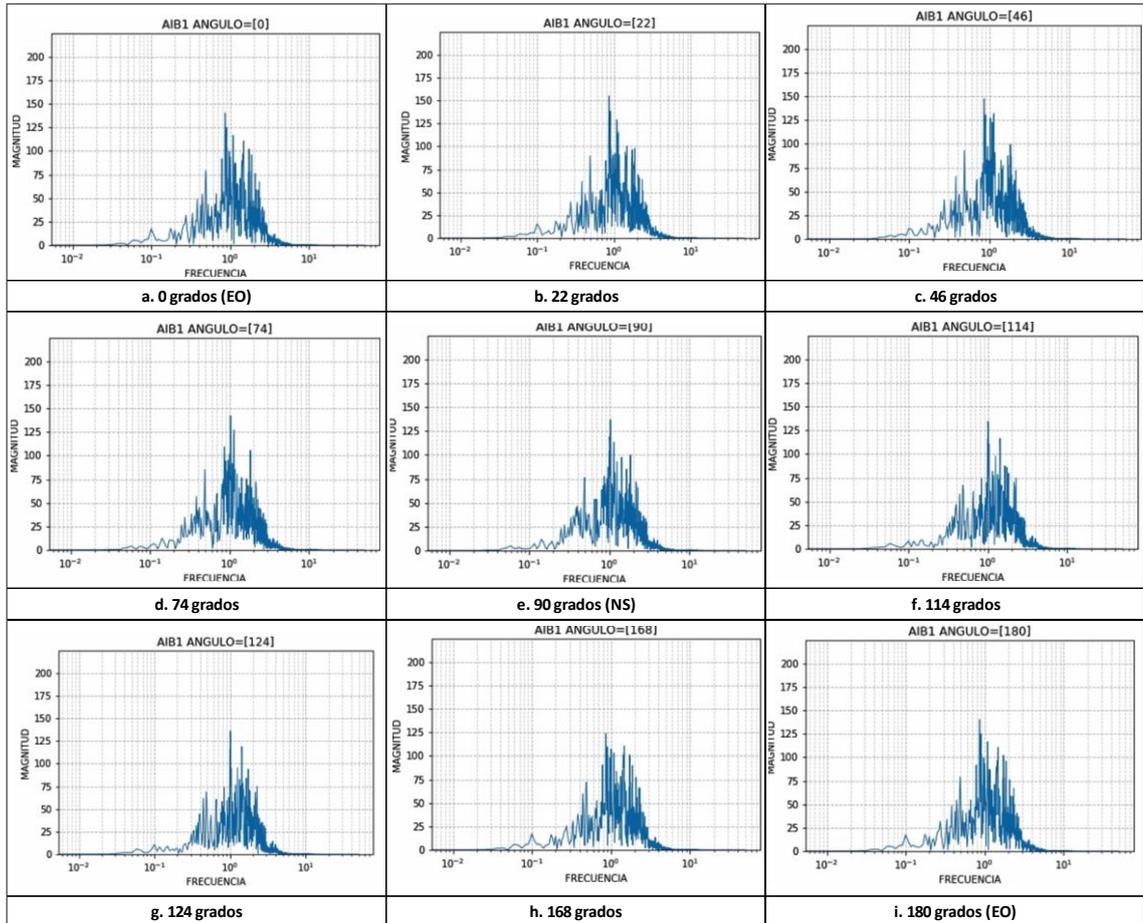
➤ Estación AGY2

Los resultados de esta estación indican que el pico se mantiene en una ubicación, lo cual permite determinar un valor de frecuencia dominante, los picos suceden en un rango de 0.58 Hz y 0.59 Hz.



