

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA**  
**FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA**



**“DETERMINACIÓN DE LÍMITES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS NIVELES DE  
RUIDO SÍSMICO EN LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA NACIONAL DEL  
PERÚ”**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Cristian Mamani Gutierrez**

Para optar el título profesional de:  
**INGENIERO GEOFÍSICO**

Asesor Interno: **Dr. Hermógenes  
Edgard, Gonzales  
Zenteno**

Asesor Externo: **Dr. Hernando Jhonny,  
Tavera Huarache**

**AREQUIPA – PERÚ**

**2021**

## **DEDICATORIA**

*La presente tesis está dedicada de manera muy especial a mis padres;*

***Juan y Margarita,***

*Y a mis hermanos quienes siempre están apoyándome.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Dr. Hernando Tavera, Presidente Ejecutivo del Instituto Geofísico del Perú, por haberme ayudado y asesorado en el presente estudio.

De igual manera, al Dr. Edgard Gonzales, Docente de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, por su asesoramiento y tiempo prestado para la presentación de esta investigación.

A todos mis amigos, quienes de alguna forma me motivaron a continuar buscando mis objetivos profesionales.

## ÍNDICE

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ubicación de la zona de Estudio.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo General .....	5
1.4.2 Objetivos Específicos .....	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Antecedentes .....	6
<b>CAPITULO II INSTRUMENTACIÓN Y REDES SÍSMICAS.....</b>	<b>8</b>
2.1 Sensores.....	8
2.1.1 Sismómetro inercial estándar.....	9
2.1.2 Sismómetros electromagnéticos .....	10
2.1.3 Sismómetros triaxiales.....	11
2.1.4 Curvas de respuesta del instrumento.....	13
2.2 Tipos de Sismómetros .....	14
2.2.1 Sismómetros de Periodo Largo.....	14
2.2.2 Sismómetros de periodo corto .....	15
2.2.3 Sismómetros de banda ancha.....	15
2.3 Redes Sísmicas .....	16
2.4 Consideraciones para la ubicación de Estaciones Sísmicas .....	16
2.4.1 Región geográfica de interés .....	17
2.4.2 Topografía .....	17
2.4.3 Acceso a las estaciones.....	17
2.4.4 Evaluación de las fuentes de ruido sísmico .....	18
2.4.5 Transmisión de datos sísmicos y fuentes de energía.....	18

2.4.6	Uso futuro del terreno y propietario .....	18
2.4.7	Condiciones climáticas .....	19
2.5	Características del sensor de una Red Sísmica.....	20
2.5.1	Tipo de sensor .....	20
2.5.2	Número de componentes .....	21
2.5.3	Sensibilidad del sensor .....	21
2.5.4	Rango de operación de frecuencias del sensor.....	22
2.6	Red Sísmica Nacional del Perú.....	22
<b>CAPITULO III RUIDO SÍSMICO.....</b>		<b>27</b>
3.1	Señales Sísmicas.....	27
3.2	Ruido Sísmico .....	28
3.3	Modelo Global de nivel de Ruido.....	30
3.4	Fuentes de Ruido Sísmico .....	34
3.4.1	Microsismos Oceánicos.....	35
3.4.2	Ruidos de Periodos Cortos .....	37
3.4.3	Ruidos de Periodos Largos .....	38
<b>CAPITULO IV PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....</b>		<b>41</b>
4.1	Selección de datos .....	41
4.1.1	Variación diurna.....	41
4.1.2	Variación estacional .....	42
4.2	Procesamiento .....	42
4.2.1	Segmentación de la información.....	43
4.2.2	Extracción de tendencia.....	44
4.2.3	Función tapering.....	45
4.2.4	Densidad espectral de potencia.....	45
4.2.5	Función de probabilidad de densidad .....	47
4.3	Análisis de la Información.....	49
4.3.1	Variación Diurna .....	52
4.3.1.1	Estaciones Sísmicas ubicadas en la región costera del Perú .....	53
4.3.1.2	Estaciones sísmicas ubicadas en la Región Andina .....	62
4.3.1.3	Estaciones sísmicas ubicadas en la Región Amazónica.....	70

4.3.2 Variación Estacional.....	78
4.3.2.1.Variación de periodos intermedios (1 - 15 s) .....	78
4.3.2.2.Variación de periodos largos (> 15 s) .....	81
4.3.3 Variación Geográfica del Ruido Sísmico.....	85
<b>CAPITULO V RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>92</b>
5.1.Determinación de Límites Mínimos y Máximos.....	92
5.2.Niveles de Ruido Sísmico en la RSN .....	97
<b>CONCLUSIONES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Ubicación de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el Instituto Geofísico del Perú en el año 2019. ....	4
<b>Figura 2.1</b> Sismómetro inercial mecánico, (Modificado de Havskov y Alguacil, 2002). ....	9
<b>Figura 2.2</b> Modelo de un sensor electromagnético (Modificado de Scherbaum, 1996). ....	10
<b>Figura 2.3</b> Vista isométrica del sistema de coordenadas UVW y XYZ de un sismómetro triaxial simétrico (Modificado de Townsend, 2014). ....	12
<b>Figura 2.4</b> Grafico de respuesta de frecuencia de amplitud de un sensor mecánico de 1Hz (arriba), sensor electromagnético de velocidad de 1 Hz (medio) y un acelerómetro de 100 Hz (abajo). (Modificado de Havskov y Alguacil, 2002). ....	14
<b>Figura 2.5</b> Comparación entre los registros de un mismo evento en sismómetros de periodo largo, periodo corto de y sismómetros de banda ancha (Jaiswal, 2008). ....	16
<b>Figura 2.6</b> Comparación del ancho de banda de los sismómetros ....	21
<b>Figura 2.7</b> Componentes de la estación sísmica de Pacco Loma (PACL) de la Red Sísmica Nacional del Perú (Fuente IGP). ....	24
<b>Figura 2.8</b> Distribución geográfica de estaciones de banda ancha en el Perú (Fuente Portal IGP). ....	25
<b>Figura 3.1</b> Señal registrada en función del tiempo (Izquierda), puede representarse en función de la frecuencia por su espectro de Fourier. La amplitud (medio) y la fase del espectro (derecha), ambos son necesarios para proporcionar la serie de tiempo completa (Modificado de Lay y Wallace, 1995). ....	27
<b>Figura 3.2</b> Espectro de potencia de velocidad del ruido sísmico ambiental, en condiciones no ruidosas (Quiet) y ruidosas (Noisy) para una estación típica sobre un basamento rocoso. (Modificado de Aki y Richards, 1980). ....	30
<b>Figura 3.3</b> Superposición de espectros de la red sismográfica global (GSN) con los niveles máximos y mínimos determinados (Modificado de Peterson, 1993). ....	31
<b>Figura 3.4</b> Curvas de aceleración de la densidad de potencia espectral del ruido $Pa$ , como función de periodos de ruido (de acuerdo a Peterson 1993). Para NLNM fueron calculadas las curvas de velocidad y desplazamiento $Pv$ y $Pd$ respectivamente. (Modificado de Bormann, 2002). ....	32
<b>Figura 3.5</b> Función de Densidad de Probabilidad de Potencia de la componente vertical de la estación Quirihuac (QRHC) correspondiente al día 28 de marzo del 2018 de la Red Sísmica Nacional (RSN) del Perú. ....	34

<b>Figura 3.6</b> Generación de microsismos primarios, debido a variaciones de presión en el fondo oceánico, $z=0$ corresponde al nivel cero del mar y $z=-H$ al nivel del piso oceánico (Friedrich et al., 1998). .....	35
<b>Figura 3.7</b> Generación de microsismos secundarios, $L$ corresponde a una zona de presión baja, $r$ es la distancia hacia la costa, $\Delta r$ distancia de retorno y $X$ el área de interferencia donde se producen ondas estacionarias con la mitad del periodo inicial (Modificado de Friedrich et al., 1998). .....	36
<b>Figura 3.8</b> Análisis del comportamiento de eventos de ruido sísmico de distintas fuentes en relación al modelo de Peterson (Pérez, 2010). .....	40
<b>Figura 4.1</b> Comparación entre el dominio de tiempo y frecuencia de una señal simple y una compleja. (a) muestra una señal simple en el dominio de tiempo, (b) muestra el dominio de frecuencia de la señal simple, (c) muestra una señal compleja en dominio de tiempo y (d) su respuesta en el dominio de frecuencia. (Modificado de Cooley y Tukey. 1965). .....	46
<b>Figura 4.2</b> Las potencias se promedian en octavas completas en intervalos de $1/8$ . Se muestran los puntos centrales del promedio para la estación de SDCO, (Modificado de McNamara & Boaz, 2006).....	48
<b>Figura 4.3</b> Distribución de las estaciones sísmicas que integran la Red Sísmica Nacional del Perú de acuerdo a su posición geográfica. ....	50
<b>Figura 4.4</b> PDF de la componente vertical de la estación de Mayorazgo (HUB0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. En áreas rojas, valores de probabilidad de tendencia elevada para horas del día y la tarde, esto debido actividades humanas.....	54
<b>Figura 4.5</b> PDF de la componente vertical de la estación de Yauca (YCA0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido sobrepasan el límite máximo permitido (círculos rojos) que podría estar relacionado al alto tránsito en las carreteras cercanas. ....	55
<b>Figura 4.6</b> PDF de la componente vertical de la estación de Quirihuac (QRHC para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Según las áreas rojas, el nivel de ruido se mantiene dentro de los límites máximo y mínimo permitido, el comportamiento es similar en las componentes horizontales.....	56
<b>Figura 4.7</b> PDF de la componente vertical de la estación NNA (en profundidad) y NNAP (en superficie) respectivamente, para horas de madrugada (00:0 –06:00).La estación NNA presenta menores niveles de ruido en comparación con la estación NNAP (ver círculos rojos). .....	57