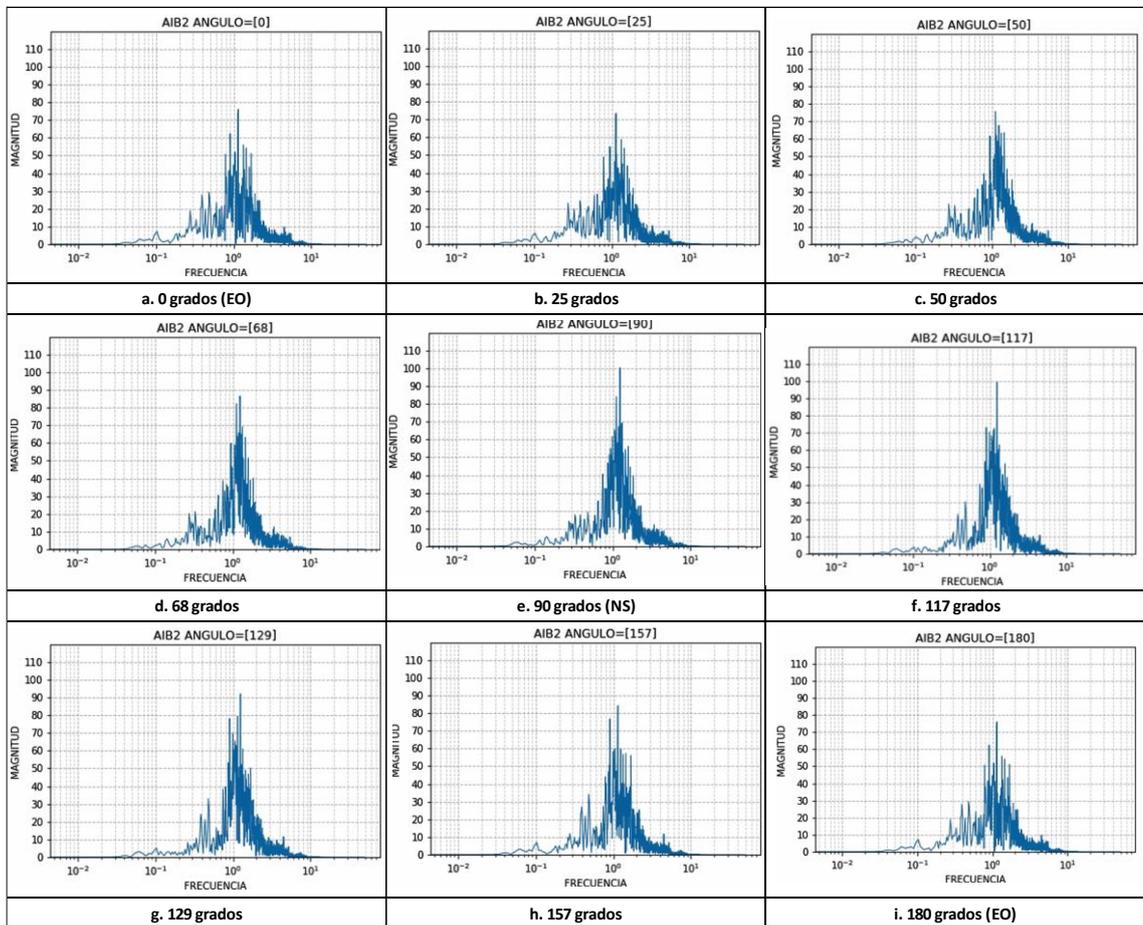
➤ Estación AIB1

Al rotar desde 0° hasta 180°, se puede notar que existen 2 puntos importantes. Dichos picos se ubican en frecuencias muy cercanas: 0.87 Hz y 1.03 Hz.



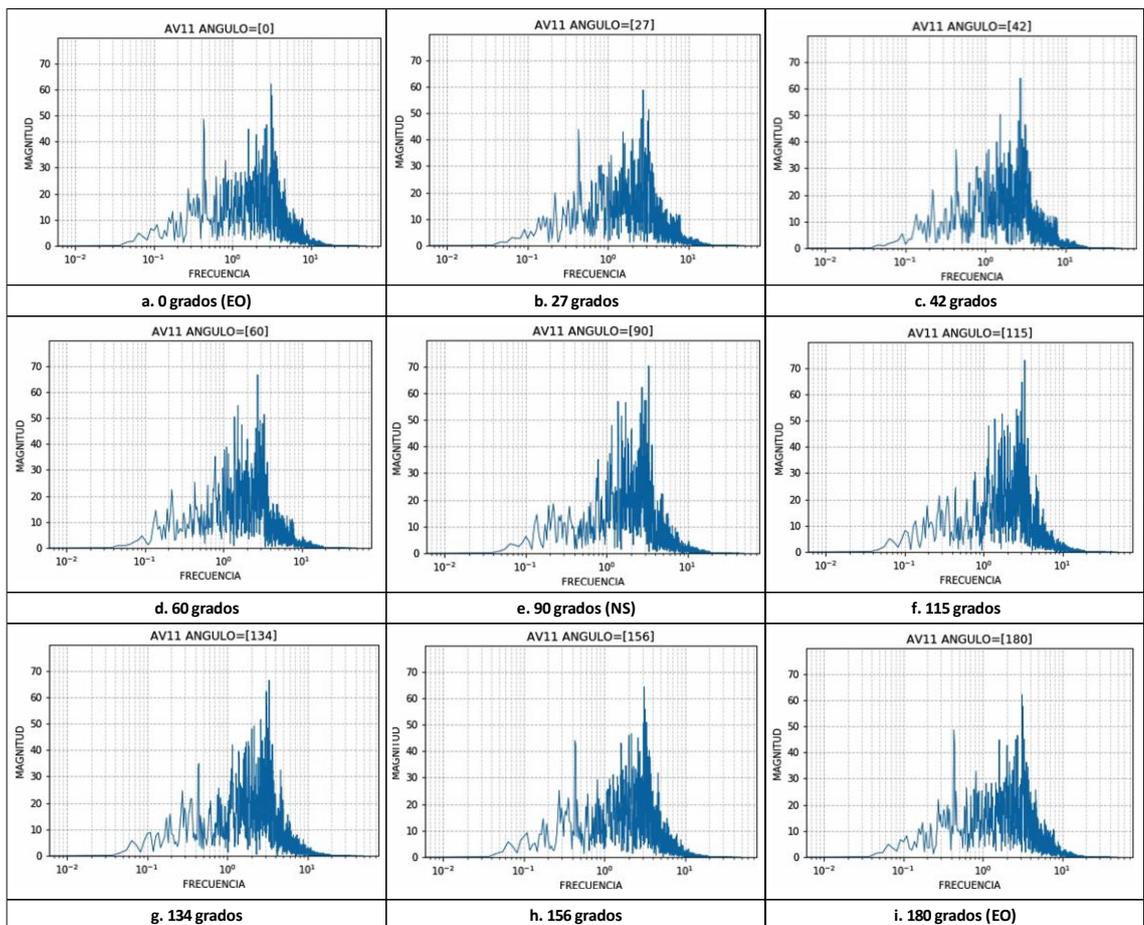
➤ Estación AIB2

Se observan 2 picos importantes que suceden en frecuencias casi similares; como se observa para 0°, la frecuencia inicial es de 1.14 Hz y para ciertos ángulos se forma un pico aún mayor en la posición de 1.25 Hz, como en el ángulo de 117°. El rango de frecuencias donde ocurren los picos es muy cercano: 1.14 Hz – 1.25 Hz.



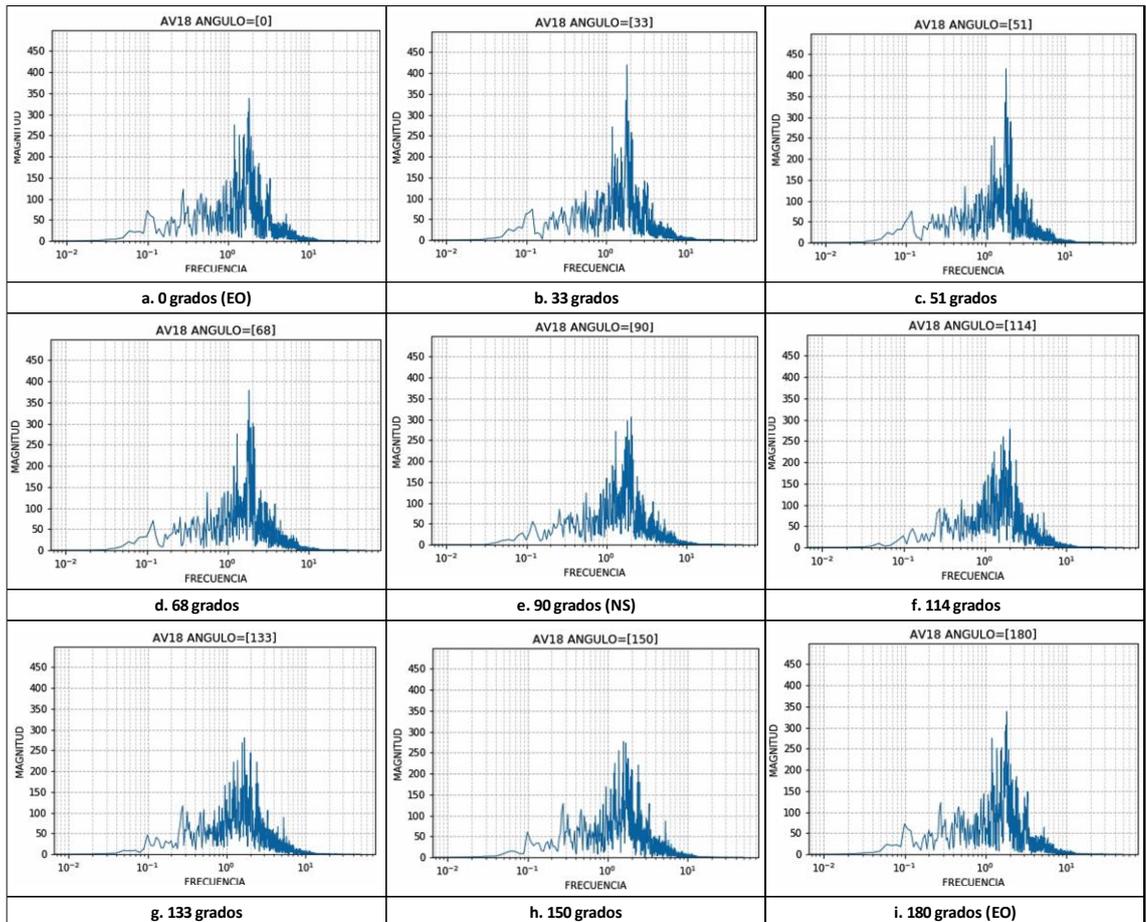
➤ Estación AV11

Se distingue un rango de frecuencias importantes, dado que los picos suceden para valores entre 2.81 Hz y 3.35 Hz. A los 0° la frecuencia es 3.14 Hz, después cambia a 2.81 Hz (60°) y a los 115° cambia a 3.35 Hz. No obstante, las ubicaciones donde se forman los picos son muy similares.



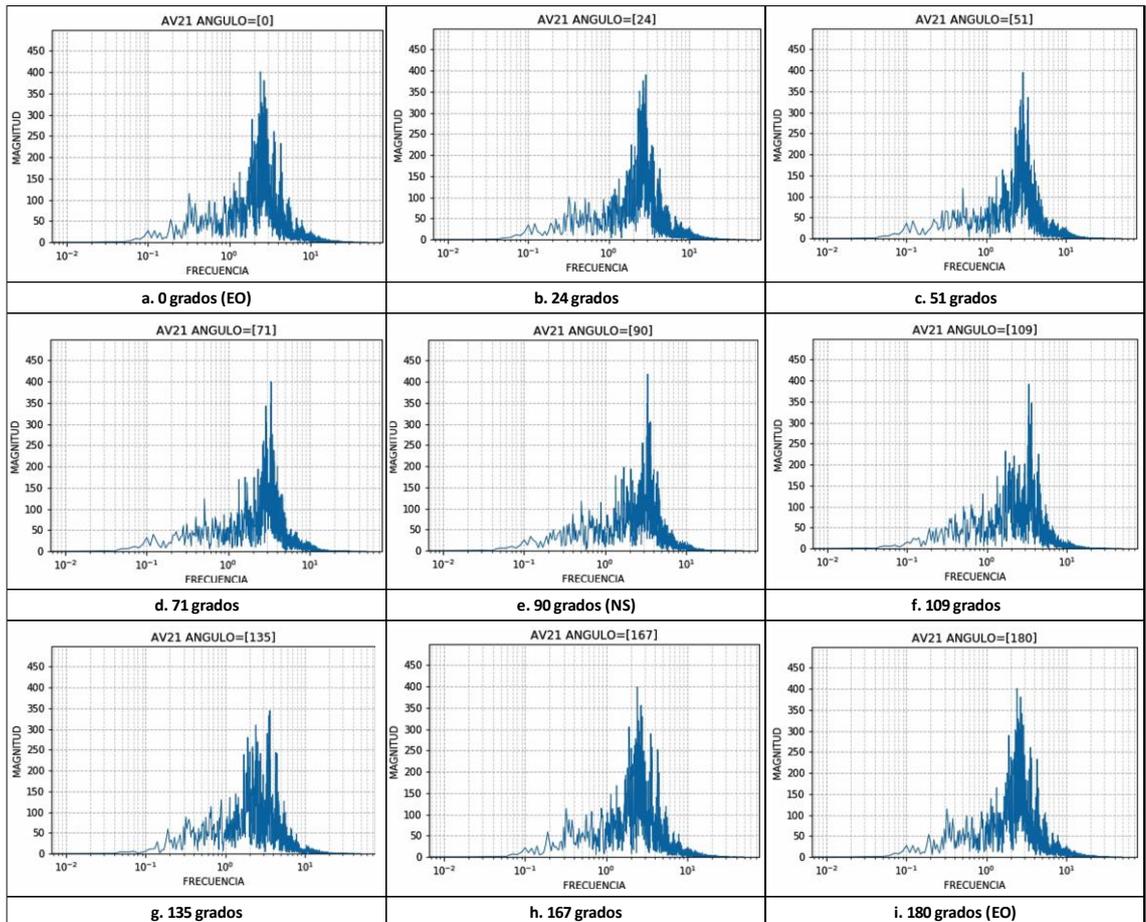
➤ Estación AV18

En esta estación, los picos se forman en un rango de 1.75 Hz y 2.03 Hz. Para ciertos ángulos, como en 51° , el pico es notorio. Para otros ángulos, como en 150° , los picos han disminuido en magnitud, pero ocurren en valores cercanos al pico inicial.