<b>Figura 4.8</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Ñaña Internacional (NNA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. En este caso, el rango intermedio permanece dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). ....	58
<b>Figura 4.9</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Nuevo Chimbote (CBT2) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se presentan por encima del límite máximo establecido (círculos rojos). ....	59
<b>Figura 4.10</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Guadalupe (GUA0 para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se presentan dentro del límite máximo y mínimo establecido (círculos rojos). ....	60
<b>Figura 4.11</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Ñaña Internacional (NNA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se encuentran próximos al límite mínimo establecido (círculos rojos). 61	
<b>Figura 4.12</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Payapunku (PAYA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche (círculos rojos). ....	62
<b>Figura 4.13</b>	PDF de la componente vertical de la estación de La Victoria (LVIC) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche, El nivel de ruido se mantiene por debajo del límite máximo permitido para horas de la madrugada y aumenta sobrepasando este límite en horas de la tarde (círculos rojos). ....	64
<b>Figura 4.14</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Abra Patahuasi (APAT) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se mantienen estables y dentro de los rangos máximos y mínimos permitidos (círculos rojos). ....	65
<b>Figura 4.15</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Andaray (ANDY) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites establecidos, con un pico entre los 2 a 3 segundos generado por la actividad oceánica (círculos rojos). ....	66
<b>Figura 4.16</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Abra Patahuasi (APAT) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites establecidos (círculos rojos). ....	67
<b>Figura 4.17</b>	PDF de la componente vertical de la estación de Universidad del Altiplano (UNAP) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos). ....	68

<b>Figura 4.18</b> PDF de la componente horizontal (E) de la estación de Andaray (ANDY) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos). .....	69
<b>Figura 4.19</b> PDF de la componente horizontal Este (E) de la estación de Huancayo (HYOO) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos) .....	70
<b>Figura 4.20</b> PDF de la componente vertical de la estación de Iquitos (IQT0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran por encima del límite máximo establecido (círculos rojos). .....	71
<b>Figura 4.21</b> PDF de la componente vertical de la estación de Yurimaguas (YRM0) para horas de noche (18:00 – 00:00). El cálculo para valores mayores 0.1 segundos presenta alteraciones debido a la frecuencia de muestreo del equipo (círculo rojo). .....	72
<b>Figura 4.22</b> PDF de la componente vertical de la estación de Satipo (STPO) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los valores de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos). .....	73
<b>Figura 4.23</b> PDF de la componente vertical de la estación de Tocache (TOC0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruidos altos y cercanos al límite máximo establecido (círculos rojos). .....	74
<b>Figura 4.24</b> PDF de la componente vertical de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). .....	75
<b>Figura 4.25</b> PDF de la componente horizontal Norte (N) de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido son superiores al límite máximo establecido (círculos rojos). .....	76
<b>Figura 4.26</b> PDF de la componente vertical de la estación de Satipo (STPO) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). .....	77
<b>Figura 4.27</b> PDF de la componente horizontal Este (E) de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). .....	78
<b>Figura 4.28</b> PDF de la componente horizontal norte (N) y vertical (Z) de la estación de Guadalupe (GUA0). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos con picos de 2 a 3 segundos, debido a la actividad oceánica que ocurre cerca del litoral (círculos rojos). .....	79

<b>Figura 4.29</b> PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Guadalupe (GUA0). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). .....	80
<b>Figura 4.30</b> PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Abra Patahuasi (APAT). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos). .....	81
<b>Figura 4.31</b> PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Alto Perú (ALTO). Los niveles de ruido son menores en las componentes horizontales para temporadas de verano (círculos rojos). .....	82
<b>Figura 4.32</b> PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Mayorazgo (HUB0). Los niveles de ruido son menores y más estables en ambas componentes (círculos rojos). .....	83
<b>Figura 4.33</b> PDF de la componente horizontal norte (N) y vertical (Z) de la estación de Portachuelo (PCH0), muestran valores superiores al límite máximo establecido (círculos rojos). .....	84
<b>Figura 4.34</b> Valor de la moda estadística (línea negra) determinado a partir del PDF calculado. ....	85
<b>Figura 4.35</b> a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada del invierno 2018 (mes de junio) Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos intermedios (3 - 6 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional: temporada de invierno 2018. ....	87
<b>Figura 4.36</b> a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de verano 2018 (mes de diciembre) Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos intermedios (3 -6 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional: temporada de verano 2018. ....	88
<b>Figura 4.37</b> a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de invierno 2018 (mes de junio). Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos largos (50 - 70 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional en temporada de invierno 2018. ....	90
<b>Figura 4.38</b> a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de verano 2018 (mes de diciembre). Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos largos (50 - 70 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional en temporada de verano 2018. ....	91
<b>Figura 5.1</b> Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Costera. ....	93

<b>Figura 5.2</b> Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Andina.....	94
<b>Figura 5.3</b> Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Amazónica.....	95
<b>Figura 5.4</b> Determinación de límites mínimos y máximos obtenidos a partir de los valores de la moda estadística para las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú (líneas rojas).....	96

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b>	Ubicación de las estaciones pertenecientes a la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el Instituto Geofísico del Perú.....	26
<b>Tabla 3.1</b>	Valores de densidad de potencia espectral de aceleración, velocidad y desplazamiento para NHNM del modelo de Peterson (1993).....	33
<b>Tabla 3.2</b>	Valores de densidad de potencia espectral de aceleración, velocidad y desplazamiento para NLNM del modelo de Peterson (1993).....	33
<b>Tabla 4.1</b>	Clasificación de las estaciones de acuerdo a su posición geográfica.....	49
<b>Tabla 4.2</b>	Información geológica de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú.....	51
<b>Tabla 5.1</b>	Niveles de ruido de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú en diferentes rangos de interés.....	99

## RESUMEN

En el Perú, se encuentran instaladas 56 estaciones sísmicas de banda ancha de la Red Sísmica Nacional. El objetivo del presente estudio, es analizar los niveles de ruido sísmico presentes en estas estaciones, para luego determinar límites mínimos y máximos que sigan la tendencia del ruido presente. Los registros fueron analizados usando la función de probabilidad de la potencia del espectro de densidad, en base a la metodología desarrollada por Peterson (1993) y Mc Namara & Bulland (2004). De acuerdo al análisis diurno, se evidencia al ruido generado por actividades culturales en periodos cortos ( $< 1s$ ), donde los valores más altos son registrados de día en comparación con la noche. Además, con el análisis estacional, se observa el ruido generado por fuentes naturales como la actividad microsísmica oceánica y la variación de presión atmosférica, que afectan a periodos intermedios (1-15s) y periodos largos ( $>15s$ ) respectivamente. A partir de estos resultados, se pudo determinar límites mínimos y máximos de niveles de ruido sísmico, donde el límite mínimo establecido es mayor en 18 dB al límite mínimo global, esto se debe a la instalación en superficie de los sismómetros. Los periodos largos tienen valores de 7 dB por encima del límite máximo global, el cual está relacionado con la posición en superficie del sensor sísmico y la interacción de la variación atmosférica con el suelo donde está instalada. Para periodos menores a 0.3, la diferencia con el límite máximo global es de 8 dB, lo que indica menor presencia de ruido.

Palabras clave: Ruido Sísmico, RSN, periodos cortos, intermedios y largos.

## ABSTRACT

In Peru, 56 broadband seismic stations of the National Seismic Network are installed. The objective of this study is to analyze the levels of seismic noise present in these stations, and then determine minimum and maximum limits that follow the trend of present noise. The records were analyzed using the probability function of the power of the density spectrum, based on the methodology developed by Peterson (1993) and Mc Namara & Bulland (2004). According to the daytime analysis, the noise generated by cultural activities in short periods (<1s) is evidenced, where the highest values are recorded during the day compared to the night. Furthermore, with seasonal analysis, noise generated by natural sources such as oceanic microseismic activity and atmospheric pressure variation is observed, affecting intermediate periods (1-15s) and long periods (> 15s) respectively. From these results, it was possible to determine minimum and maximum limits of seismic noise levels, where the established minimum limit is 18 dB higher than the global minimum limit, this is due to the surface installation of the seismometers. Long periods have values of 7 dB above the global maximum limit, which is related to the surface position of the seismic sensor and the interaction of atmospheric variation with the ground where it is installed. For periods less than 0.3, the difference with the global maximum limit is 8 dB, which indicates less presence of noise.

Keywords: Seismic Noise, RSN and short, intermediate and long periods.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Históricamente, la sismología ha buscado nuevas formas de obtener datos sísmicos de calidad, a medida que nuevas metodologías surgían, el análisis más detallado de aquellos factores como el ruido sísmico se hacían más evidentes, siendo este un nuevo punto sobre el cual más estudios se hacían necesarios. De la misma manera que el ruido sísmico empezó a tomar importancia, surgieron varias maneras de identificar aquellos niveles bajo los cuales se consideraba correcta la operación de una estación sísmica.

Inicialmente, el ruido sísmico fue relacionado con la presencia de microsismos, los cuales en un principio fueron analizados por Bertelli en 1878, quien, con ayuda de un péndulo, realizó observaciones durante muchos años y a determinadas horas del día. De estos resultados, Bertelli determinó que las variaciones en las oscilaciones coincidían con eventos telesísmicos y cambios de presión atmosférica, en algunos casos acreditaba que eran a causa de la acción de los vientos y mareas. Además, noto algunas diferencias en la amplitud de las formas ondas, de acuerdo a periodos estacionales, estas aumentaban en temporadas de invierno y disminuían en días de verano. A partir de estos análisis, se realizaron varios estudios en distintas partes del mundo (Moreno y Alfaro, 2000). De los estudios posteriores, surgieron muchas teorías sobre las cuales dos tomaron gran importancia, la primera indica que los microsismos son provocados por las variaciones en las presiones atmosféricas (Whipple, 1935) y la segunda, asegura que los microsismos son originados por la interacción de las olas con las costas y la energía se transmitía a través de estos produciendo efectos de resonancia (Zanon. 1938).

Debido a que las fuentes de ruido sísmico son variables, tal como lo menciona Bormann (2002), estas pueden agruparse de acuerdo a su comportamiento en tres niveles, la primera con respecto al origen oceánico y son conocidos como microsismos oceánicos donde la energía del golpe de las olas se distribuye a través de los medios, con periodos de 1 a 15s. El segundo grupo lo conforman los ruidos de periodos cortos que se atribuyen principalmente al ruido cultural (originado por actividades humanas) y algunas causas naturales (como vientos de periodo corto o la presencia de riachuelos), los periodos sobre los cuales actúan

son menores a 1s. El último grupo, que trata de ruidos de periodos largos, son causados por fluctuaciones de presión barométrica, vientos de periodos largos y cambios de temperatura, usualmente esto se nota en periodos mayores a 15s.