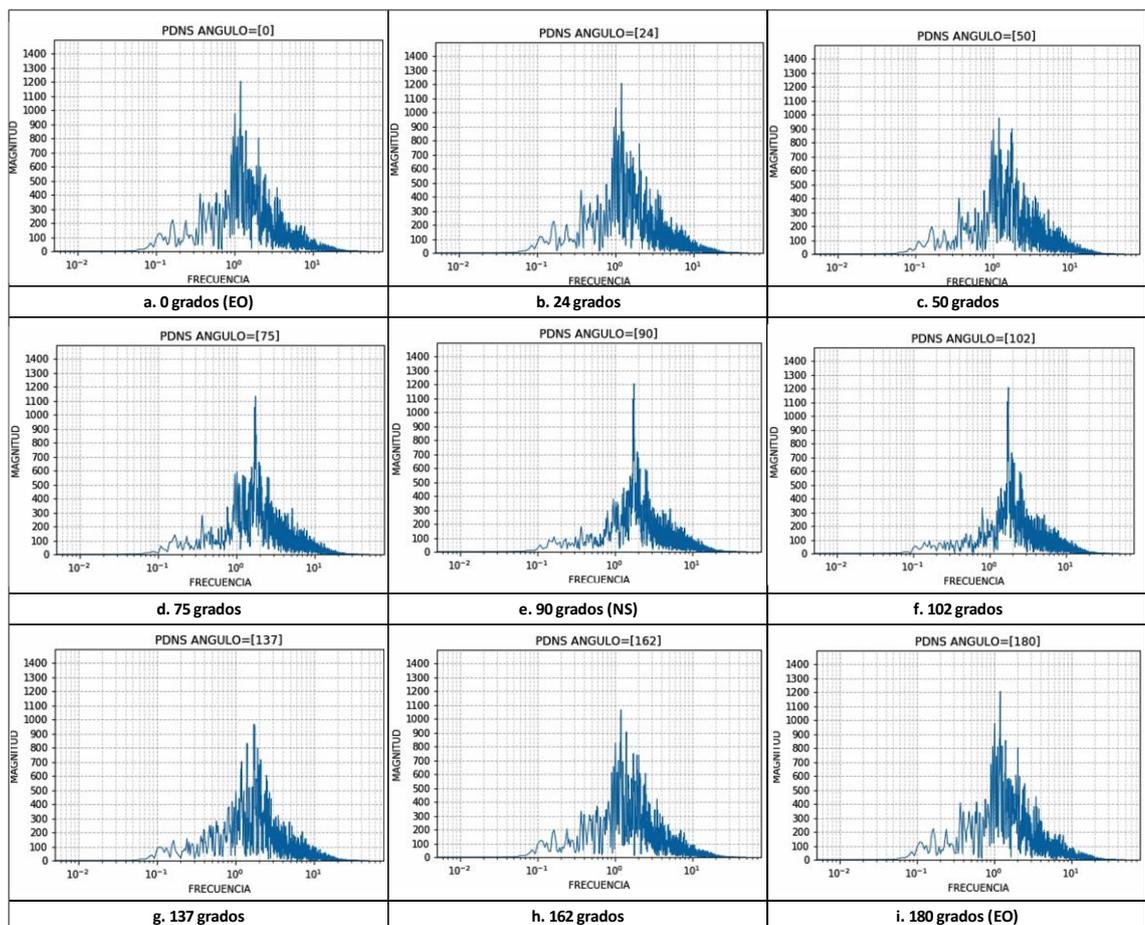
➤ Estación AV21

Desde 0° hasta 180°, se observa que los picos suceden en un rango de frecuencias entre 2.42 Hz y 3.36 Hz. Se identifican 3 frecuencias: en 0° la frecuencia es 2.42 Hz, en 51° es 2.95 Hz y en 109° es 3.36 Hz.



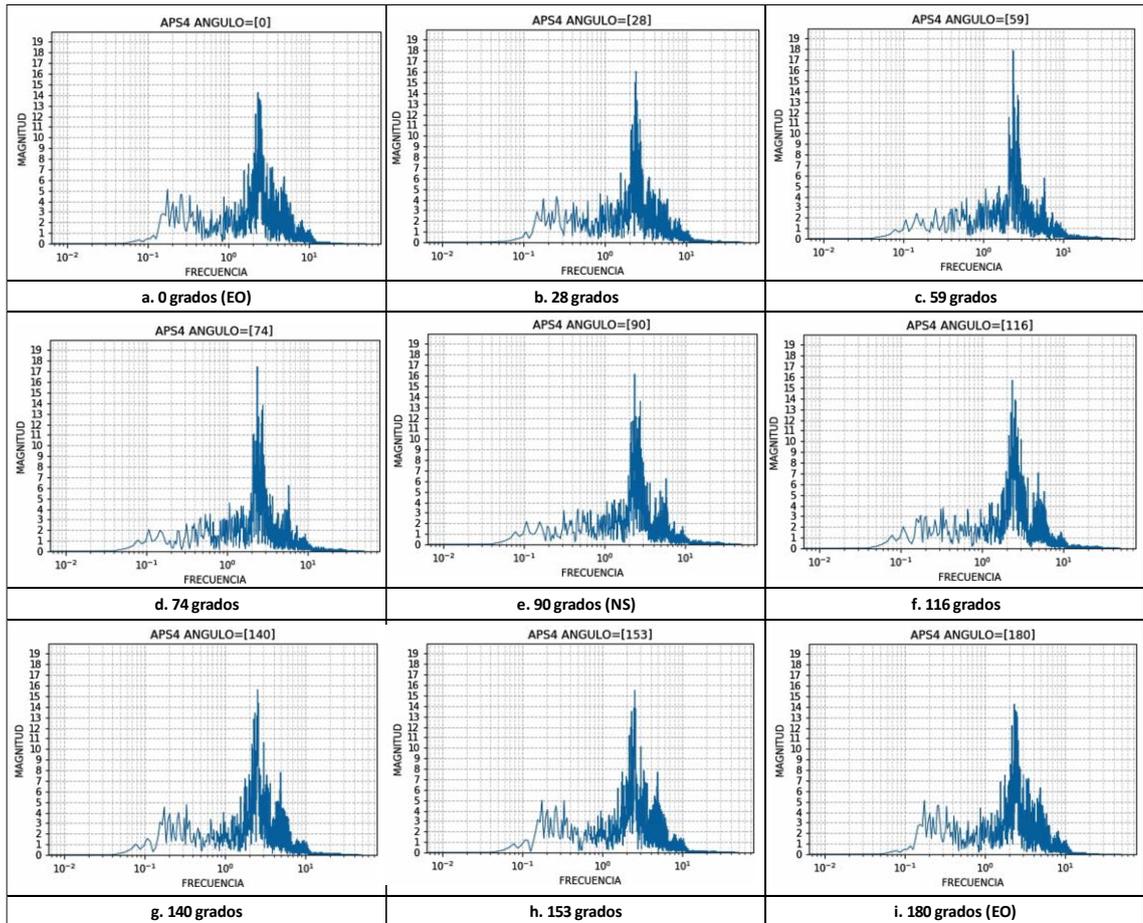
➤ Estación PDNS

Al rotar desde 0° hasta 180°, se puede notar que para esta estación existen 2 puntos importantes. Inicialmente (componente EO) el pico se encuentra en 1.23 Hz, y durante la rotación, como se observa a los 102°, dicho pico ha disminuido y otro pico sucede para 1.78 Hz. Los picos señalan frecuencias parecidas, entre un rango de 1.23 Hz – 1.78 Hz.



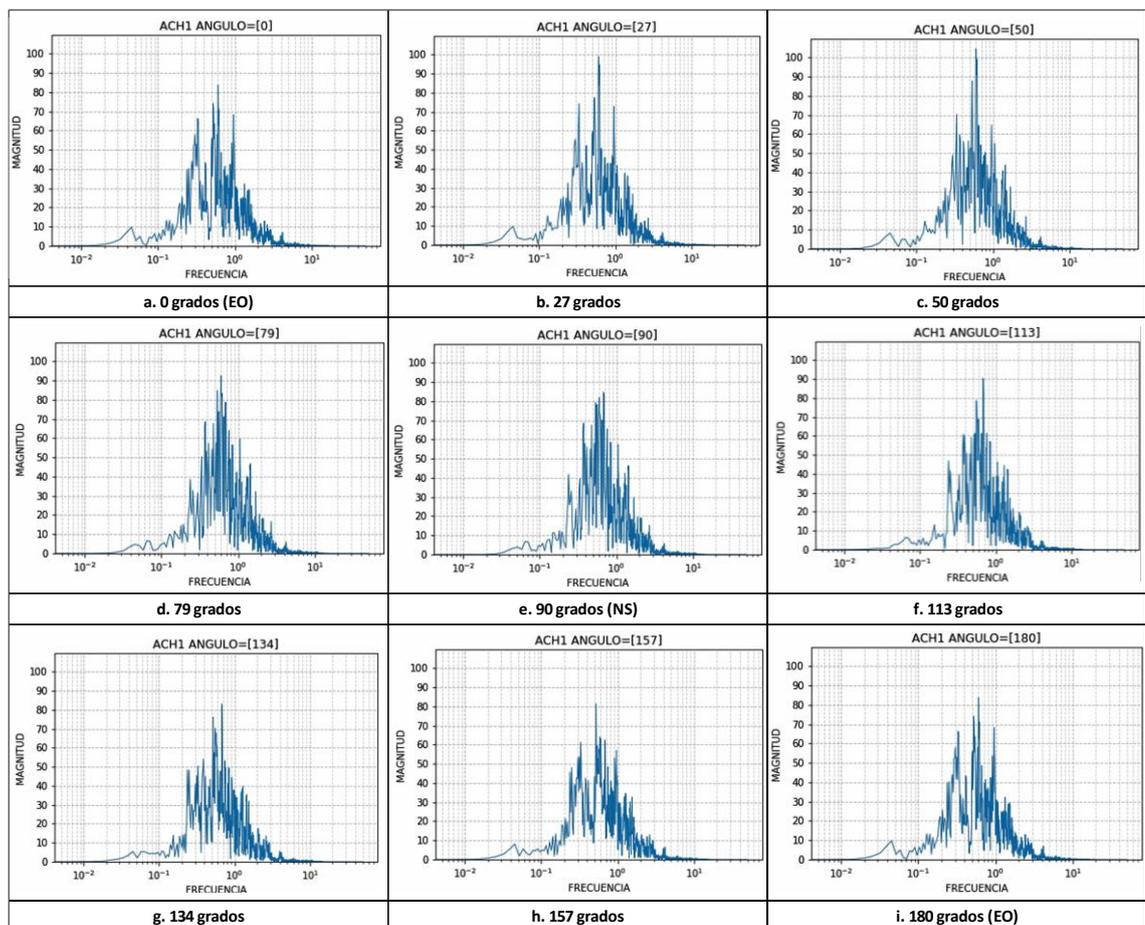
➤ Estación APS4

En la estación APS4, se distingue un rango de frecuencias importantes, dado que los picos suceden para valores entre 2.30 Hz y 2.52 Hz. Las ubicaciones donde se forman los picos son muy similares.