En 1959, Brune y Oliver mostraron el primer modelo de curvas del nivel mínimo y máximo de ruido en función del periodo del movimiento del suelo. Posteriormente, Peterson en 1993, estableció un nuevo modelo global de niveles máximos y mínimos de ruido de acuerdo a la densidad espectral de potencia de aceleración o PSD, desarrollado a través de registros obtenidos de 75 estaciones distribuidas en el mundo y pertenecientes a Red Global Sismográfica (Global Seismographic Network, GSN). McNamara, en el 2004, complementa la metodología desarrollada por Peterson, en donde la distribución frecuencial del ruido se da respecto a la Función de Probabilidad de Densidad del Espectro o PDF y es a partir de estos modelos, que los nuevos estudios realizan comparaciones de los niveles de ruido obtenidos de las estaciones sísmicas regionales de cada ciudad o país, definiendo entonces, la calidad de registros obtenidos en cada estación y el nivel de ruido sobre el cual se encuentran sometidos.

Como el Perú se encuentra en una zona tectónicamente activa, fue necesario la instalación de una red sísmica denominada Red Sísmica Nacional bajo la administración del Instituto Geofísico del Perú, que a medida que pasa el tiempo el número de estaciones va aumentando, llegando a tener hasta la fecha, 56 estaciones con sensores de banda ancha y con transmisión por satélite. Dado que la geología es compleja dentro del territorio peruano, la instalación de cada estación sísmica no fue necesariamente sobre material rocoso o fuertemente consolidado, sino que se consideró algunas otras características importantes como la topografía, accesibilidad, fuentes de energía, entre otros, por lo que es necesario analizar y evaluar los niveles de ruido de cada estación, para compararlas con el modelo global de ruido sísmico descrito por Peterson (1993) y McNamara (2004).

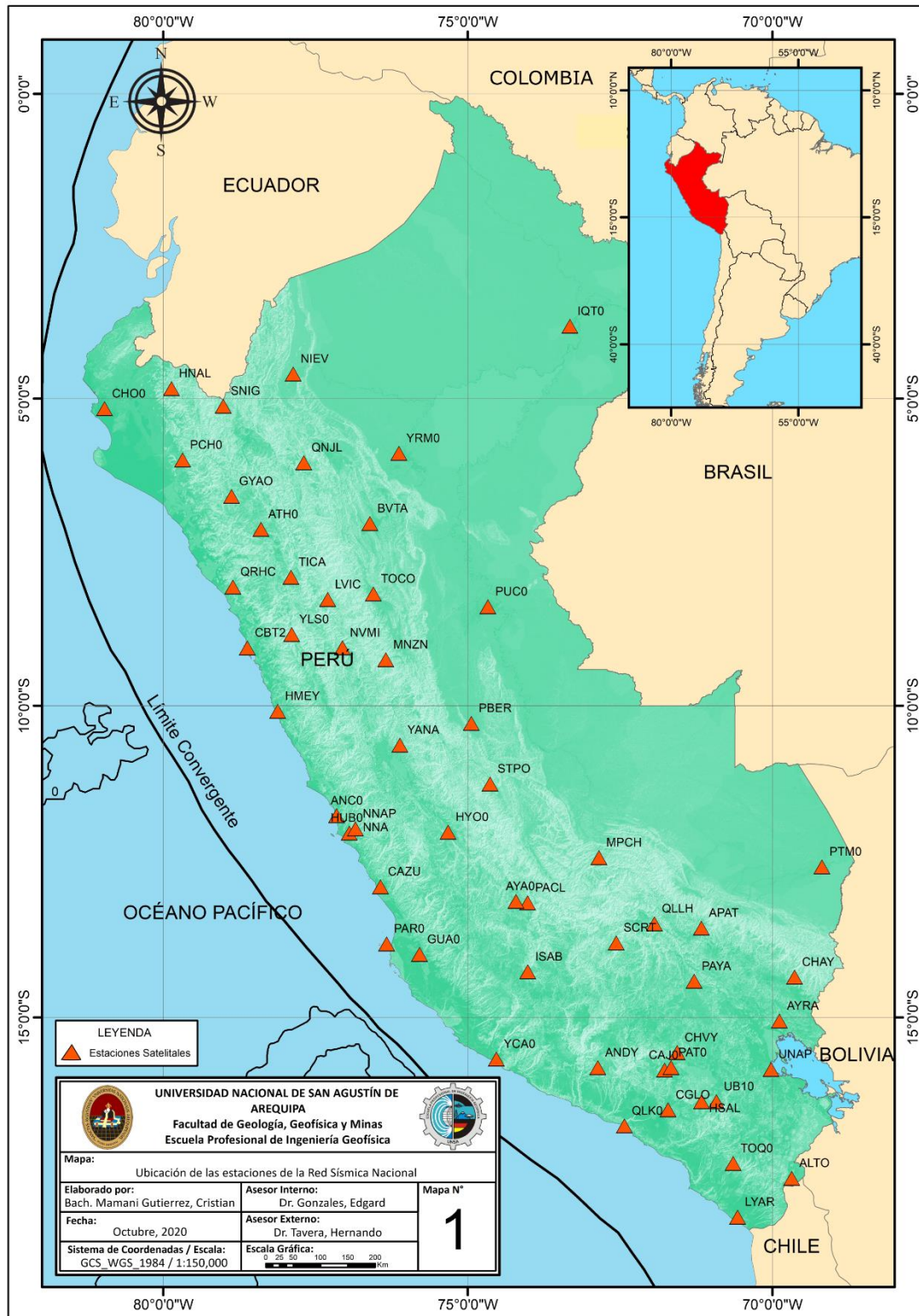
Por lo expuesto anteriormente, en el presente estudio se evaluará los niveles de ruido mínimos y máximos del ruido sísmico presente en la moderna Red Sísmica Nacional administrada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y para ello, este estudio se ha dividido en 5 capítulos, que en secuencia permiten desarrollar y lograr los objetivos propuestos. El Capítulo I, se enfoca en el área de estudio, formulación del problema, justificación, objetivos, hipótesis y

antecedentes. En el Capítulo II, se presentan conceptos básicos de sensores y las características de estos de acuerdo al desarrollo de la sismometría, además de la información concerniente a las redes sísmicas, detallando el objetivo y las características que estas presentan de acuerdo a su posición geográfica, se tomará a la Red Sísmica Nacional del Perú como ejemplo de emplazamiento de una red sísmica. Dentro del Capítulo III, se mencionan las fuentes y características del ruido sísmico, así como también los criterios físico-matemáticos necesarios para su evaluación y caracterización. En el Capítulo IV, se procesará y analizará la información, considerando los comportamientos diurnos y estaciones del ruido sísmico, para de esta manera, conocer los niveles de ruido de cada una de las estaciones sísmicas. En el Capítulo V, se presentan los resultados obtenidos sobre los niveles de ruido sísmico, generando un modelo de límites Mínimos y Máximos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron en el presente estudio.

## **1.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio comprende todo el Perú, el cual, geográficamente está ubicada en la parte oeste de América del Sur, limitando al norte con Ecuador y Colombia, al este con Brasil y Bolivia, al sur con Chile y al oeste con el Océano Pacífico. Tectónicamente está ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico y yace sobre la placa litosférica Sudamericana, la cual choca en su borde occidental, con la placa de Nazca, formando un límite de convergencia.

Dentro del Perú, se encuentran distribuidas estratégicamente 56 estaciones de banda ancha con transmisión satelital, pertenecientes a la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el IGP (ver Figura 1.1).



*Figura 1.1; Ubicación de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el Instituto Geofísico del Perú en el año 2019.*

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Perú, al formar parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, está sometido a un alto nivel de sismicidad, debido a la interacción de la placa Sudamericana y la placa de Nazca, por lo que el cálculo de los parámetros sísmicos es muy importante. Debido a esto, es necesaria la ubicación estratégica de estaciones sísmicas a lo largo del país, la cual, no siempre se da en una zona libre de ruido sísmico, esto a causa de que los factores espaciales (geología, demografía, clima, etc.) y temporales (día/noche, estaciones del año, etc.) no son los mismos en todo el territorio peruano. Para esto es necesario conocer aquellos niveles de ruido que afectan a cada estación sísmica y poder generar un modelo de límites mínimos y máximos de niveles de Ruido Sísmico que ayuden a controlar y mejorar la calidad de las señales sísmicas registradas.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación si se justifica, porque al conocer los niveles de Ruido Sísmico en cada una de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú y generar un modelo de límites mínimos y máximos a partir de estos niveles, se puede controlar y mejorar calidad de las señales registrados por estas estaciones. Este modelo generado podría ayudar a controlar los niveles de ruido de futuras estaciones que se quieran instalar.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Determinar los límites mínimos y máximos de los niveles de Ruido Sísmico en las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú, administrada por el Instituto Geofísico del Perú.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la Función de Probabilidad de Densidad o PDF del espectro de los registros de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú.
- Analizar y evaluar el Ruido Sísmico existente en cada estación sísmica.
- Analizar las variaciones diurnas y estacionales de cada estación sísmica.
- Evaluar el comportamiento geográfico del ruido sísmico presente en la Red Sísmica Nacional del Perú.

## 1.5 HIPÓTESIS

Mediante la determinación de límites mínimos y máximos de los niveles de Ruido Sísmico, es posible establecer un nuevo modelo que permitirá controlar y mejorar la calidad de las señales sísmicas registradas por la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el Instituto Geofísico del Perú

## 1.6 ANTECEDENTES

En el pasado se han realizado hasta 2 estudios que han contribuido a analizar los niveles de ruido de las estaciones que en cada año integraban la Red Sísmica Nacional administrada por el Instituto Geofísico del Perú. Las principales contribuciones de estos estudios fueron:

- En el estudio, **“Análisis de los Niveles de Ruido Sísmico en Estaciones Sísmicas de Banda Ancha de la Red Sísmica Nacional del Perú”**, realizado por Cutipa (2006), permitió analizar los niveles de ruido sísmico de 9 estaciones sísmicas de banda ancha que en ese año constituían la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el IGP. Los registros se analizaron en rangos de frecuencias de 0.01 a 10 Hz, tomando en cuenta las distintas características geológicas sobre las cuales se instalaron las estaciones y la distancia de aquellas a las fuentes de ruido natural y cultural. Los resultados obtenidos han demostrado que dentro del rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz, el incremento en las amplitudes del nivel de ruido están relacionados el ruido producido por la actividad diaria del hombre (ruido cultural), lluvia, viento y el tipo de suelo sobre el cual se encuentra ubicado el sensor sísmico. Las estaciones sísmicas que presentaron mayores amplitudes en este rango de frecuencias son PUC (Estación Sísmica de Pucallpa), CTH (Estación Sísmica de Cotahuasi) y CAJ (Estación Sísmica de Cajamarca) por encontrarse sobre suelos poco consolidados y cerca de fuentes de ruido cultural (centros poblados y carreteras). Sin embargo, para el rango de frecuencias entre 0.1 a 1 Hz el ruido está relacionado con las ondas oceánicas producidas por el fuerte oleaje en el interior del océano y la mayoría de las estaciones sísmicas de banda ancha en este rango de frecuencias presentan bajos niveles de ruido y cercanas a la curva de mínimo valor establecida por Peterson (1993). Esto se debe posiblemente a que las estaciones se encuentran en

continente y alejadas de esta fuente de ruido natural. A las bajas frecuencias entre 0.01 a 0.1 Hz todas las estaciones presentan altos valores de amplitud en los niveles de ruido, siendo las componentes horizontales N y E las que presentan mayores amplitudes que la componente vertical (Z). En general en este rango de frecuencias el ruido estaría asociado a las fluctuaciones locales de la presión atmosférica y debida a que los sensores se encuentran ubicados muy cerca de la superficie del terreno.