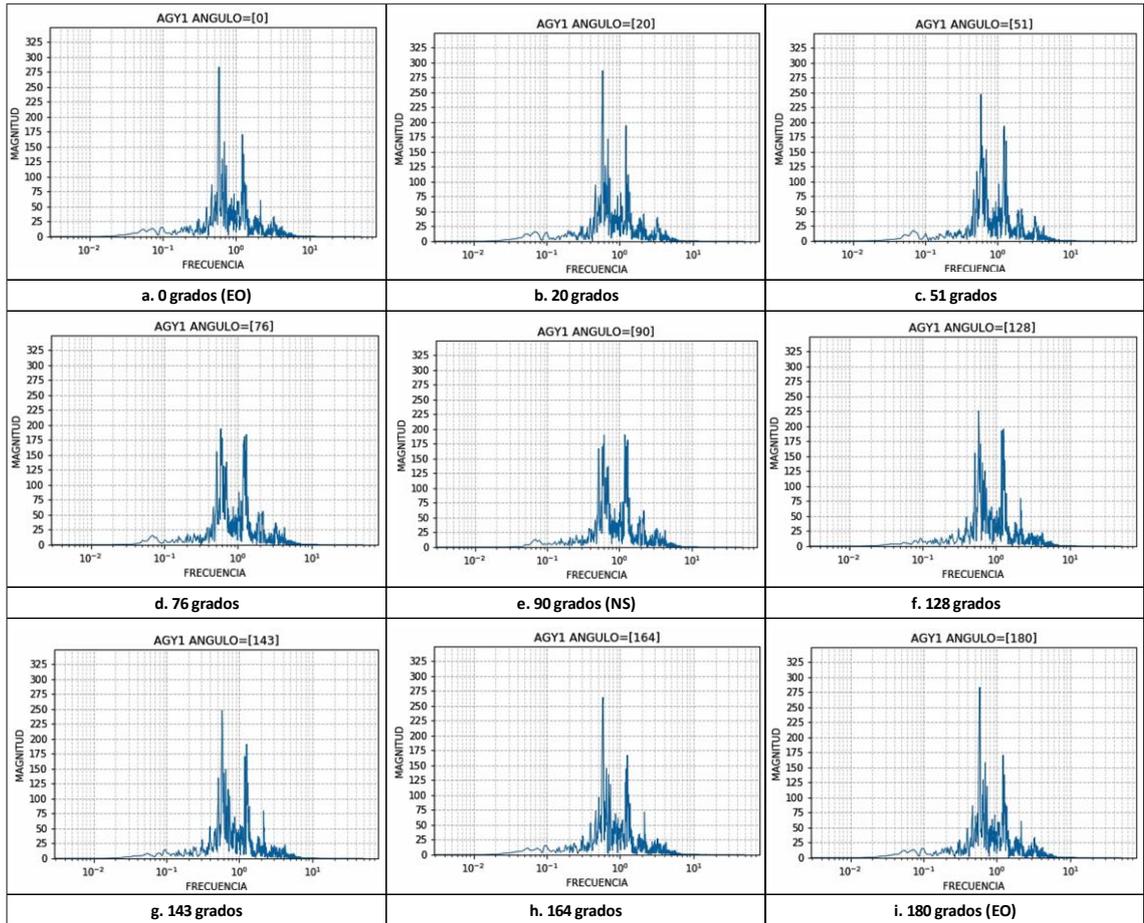
➤ Estación ACH1

Para la estación ACH1, se registran 3 picos importantes. En 0° y en 113° , las frecuencias son muy cercanas: 0.60 Hz y 0.67 Hz, respectivamente. Pero dichos picos disminuyen para ciertos ángulos, como se observa a los 157° , donde un pico se encuentra en el valor de 0.52 Hz. No obstante, las frecuencias son muy cercanas, en un rango de 0.52 Hz y 0.67 Hz.



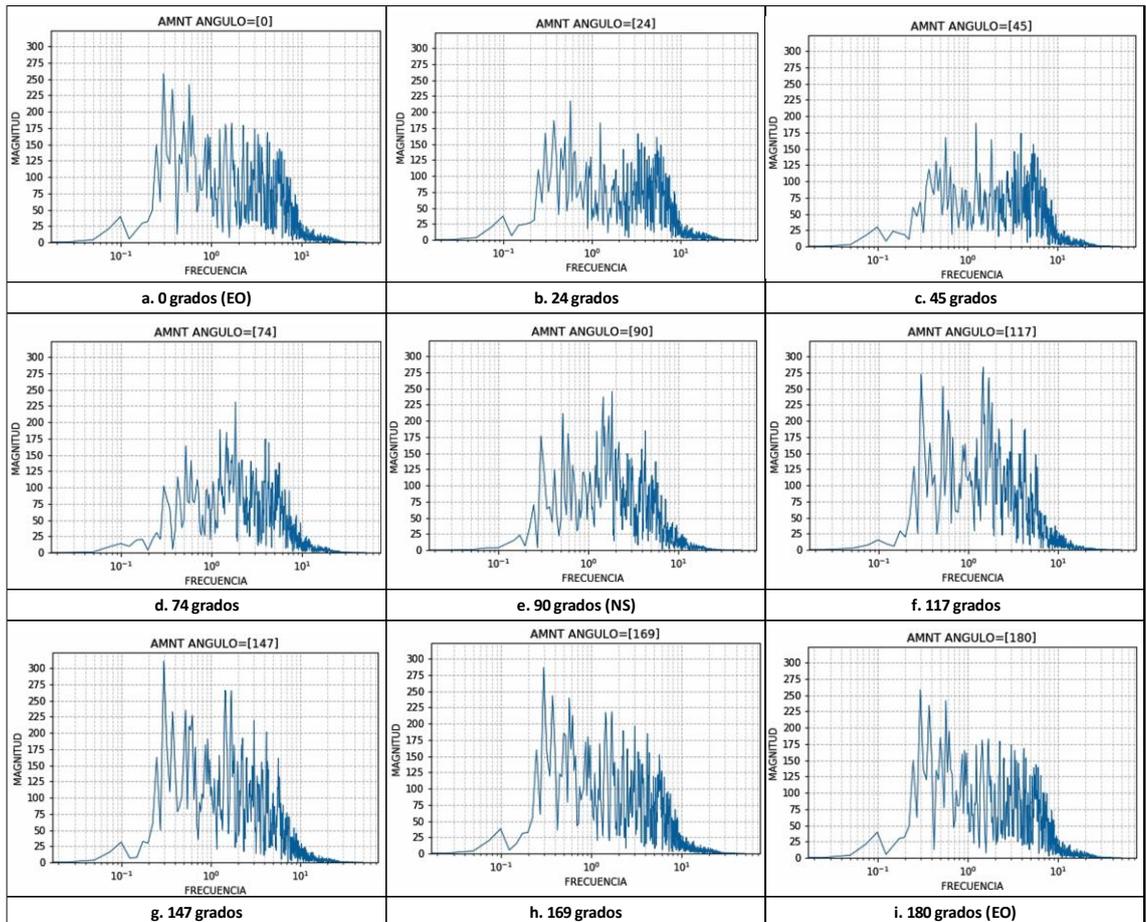
➤ Estación AGY1

Al rotar desde 0° hasta 180°, se hace evidente la formación del máximo pico en frecuencias muy cercanas: 0.58 Hz y 0.61 Hz.



➤ Estación AMNT

Para esta estación no es posible determinar un rango de frecuencias importantes, ya que los valores donde se forman los picos son muy variados. A los 24°, la frecuencia es 0.57 Hz, luego cambia a 1.80 Hz, como se observa en el ángulo 74°. Finalmente, para 147° el pico se ubica en 0.29 Hz.