- En el estudio **“Evaluación de los Niveles de Ruido Sísmico en la Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú”**, realizado por Medina (2016), evaluó el contenido de ruido en los registros de 22 estaciones sísmicas de banda ancha de la red sísmica satelital, dentro de un rango espectral comprendido entre 65 y 0.04 segundos.

Según el autor, en las estaciones que se encuentran ubicadas en el antearco, el ruido sísmico se presentó dentro de los límites permitidos (Modelo de ruido máximo y mínimo desarrollado por Peterson en 1993), debido a que, en su mayoría, las estaciones se encuentran ubicadas en suelos consolidados.

En cuanto a las estaciones ubicadas en el arco continental, presentaron niveles de ruidos muy variables (a diferencia de los ubicados en el antearco) y son más notorios en los periodos largos y cortos. En este punto los microsismos generados por la dinámica del océano no afectaron a estas estaciones por su lejanía, pero si aquellas fuentes como la presión atmosférica, tal es el caso de la estación de YLS (Estación Sísmica de Huaylas), donde los valores de decibeles superan los 20 dB respecto al promedio.

Las estaciones ubicadas en el trasarco presentan niveles de ruidos moderados, sin embargo, en las estaciones de PUC (Estación Sísmica de Pucallpa), IQT (Estación Sísmica de Iquitos) y YRM (Estación Sísmica de Yurimaguas) presentan mayores niveles y variabilidad del ruido sísmico en periodos cortos.

## CAPITULO II

### INSTRUMENTACIÓN Y REDES SÍSMICAS

#### 2.1 SENSORES

De acuerdo a Havskov (2004), los sensores sísmicos modernos registran el movimiento del suelo y lo representan en voltajes y puede ser descrito como; desplazamiento, velocidad o aceleración. Dado a que las medidas son hechas respecto a un plano de referencia, el principio de inercia dicta que solo movimientos que causen aceleración pueden ser medidos. Así, el principio de todos los sensores es que tenga una masa que debe moverse en relación al plano de referencia en respuesta a la aceleración del terreno.

Existen básicamente dos tipos de sensores o sismómetros, el primero sigue el principio de inercia, el cual mide el movimiento relativo del suelo respecto a una referencia inercial (masa suspendida) y el segundo lo comprenden los extensómetros, los cuales miden el movimiento relativo de un punto en el suelo respecto a otro. Como el movimiento relativo del suelo en muchos casos es más largo que un movimiento diferencial dentro de un rango dimensionado de valores (como es el caso de los extensómetros) es que se opta por el uso de sismómetros inerciales, sin embargo, cuando se presentan bajas frecuencias es muy difícil mantener estable la masa suspendida, a pesar de ello, estos son la mejor opción para medir el movimiento originado por eventos sísmicos (Wielandt, 2002).

Como se mencionó anteriormente, los sensores más usados son aquellos que siguen el principio de inercia, además, estos deben presentar algunas características esenciales, tales como; alta sensibilidad a la detección de vibraciones terrestres, operación de forma continua, poseer tiempo absoluto para registrar el movimiento en función del tiempo y una respuesta lineal a un rango específico de frecuencias.

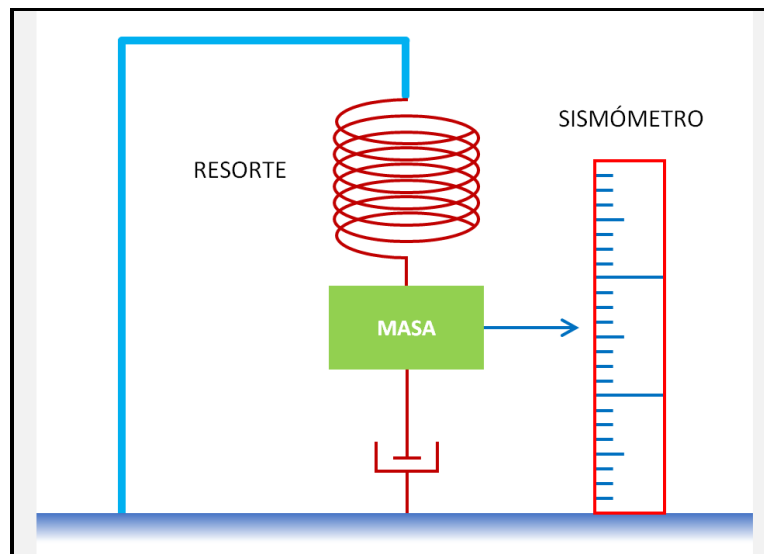
En la actualidad los sismómetros son usados para registrar las vibraciones originadas en el interior y la superficie de la tierra, estas vibraciones registradas son analizadas posteriormente para; estudiar los parámetros de los sismos ocurridos (localización del epicentro e hipocentro, tamaño del sismo expresado en magnitud e intensidad, procesos de ruptura, entre otros), información del viaje de la onda sísmica a través de los medios,

efectos de sitio (comportamiento del terreno frente a un evento sísmico), sus efectos en estructuras y la creación de sistemas de monitoreo.

### 2.1.1 Sismómetro inercial estándar

Como las medidas son hechas en un plano de referencia, muchos de los sensores son basados en una masa suspendida, la cual tenderá a permanecer en su punto de origen cuando ocurra algún tipo de movimiento externo. El movimiento relativo entre la masa suspendida y el terreno será una función del movimiento del suelo (Havskov y Alguacil, 2002).

La Figura 2.1 muestra el esquema de un sismómetro mecánico que mide el movimiento vertical del suelo. Este consiste en una masa suspendida por un resorte, el movimiento de la masa es controlada para que este no exceda la frecuencia de resonancia del sistema (sistema que alcanza el grado máximo de oscilación), una regla es acoplada a la derecha para medir el desplazamiento vertical de la masa ante un movimiento de la tierra. En el esquema, la regla representa el papel que gira y se pinta a medida que pasa el tiempo, representando entonces en forma gráfica el movimiento del suelo.



**Figura 2.1;** Sismómetro inercial mecánico, (Modificado de Havskov y Alguacil, 2002).

La función de respuesta de frecuencia de desplazamiento, está definida por:

$$T_d(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0h} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

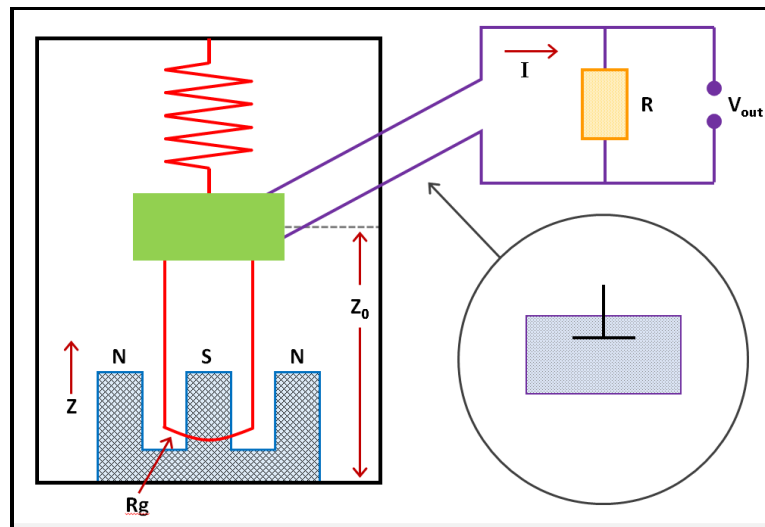
$\omega_0$  : Frecuencia de resonancia de la masa- resorte.

$\omega$  : Frecuencia angular del sistema.

$h$  : Fuerza de amortiguamiento constante.

### 2.1.2 Sismómetros electromagnéticos

También conocidos como sismómetros de transductores de velocidad, siguen el mismo principio de los sismómetros inerciales ya que miden el movimiento de una masa respecto al movimiento del terreno. Este se basa en tener una bobina dentro en un campo magnético que se mueve con la masa (ver Figura 2.2). El factor de salida de la bobina es proporcional a la velocidad de la masa en relación con un plano de referencia, por lo tanto, ocurre un proceso de transducción de velocidad (Havskov, 2002).



**Figura 2.2;** Modelo de un sensor electromagnético (Modificado de Scherbaum, 1996).

En la figura anterior, “ $R_g$ ” representa la resistencia de la bobina, el resistor de amortiguamiento es “ $R$ ” y el voltaje de salida es “ $V_{out}$ ”, “ $N$ ” y “ $S$ ” representan

las polaridades del imán. El tope del amortiguamiento ha sido reemplazado por el amortiguamiento de la bobina móvil en el campo magnético (Scherbaum, 1996). La señal de la bobina hace posible la amortiguación del sismómetro de una forma más sencilla, dando esta señal mediante un resistor. Cuando la corriente es generada por la señal de la bobina, esta se opone al movimiento de la masa con una fuerza magnética proporcional.