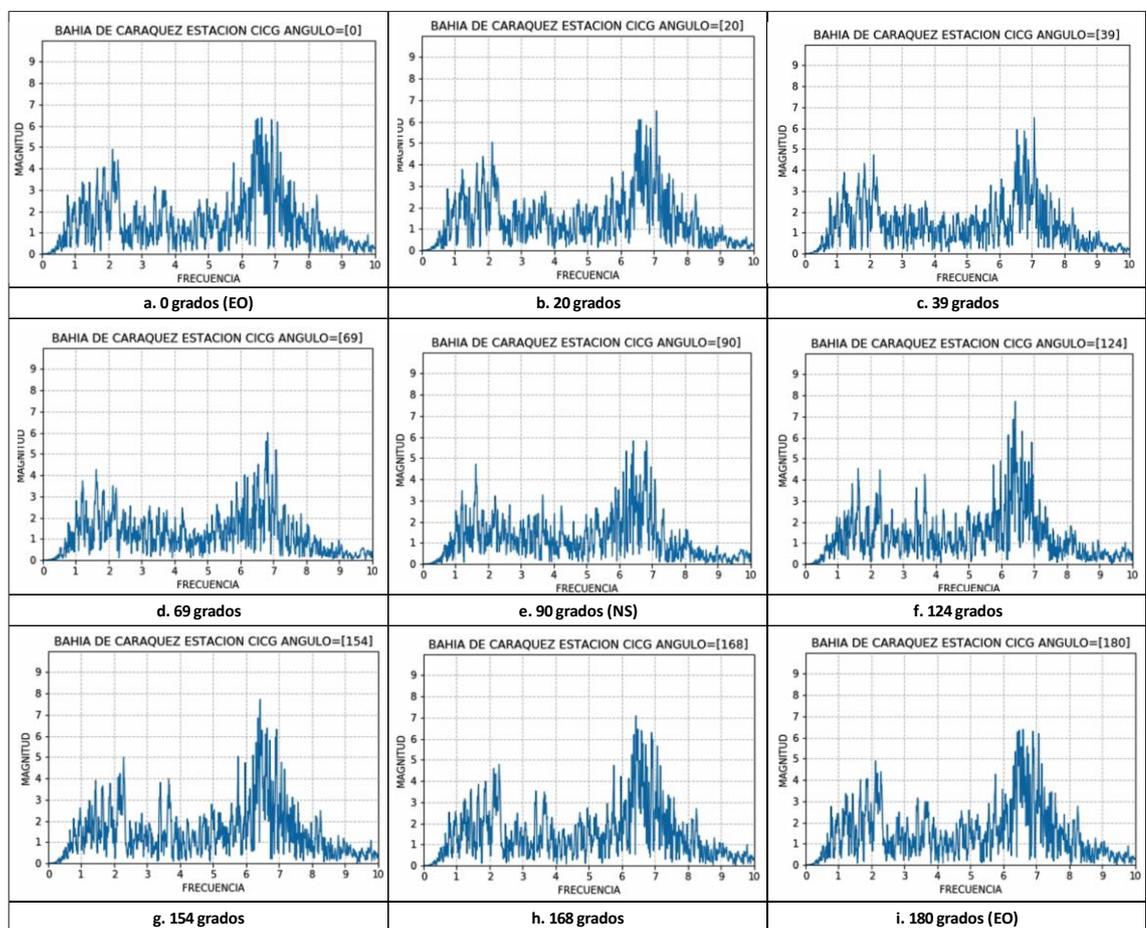


ANEXO 2: Estudio para registros sísmicos de diferentes eventos

Estación CICG

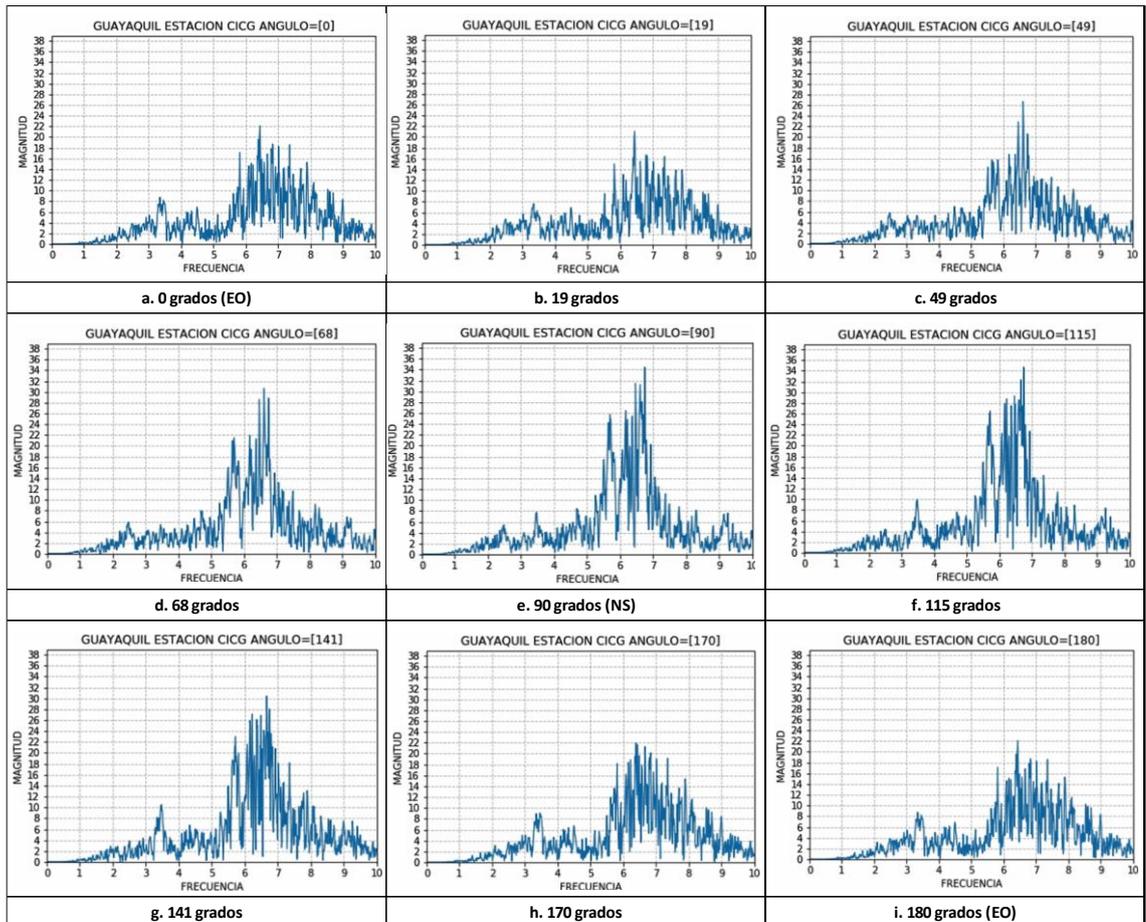
➤ Bahía de Caráquez, 2017 Mw=6

En esta estación los picos suceden en frecuencias altas. Se identifica claramente que los picos suceden en un rango de frecuencias similares, como se observa para 39° y 92°. El rango es 7.1 Hz hasta 6.43 Hz.



➤ Guayaquil, 2017. Mw= 6.2

Durante la rotación de los registros desde 0° a 180°, se observa que los picos suceden en ubicaciones cercanas. A los 0° la frecuencia es de 6.45 Hz y a los 90° el valor máximo se ubica en 6.89 Hz. El rango identificado es 6.45 Hz – 6.89 Hz.





DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Párraga Gusqui Joselyne Dianne**, con C.C: # **0952974277** autora del trabajo de titulación: **Análisis del espectro de Fourier de registros sísmicos según el ángulo de orientación del sensor** previo a la obtención del título de **Ingeniera civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **17 de septiembre de 2020**

f. _____

Nombre: **Párraga Gusqui Joselyne Dianne**

C.C: **0952974277**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Análisis del espectro de Fourier de registros sísmicos en función del ángulo de orientación del sensor		
AUTOR(ES)	Joselyne Dianne, Párraga Gusqui		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Jaime Francisco, Hernández Barredo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniera civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	17 de septiembre de 2020	No. DE PÁGINAS:	92
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería Sísmica, Estudio de señales, Sismología		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	espectro de Fourier, frecuencia, periodo, registro sísmico, componentes horizontales, ángulos de rotación		

RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):

El espectro de Fourier es una herramienta que permite analizar el contenido de frecuencias de un registro sísmico y con ello observar las frecuencias dominantes de la señal. Las frecuencias dominantes de un registro sísmico pueden proporcionar información sobre las características del suelo, relacionando a estas con el periodo fundamental de vibración del suelo. Generalmente, este análisis se lo realiza, de manera individual, a las dos (2) componentes horizontales de un registro sísmico. Trabajos de investigación previos han demostrado que, en ciertas ocasiones, el análisis individual de las componentes horizontales puede arrojar resultados inconsistentes, resultando en periodos fundamentales de suelo totalmente diferentes para cada componente horizontal. A menos que exista un accidente geográfico



importante cerca de la estación acelerográfica, se esperaría que el periodo fundamental del suelo sea independiente de la dirección de análisis.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar las frecuencias (o periodos) dominantes de vibración de componentes horizontales de registros sísmicos, de tal forma que sean independientes de la dirección de análisis y estimar un “único” periodo fundamental de vibración del suelo para cada estación acelerográfica. Con la finalidad de analizar con mayor profundidad las frecuencias dominantes de los registros sísmicos, este trabajo plantea estudiar los Espectros de Fourier de registros sísmicos para varios ángulos de rotación y compararlos con los valores obtenidos para las componentes horizontales originales (Este-Oeste y Norte-Sur).

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-98- 841-0967	E-mail: joselyne.parraga.27@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		