La función de respuesta de frecuencia para un sensor electromagnético es diferente al de un sensor mecánico,  $Z(\omega)$  es descrita como la señal de salida, con el transductor de velocidad, la señal de salida observada es un voltaje proporcional a la velocidad de la masa  $\dot{Z}(\omega) = i\omega Z(\omega)$  y  $G$  (generador constante, relaciona la velocidad del terreno con la salida de la bobina, sus unidades están representadas en  $V/ms^{-1}$ ). En vez de  $Z(\omega)$ , la respuesta de desplazamiento para un sensor de velocidad está dado como:

$$T_d^v(\omega) = \frac{\dot{Z}(\omega)}{U(\omega)} G = \frac{i\omega\omega^2 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} = \frac{i\omega^3 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Se puede notar que la única diferencia en comparación con el sensor mecánico son los factores  $G$  e  $i\omega$ .

### 2.1.3 Sismómetros triaxiales

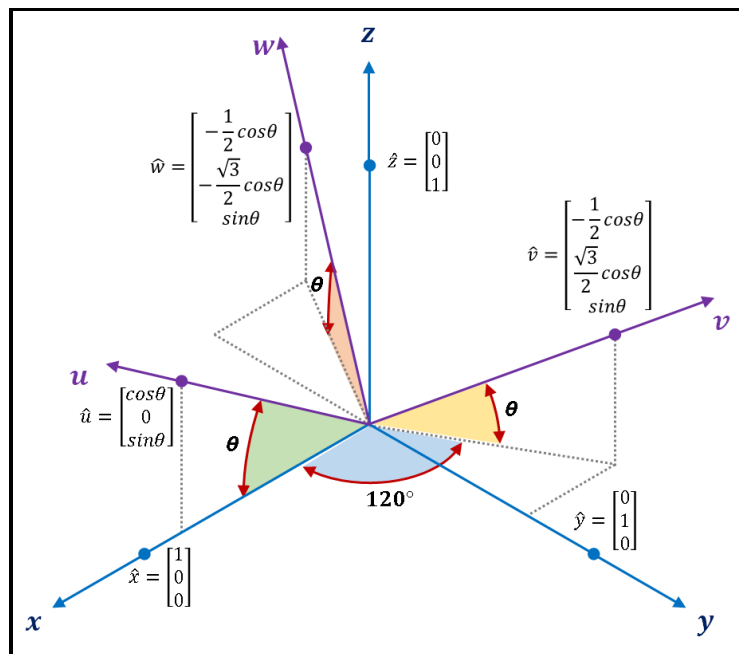
Este tipo de sismómetro provee tres señales de salida que representan de forma ortogonal el movimiento del suelo en las direcciones Norte, Este y Vertical (X, Y y Z) del sismómetro.

Inicialmente, los sismómetros triaxiales presentaban un diseño diferente en los elementos del sensor vertical respecto a los sensores horizontales, por lo que la constante de aceleración de gravedad que actúa en la dirección vertical no se presentaba en las direcciones horizontales, esto implicaba que las componentes horizontales y la vertical presentan diferentes condiciones para las medidas (Townsend, 2014).

Con el fin de tener las mismas características en las tres componentes, Galperin (1955), propuso una configuración alternativa, en donde los tres sensores estén dispuestos de tal manera que les permita ser idénticos en todos los aspectos. Esto es posible mediante la rotación ortogonal de los ejes de los sensores desde un plano

de referencia XYZ a una orientación donde cada uno de los tres ejes es inclinado respecto a un plano horizontal en el mismo ángulo.

La Figura 2.3 muestra el arreglo de un sismómetro triaxial simétrico, las nuevas direcciones UVW se encuentran superpuestas sobre XYZ, creando un nuevo sistema de coordenadas. Las proyecciones de estos tres nuevos ejes en el plano horizontal son líneas separadas radialmente desde el centro con un espacio igual a  $120^\circ$ . Este tipo de arreglo es conocido como simétrico, debido a que los ejes presentan la misma proporción de aceleración gravitacional. Es posible escoger algún ángulo de inclinación hacia arriba para los tres ejes, el cual debe de ser el mismo para cada caso, por ejemplo, considerar a  $\theta = \tan^{-1}(1/\sqrt{2}) \cong 35.26^\circ$  que también hace que los ejes UVW sean mutuamente ortogonales



**Figura 2.3;** Vista isométrica del sistema de coordenadas UVW y XYZ de un sismómetro triaxial simétrico (Modificado de Townsend, 2014).

La trigonometría de este arreglo, representa un cubo balanceado que resulta en un ángulo formado entre cualquiera de los ejes UVW en el plano horizontal siendo  $\cong 35.26^\circ$ , y el ángulo complementario con respecto a la vertical sería  $90^\circ - 35.26^\circ \cong 54.74^\circ$ .

Las señales XYZ pueden ser derivadas fácilmente de las señales UVW usando una transformación algebraica vectorial:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

E inversamente:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & 0 & \sqrt{2} \\ -1 & \sqrt{3} & \sqrt{2} \\ -1 & -\sqrt{3} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

#### 2.1.4 Curvas de respuesta del instrumento

Como ya se conoce la respuesta generada por el desplazamiento, es necesario conocer también la función de respuesta para la velocidad y aceleración.

De la ecuación 2.2 para la función de respuesta del desplazamiento:

$$T_d(\omega) = \frac{Z(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Si se reemplaza  $U(\omega)$  con  $\dot{U}(\omega) = i\omega U(\omega)$ , la función de respuesta para la velocidad sería:

$$T_v(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\dot{U}(\omega)} = \frac{-i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

De manera similar, la función de respuesta de la aceleración será:

$$T_a(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\ddot{U}(\omega)} = \frac{-1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

De igual manera, la función de respuesta de velocidad para los sensores de velocidad, están dados por:

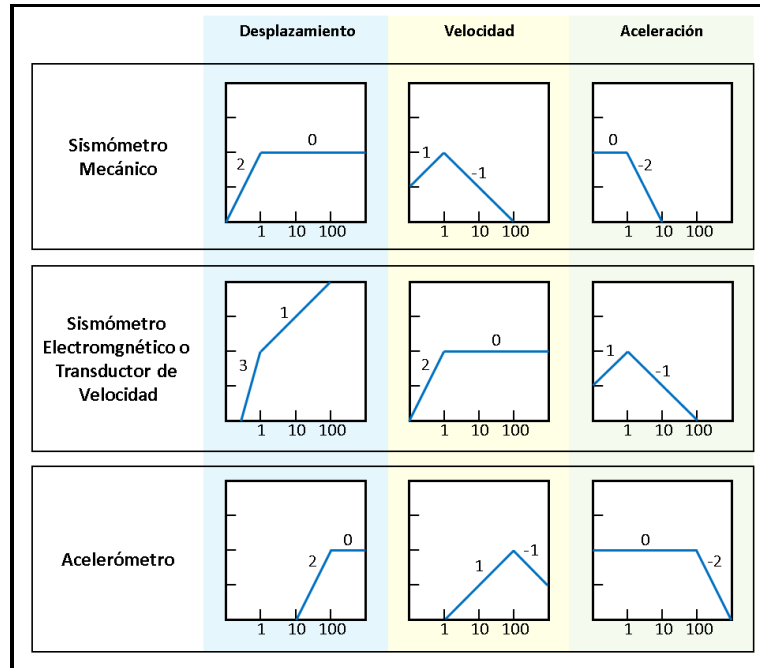
$$T_v^v(\omega) = \frac{\omega^3}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Para la aceleración:

$$T_a^v(\omega) = \frac{-i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Si el sensor fuera un acelerómetro, las curvas de respuesta serían las mismas que para el sensor de velocidad multiplicado por  $i\omega$ .

Por lo tanto, es fácil convertir un tipo de curva a otra, ya que únicamente se trata de multiplicar o dividir con  $\omega$  (o  $i\omega$  para la respuesta compleja). A continuación, en la Figura 2.4 se muestra los gráficos de cada respuesta de frecuencia para cada tipo de sensor.



*Figura 2.4; Gráfico de respuesta de frecuencia de amplitud de un sensor mecánico de 1Hz (arriba), sensor electromagnético de velocidad de 1 Hz (medio) y un acelerómetro de 100 Hz (abajo). (Modificado de Havskov y Alguacil, 2002).*

## 2.2 TIPOS DE SISMÓMETROS

En su mayoría, la fabricación de sismómetros se da de acuerdo a las necesidades requeridas, que por lo general dependen básicamente del ancho de banda de recepción y el rango dinámico. El ancho de banda se basa en la información que se tiene que adquirir, ya sea para eventos regionales o locales, además del tipo de repuesta que se espera, como desplazamiento, velocidad o aceleración.

Como menciona Jaiswal (2008), existen tres tipos principales de sismómetros de acuerdo a su ancho de banda, los cuales son descritos a continuación:

### 2.2.1 Sismómetros de Periodo Largo

Si el periodo natural del sismómetro es mucho más grande que el periodo de vibración de la tierra, el registro se vuelve proporcional al desplazamiento de la

tierra. Este sismómetro es llamado medidor de desplazamiento. Está diseñado usualmente para registrar señales con frecuencias entre 0.01 a 0.1 Hz (periodos en el rango de 10 a 100 s). Este tipo de sismómetro brinda información acerca de estudios de sismos regionales y telesísmicos.

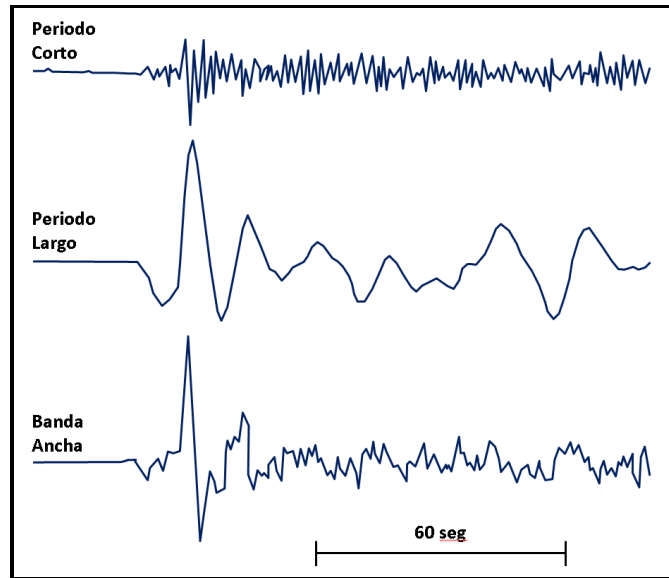
### **2.2.2 Sismómetros de periodo corto**

Si el periodo natural del sismómetro es mucho más pequeño que el periodo de vibración de la tierra, entonces, el desplazamiento del sismómetro se vuelve proporcional a la aceleración de la vibración de la tierra. Este sismómetro está diseñado para registrar señales de frecuencias entre 1 y 10 Hz (periodos de 0.1 a 1 s). La información registrada puede ayudar a entender los efectos de un sismo en las estructuras hechas por el hombre. Este sismómetro es usado solo para estudios de sismos locales, debido a que son centrados en el análisis de riesgos, que en su mayoría se trata de estructuras.

### **2.2.3 Sismómetros de banda ancha**

Un sensor de banda ancha (como los sismómetros de tres componentes o triaxiales), son capaces de medir movimientos con frecuencias que varían entre los 0.01 Hz hasta los 10 Hz, en algunos casos superan los 60 Hz. Este tipo de sismómetros registran señales de periodo corto y largo incluyendo periodos intermedios de 10 a 1 s. Además, son útiles para estudios de sismicidad local, regional y telesísmica. Dentro de este ancho de banda, también se puede dar el registro de ruido de fondo que en algunos casos lo convierte en una desventaja.

La Figura 2.5, muestra la diferencia del registro de una misma señal correspondiente a los distintos tipos de sismómetros de acuerdo a su ancho de banda, los cuales fueron descritos anteriormente. Estos registros corresponden a valores de velocidad, en donde además de la señal del evento, también se presenta señales producidas por otras fuentes.



*Figura 2.5; Comparación entre los registros de un mismo evento en sismómetros de periodo largo, periodo corto de y sismómetros de banda ancha (Jaiswal, 2008).*

### 2.3 REDES SÍSMICAS

En general, se puede definir a una red sísmica como un grupo de estaciones operando conjuntamente para la colección de señales sísmicas.

Antes de los 60's, las estaciones registraban estas señales, los cuales usualmente eran enviados a algún centro de procesamiento para su posterior análisis. Si muchas estaciones operaban en algún país o región, se podía hablar entonces de una red sísmica. Sin embargo, el tiempo que tomaban estas estaciones en otorgar los registros, eran largos, comparados con las redes modernas. Dado que la comunicación difícilmente podía ser en tiempo real, hasta la llegada de la transmisión de señal por radio, era difícil crear un sistema de alertas y monitoreo. A medida que evolucionaban las capacidades de comunicación, se podían recibir los registros en tiempo real, mejorando enormemente los sistemas de alerta y monitoreo (Trnkoczy y Havskov, 2011).

### 2.4 CONSIDERACIONES PARA LA UBICACIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS

El procedimiento para la ubicación de una estación sísmica, en la mayoría de los casos, requiere de un estudio general externo, este estudio debe de hacerse primero y antes definir una posible ubicación. Son muchas las medidas necesarias que se deben tomar en cuenta antes de ubicar una estación, esto porque la información recolectada tiene que

mostrar la calidad requerida, sin ser interferida por algún factor externo a lo largo del tiempo de funcionamiento.

A continuación, se describe las consideraciones mínimas que se debería tener al momento de instalar una estación sísmica, esto de acuerdo a Trnkoczy (2011).

#### **2.4.1 Región geográfica de interés**

Para esto es necesario conocer y tener información sísmica (catálogos sísmicos, mapas sísmicos, etc.) y geológica (como mapas de fallas) de la zona, para de esta manera poder determinar si el interés de la red sísmica es local o regional. Las características sismotectónicas de una zona ayudan a comprender el comportamiento sísmico de esta, ya sean zonas de convergencia, divergencia etc.

#### **2.4.2 Topografía**

Otro aspecto a considerar es la topografía, ya que esta, puede influir de manera impredecible y desfavorable en la forma de onda sísmica y la amplitud de la señal. Además, los picos de las montañas pueden ser muy susceptibles a los ruidos sísmicos generados por los vientos y rayos. Por lo tanto, es aconsejable ubicarlos, si es posible, en zonas donde la topografía presente cambios moderados.

La topografía, también debe de considerarse, si se va a dar la instalación de algún tipo de comunicación como la radio-frecuencia, ya que estos necesitan ubicarse en zonas altas para que no exista interferencia al momento de enviar la señal.

#### **2.4.3 Acceso a las estaciones**

Las estaciones sísmicas usualmente son colocadas en zonas muy lejanas, lo más distante posible de las actividades humanas, esto puede resultar en accesos relativamente difíciles. Como las estaciones no deben estar cerca de rutas de vehículos, se deberá encontrar una relación compensada entre la lejanía y el acceso. Normalmente las estaciones que se encuentran lejos, son más costosas en cuanto a su establecimiento y mantenimiento, por consiguiente, estos procesos resultan ser inadecuados y el tiempo de reparación se torna mucho más largo.

Algunos mapas de vías establecidas pueden ayudar a definir posibles accesos, además las imágenes satelitales, las cuales son una buena herramienta.

#### **2.4.4 Evaluación de las fuentes de ruido sísmico**

La evaluación de las fuentes de ruido sísmico natural o artificial en la zona, es una primera etapa de un estudio de ruido sísmico adecuado, seguido este punto, se debe hacer unas medidas de ruido en el campo. Algunas carreteras transcurridas, grandes zonas industriales o mineras, zonas agrícolas extensamente explotadas, y otras fuentes artificiales que generan ruidos, además de fuentes naturales como el océano, los ríos, vientos y tormentas eléctricas, se deben de tener en cuenta para el análisis adecuado del ruido sísmico presente.

Mapas demográficos, pueden ayudar a reconocer zonas con un alto índice de transitabilidad de personas y actividades hechas por estas mismas. Además, los mapas con información de condiciones meteorológicas en una determinada área pueden ser obtenida con el fin de evitar aquellos ruidos generados por cambios estacionales que generan ruido sísmico.

#### **2.4.5 Transmisión de datos sísmicos y fuentes de energía**

En muchos casos, se debe tener en cuenta la manera en que los datos serán transmitidos, ya sea por medio de radio-telemetría, internet o de manera satelital. Si se tratase de radios, se debe considerar que la topografía no sea abrupta ni se encuentre en una zona con presencia de paredes verticales a los alrededores que puedan interferir en el envío de información.

La energía que debe de ser suministrada para cada tipo de medio de comunicación debe de contar con una fuente, ya sea si se da por medio de alguna línea de transmisión de energía eléctrica o una batería (donde se debe tomar en cuenta el periodo de duración para establecer un cronograma de cambio por baterías nuevas o cargadas). En muchos casos es difícil contar con alguna línea de transmisión eléctrica cerca, por lo que se opta por fuentes de energía provenientes de un medio natural, como la energía solar o eólica, el uso de paneles solares o turbinas eólicas, son una fuente muy favorable cuando las estaciones se encuentra lejos.

#### **2.4.6 Uso futuro del terreno y propietario**

Durante el planeamiento de la ubicación de una estación, es necesario considerar si el terreno sobre el cual se ubicará la estación es propiedad de alguna persona o

si este presenta planes futuros, tales como; zonas de agricultura, carreteras, apertura de una nueva mina, entre otros. Con este punto se puede estimar el tiempo que la estación puede funcionar sin ningún inconveniente.

#### **2.4.7 Condiciones climáticas**

Muchos parámetros climáticos pueden influenciar en la ubicación de una estación sísmica. Estudios meteorológicos nacionales o regionales, pueden proveer este tipo de información.

A continuación, se muestran algunos parámetros importantes a considerar:

- La temperatura máxima y mínima en una zona, determinará cuanto aislamiento térmico se necesitará para la ubicación del instrumento. Temperaturas por debajo de cero grados, pueden generar hielo en las antenas, por lo que se tendrá que necesitar algún tipo de blindaje para protegerlas.
- Conocer la velocidad del viento. El viento es una de las mayores fuentes de ruido, por lo que será necesario ubicar un lugar con la menor ocurrencia de este durante todo el año.
- Información de datos solares son necesarios para conocer el tamaño requerido de un panel solar, además de si estos pueden proveer la energía necesaria. Conocer las horas y días de sol durante el mes ayudara a estimar la energía producida por esta fuente.
- La frecuencia y cantidad de precipitación (precipitación total por año y precipitación máxima por hora) determinaran las medidas de protección necesarias para mantener el entorno del instrumento seco.
- La protección contra rayos es necesaria y realmente útil en especial en el ámbito económico. La decisión del tipo de protección necesario deberá ser de acuerdo a la información de la frecuencia en que los rayos ocurren. Este tipo de información es raramente conseguida, por lo que se puede tomar en cuenta los eventos ocurridos cerca de un poblado cercano, de tal forma que los instrumentos no se encuentren expuestos a fenómenos como este.

## **2.5 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE UNA RED SÍSMICA**

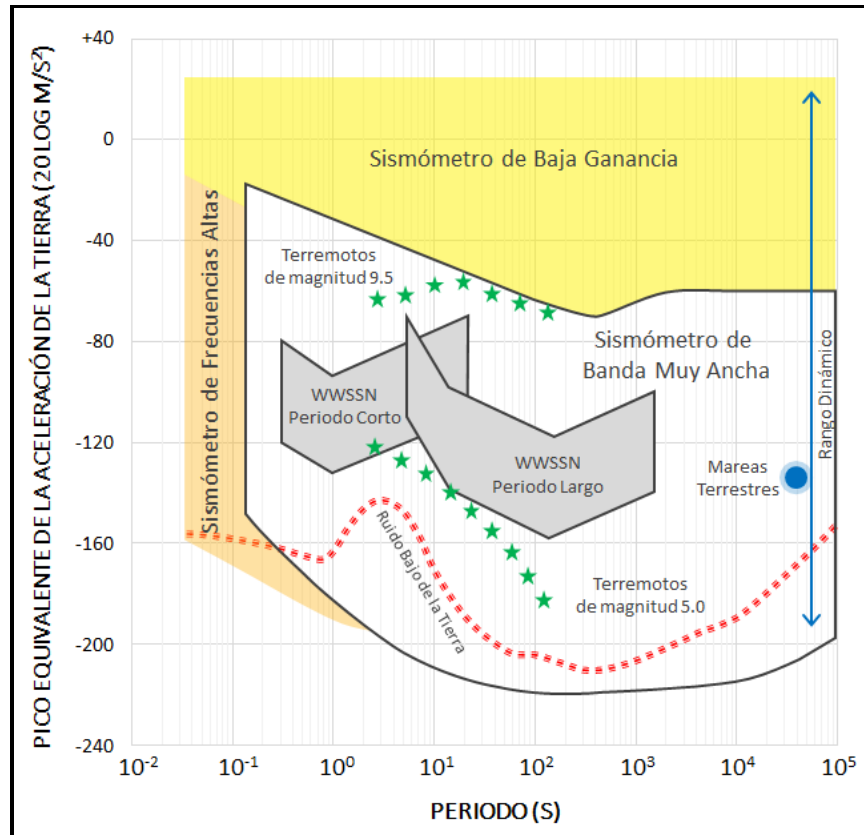
La elección apropiada del sensor sísmico, depende del tipo de monitoreo que se está buscando, ya sea de forma local o regional. Los factores más importantes a considerar son los siguientes:

- Tipo de sensor
- Número de componentes del sensor por estación sísmica
- Sensibilidad del sensor
- Rango de operación de frecuencias del sensor

### **2.5.1 Tipo de sensor**

Considerar el tipo de sismómetro que se desea usar, depende del tipo de investigación se desea realizar. Los sismómetros presentan mucha sensibilidad a eventos pequeños y distantes; por lo tanto, son muy sensibles para señales de movimientos fuertes, este aspecto era muy relevante cuando los registros eran obtenidos mediante sistemas analógicos. Inicialmente, para registrar los movimientos fuertes, era necesario el uso de un acelerómetro. Sin embargo, a medida que la tecnología avanzaba, se empezaron a diseñar sismómetros de periodo corto que al igual que los acelerómetros, presentan rangos dinámicos (más de los 110 dB) y frecuencias similares (alrededor de 1 Hz). Además de esto, también se diseñaron sensores de banda ancha los cuales podían registrar rangos considerables, tal como se muestra en la Figura 2.6 (Peterson & Hutt, 1989).

En la actualidad la mayoría de las redes sísmicas usan sensores de banda ancha, dado a que otorgan mayor margen en frecuencias y rangos dinámicos, usados para estudios locales y regionales. Los acelerómetros, al igual que los sismómetros de periodo corto, se usan para registrar movimientos fuertes, por lo que son buenos cuando se tratan de estudios locales, en donde se enfoca netamente al estudio de los suelos y estructuras hechas por el hombre.



*Figura 2.6; Comparación del ancho de banda de los sismómetros (Peterson and Hutt, 1989).*

### 2.5.2 Número de componentes

En principio, muchos sensores usaban una única componente para registrar los datos, en su mayoría era la componente vertical (Z), pero la razón de esto, es que los equipos eran analógicos y la mayoría registraba sobre un papel.

Ahora, con la era digital, es posible registrar en las tres componentes (Norte, Este y Vertical) por lo que la información que ahora se tiene, ayuda a entender mejor el comportamiento de la forma de onda en cualquiera de estos tres ejes. Por consiguiente, los cálculos y la información que se obtiene sobre los sismos se tornan más prácticos y precisos.

### 2.5.3 Sensibilidad del sensor

La sensibilidad de un sensor, está definido por el comportamiento y capacidad de este frente a un movimiento generado por un evento sísmico. Cuando se desea

estudiar movimientos grandes y fuertes a pequeñas distancias hipocentrales, normalmente se usa los acelerómetros, ya que estos están diseñados para este tipo de registro. La máxima escala de aceleración esta expresado usualmente como fracciones de la gravedad de la tierra (0.25, 0.5, 1, 1 y 4 g de sensibilidad son disponibles en la actualidad).

Cuando los movimientos son más pequeños y débiles se usan los sismómetros, ya que estos son más sensibles a este tipo de movimientos. A diferencia de los acelerómetros estos no pueden registrar amplitudes muy altas.

#### **2.5.4 Rango de operación de frecuencias del sensor**

De acuerdo con Trnkoczy y Havskov (2011), los sensores que miden pequeños movimientos se pueden dividir en tres categorías. La primera considera a los sismómetros de periodo corto, que miden señales comprendidas entre 0.1 a 100 Hz. La segunda categoría considera sismómetros de banda ancha cuyos rangos de frecuencia varían entre 0.01 a 50 Hz, este tipo de sismómetros son usados para estudios de tipo regional. Por último, está la categoría de sismómetros de banda muy ancha, que puede registrar frecuencias por debajo de 0.001 Hz hasta los 10 Hz.

## **2.6 RED SÍSMICA NACIONAL DEL PERÚ**

En el Perú, la primera estación sísmica fue instalada en la ciudad de Lima, en 1907, esta funcionó por un periodo corto. Posterior a esto, en 1931 la USGS de EEUU, instaló una estación equipada con 6 sensores Wenner-Benioff y un registrador en papel fotográfico en la ciudad de Huancayo. En 1962, otras estaciones fueron instaladas en la localidad de Ñaña en Lima y Characato en Arequipa, estas estaciones fueron incluidas a la Red Sísmica Mundial en ese entonces (fuente, Portal IGP).

Después del sismo ocurrido en Nazca en 1996, se inició la instalación de sensores de banda ancha con registro en formato digital en la región del Cusco. Esta etapa de modernización trajo consigo la ejecución del proyecto Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis (REDSSAT) que, en conjunto con el gobierno peruano, permitió la operatividad, para Julio del 2011, de un sistema integrado por 7 estaciones

de banda ancha con transmisión por satélite y algoritmos necesarios para la recepción de la señal, análisis y procesamiento automático previos a la emisión de algún reporte.

Las estaciones sísmicas de la RSN, están conformadas por instrumentos que registran eventos sísmicos de manera autónoma, debido a que la fuente de energía es a través de paneles solares (Ver Figura 2.7). En general, una estación sísmica básica está conformada por:

- Sismómetro: Instrumento que registra la velocidad del movimiento del suelo, cuenta con un transductor (dispositivo que convierte las ondas mecánicas de la Tierra en señales eléctricas). Este sismómetro va conectado a un registrador.
- Registrador: Convierte las señales eléctricas captadas por el sismómetro en señales digitales, que luego son guardados en un dispositivo de almacenamiento de datos. Al registro de estas señales se les denomina registros sísmicos.
- Caseta metálica: Lugar donde se guardará el sismómetro y registrador.
- Sistema de energía Fotovoltaico: Constituido por un panel solar, además de un conjunto de baterías que almacenan la energía y una caja de control fotovoltaico, cuya función es controlar y regular la intensidad del estado de las baterías para alargar su duración.
- Antena o receptor GPS: Proporciona el registro del tiempo exacto de los registros sísmicos, para saber la ocurrencia del evento sísmico. Están conformadas en algunos casos por antenas Yagi, satelitales, entre otros.



*Figura 2.7; Componentes de la estación sísmica de Pacco Loma (PACL) de la Red Sísmica Nacional del Perú (Fuente IGP).*

En la actualidad el IGP cuenta con el Centro Sismológico Nacional (CENSIS), encargado del monitoreo y procesamiento de eventos sísmicos ocurridos en el país usando la información de la Red Sísmica Nacional, compuesta por 56 estaciones de banda ancha con transmisión por satélite (Ver Figura 2.8).

Las estaciones sísmicas consideradas en el presente estudio, se muestran en la Tabla 2.1, donde se detalla las coordenadas, elevación y localización de cada estación.



Figura 2.8; Distribución geográfica de estaciones de banda ancha en el Perú (Fuente Portal IGP).

**Tabla 2.1;** Ubicación de las estaciones pertenecientes a la Red Sísmica Nacional del Perú administrada por el Instituto Geofísico del Perú.

Nº	NOMBRE	CÓDIGO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN	REGIÓN
1	Alto Perú	ALTO	-17.5	-69.7	4400	Tacna
2	Ancon	ANCO	-11.8	-77.2	47	Lima
3	Andaray	ANDY	-15.8	-72.9	3090	Arequipa
4	Abra Patahuasi	APAT	-13.6	-71.2	4495	Cusco
5	Atahualpa	ATH0	-7.1	-78.4	3151	Cajamarca
6	Ayacucho	AYA0	-13.2	-74.2	2771	Ayacucho
7	Ayrampuni	AYRA	-15.1	-69.9	3899	Puno
8	Bellavista	BVTA	-7	-76.6	503	San Martín
9	Cajamarca	CAJO	-15.8	-71.8	4481	Arequipa
10	Cerro Azul	CAZU	-12.9	-76.4	807	Lima
11	Chimbote	CBT2	-9.1	-78.6	346	Ancash
12	Cerro Gloria	CGLO	-16.5	-71.7	2416	Arequipa
13	Chaupi Ayllu	CHAY	-14.4	-69.6	3878	Puno
14	Chocan	CHO0	-5.2	-81	221	Piura
15	Chivay	CHVY	-15.6	-71.6	3756	Arequipa
16	Guadalupe	GUA0	-14	-75.8	690	Ica
17	El Guayao	GYAO	-6.6	-78.9	2051	Cajamarca
18	Huarmey	HMEY	-10.1	-78.1	219	Ancash
19	Huancas Alto	HNAL	-4.8	-79.9	3024	Piura
20	Huito Salinas	HSAL	-16.3	-71.2	4475	Arequipa
21	Mayorazgo	HUB0	-12.1	-76.9	340	Lima
22	Huancayo	HYO0	-12	-75.3	3330	Junín
23	Iquitos	IQTO	-3.8	-73.3	114	Loreto
24	Santa Isabel de Chapa	ISAB	-14.3	-74	3478	Ayacucho
25	La Victoria	LVIC	-8.3	-77.3	3934	La Libertad
26	La Yarada	LYAR	-18.1	-70.6	211	Tacna
27	Monzón	MNZN	-9.3	-76.3	869	Huánuco
28	Medio Pachiri	MPCH	-12.5	-72.8	649	Cusco
29	Santa Maria de Nieva	NIEV	-4.6	-77.9	214	Amazonas
30	Ñaña	NNA	-12	-76.8	575	Lima
31	Ñaña	NNAP	-12	-76.8	575	Lima
32	Nuevo Milan	NVMI	-9.1	-77.1	3446	Ancash
33	Pacco Loma	PACL	-13.2	-74	3293	Ayacucho
34	Paracas	PAR0	-13.8	-76.3	208	Ica
35	Patapampa	PAT0	-15.8	-71.7	4976	Arequipa
36	Payapunku	PAYA	-14.4	-71.3	3986	Cusco
37	Puerto Bermudez	PBER	-10.3	-74.9	268	Pasco
38	Portachuelo	PCHO	-6	-79.7	659	Lambayeque
39	Puerto Maldonado	PTM0	-12.6	-69.2	244	Madre de Dios
40	Pucallpa	PUC0	-8.4	-74.7	148	Ucayali
41	Quilca	QLK0	-16.7	-72.4	60	Arequipa
42	Quillihuata	QLLH	-13.5	-71.9	3525	Cusco
43	Quinjalca	QNJL	-6.1	-77.7	2369	Amazonas
44	Quirihuac	QRHC	-8.1	-78.9	261	La Libertad
45	Sarconta	SCRT	-13.8	-72.6	2870	Apurímac
46	San Ignacio	SNIG	-5.1	-79	1809	Cajamarca
47	Satipo	STPO	-11.3	-74.6	1092	Junín
48	Ticapampa	TICA	-7.9	-77.9	2831	La Libertad
49	Tocache	TOCO	-8.2	-76.5	535	San Martín
50	Toquepala	TOQ0	-17.3	-70.6	2586	Tacna
51	Ubinas	UBI0	-16.3	-70.9	4832	Moquegua
52	Univ. Del Altiplano	UNAP	-15.8	-70	3838	Puno
53	Yanacachi	YANA	-10.6	-76.1	4047	Pasco
54	Yauca	YCA0	-15.7	-74.5	127	Arequipa
55	Huaylas	YLS0	-8.8	-77.9	3208	Ancash
56	Yurimaguas	YRMO	-5.9	-76.1	155	Loreto

# CAPITULO III

## RUIDO SÍSMICO

### 3.1 SEÑALES SÍSMICAS

De acuerdo a Bormann (2002), las señales radiadas desde alguna fuente sísmica, ya sea una explosión o una ruptura por cizallamiento, suelen ser una función escalonada de desplazamiento o un impulso de velocidad de duración finita, desde milisegundos hasta unos pocos segundos como máximo. De acuerdo con el teorema de Fourier, cualquier función transitoria arbitraria  $f(t)$  en el dominio de tiempo, puede representarse por una función equivalente  $F(\omega)$  en el dominio de frecuencias (Ver Figura 3.1), es lo que se conoce como la Transformada de Fourier de  $f(t)$  (Cooley y Tukey, 1965).

Entonces, una función en el dominio del tiempo está representada por:

$$f(t) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación 3.1}$$

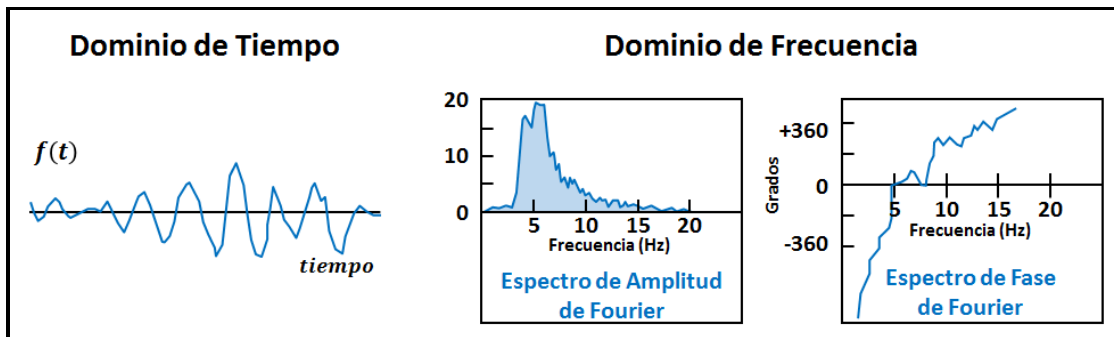
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = |F(\omega)| e^{i\phi(\omega)} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde,

$|F(\omega)| = A(\omega)$  es la densidad espectral de amplitud con unidades de m/Hz,

$\omega = 2\pi f$  la frecuencia angular (con f-frecuencia en unidades de Hz) y

$\phi(\omega)$  la fase del espectro, con unidades de grados, radianes o  $2\pi rad$ .



**Figura 3.1;** Señal registrada en función del tiempo (Izquierda), puede representarse en función de la frecuencia por su espectro de Fourier. La amplitud (medio) y la fase del espectro (derecha), ambos son necesarios para proporcionar la serie de tiempo completa (Modificado de Lay y Wallace, 1995).

La integral de la ecuación 3.1, puede ser representada como una sumatoria. Por lo tanto, el teorema de Fourier establece que una serie de tiempo finita arbitraria, se puede expresar como una suma de funciones periódicas monocromáticas (donde las ondas se encuentran perfectamente definidas por una única frecuencia):

$$f(t) = (2\pi)^{-1} \sum |F(\omega)| e^{i[\omega t + \phi(\omega)]} \Delta\omega \quad \text{Ecuación 3.3}$$

### 3.2 RUIDO SÍSMICO

Todos los registros obtenidos muestran algún tipo de ruido, en muchos casos este es causado por agentes de tipo armónico, cuyos rangos de frecuencia oscilan entre 0.1 a 1 Hz. Cuando se filtra una señal de este tipo, se llega a notar que el ruido a veces oculta una señal originada por un evento sísmico, haciendo difícil el tratamiento de esta señal (Havskov y Alguacil, 2002).

Mientras que las componentes armónicas de una señal sísmica son coherentes con la relación de su fase, no sucede lo mismo para el ruido sísmico ambiental, que es causado por una diversidad de fuentes diferentes distribuidos espacialmente, en su mayoría no relacionadas y de frecuencias diferentes. El ruido sísmico, forma así, un proceso estocástico (magnitudes aleatorias que varían con el tiempo) más o menos estacionario sin espectro de fase definido (Bormann, 2002).

Dada la naturaleza estocástica del ruido sísmico, la integral de la ecuación 3.2 no converge este tipo de señal. En consecuencia. La densidad espectral de amplitud y espectro de fase no pueden ser calculados. Por lo que será necesario determinar la densidad espectral de potencia  $P(\omega)$ .

$$p(\tau) = f(t), f(t + \tau) > \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Por lo tanto:

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad \text{Ecuación 3.5}$$

El símbolo  $\langle \rangle$  indica el promedio del tiempo  $t$ . Dependiendo si  $f(t)$  es un registro de desplazamiento ( $d$ ), velocidad ( $v$ ) o aceleración ( $a$ ),  $P(\omega)$  estará dado en unidades de  $m^2/Hz$ ,  $(m/s)^2/Hz$  o  $(m/s^2)^2/Hz$  respectivamente.

El movimiento oscilatorio del terreno  $x(t)$  del ruido sísmico, puede compararse como ondas en función del seno  $x(t) = a_d \sin(\omega t)$ , con  $a_d$  como la amplitud del desplazamiento. Por lo consiguiente, cuando se convierte el desplazamiento en relación de velocidad ( $dx/dt$ ) o aceleración ( $dx^2/dt^2$ ), se puede conseguir sus la amplitud de velocidad y aceleración  $a_v = a_d \omega$  y  $a_a = a_d \omega^2$ , respectivamente. Así, conociendo el valor de la densidad espectral de potencia del desplazamiento  $P_d(\omega)$ , se calcula los respectivos valores de densidad espectral de potencia de la velocidad ( $P_v$ ) o aceleración ( $P_a$ ).

$$P_v(\omega) = P_d \omega^2 = 4\pi^2 f^2 P_d \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Y

$$P_a(\omega) = P_d \omega^4 = 16\pi^4 f^4 P_d = 4\pi^2 f^2 P_v \quad \text{Ecuación 3.7}$$

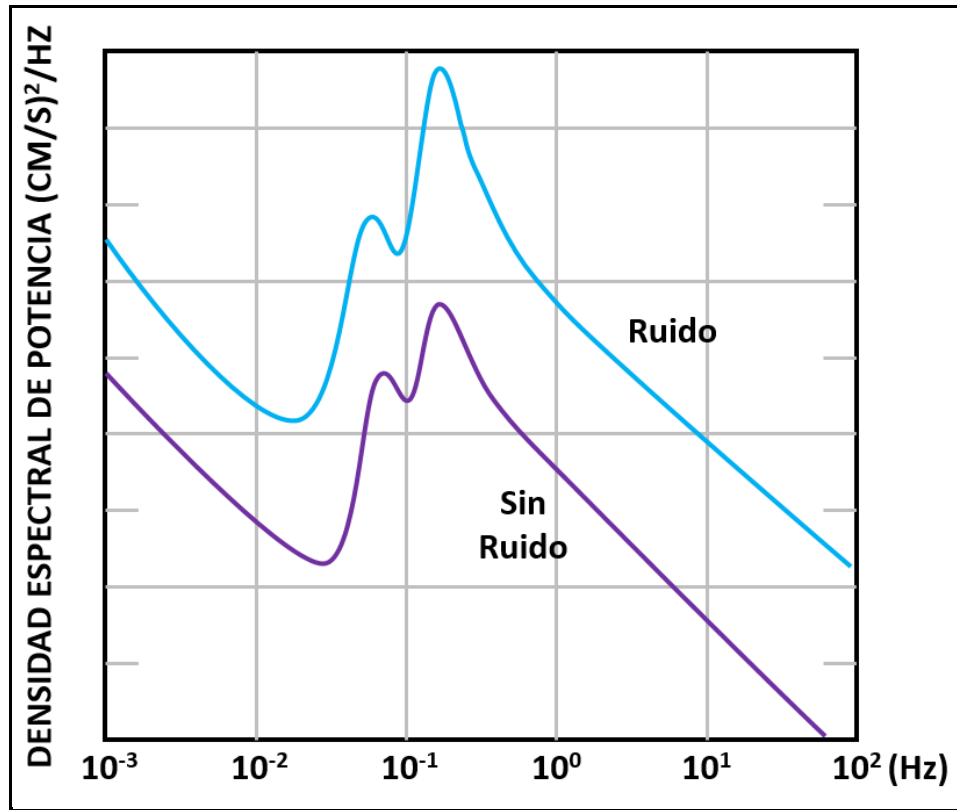
En la Figura 3.2 se representa el espectro de potencia de velocidad de una señal en condiciones ruidosas y no ruidosas para una estación típica instalada sobre una roca dura.

Así como en la acústica, la señal sísmica y potencia de ruido  $(a_2/a_1)^2$  es a menudo expresado en dB (decibeles). La diferencia de potencia en dB es;

$$10 \log[(a_2/a_1)^2] = 20 \log(a_2/a_1) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Cuando se expresa la densidad de potencia espectral en unidades de dB referidos a 1  $(m/s^2)^2/Hz$ , se puede denotar de la siguiente manera;

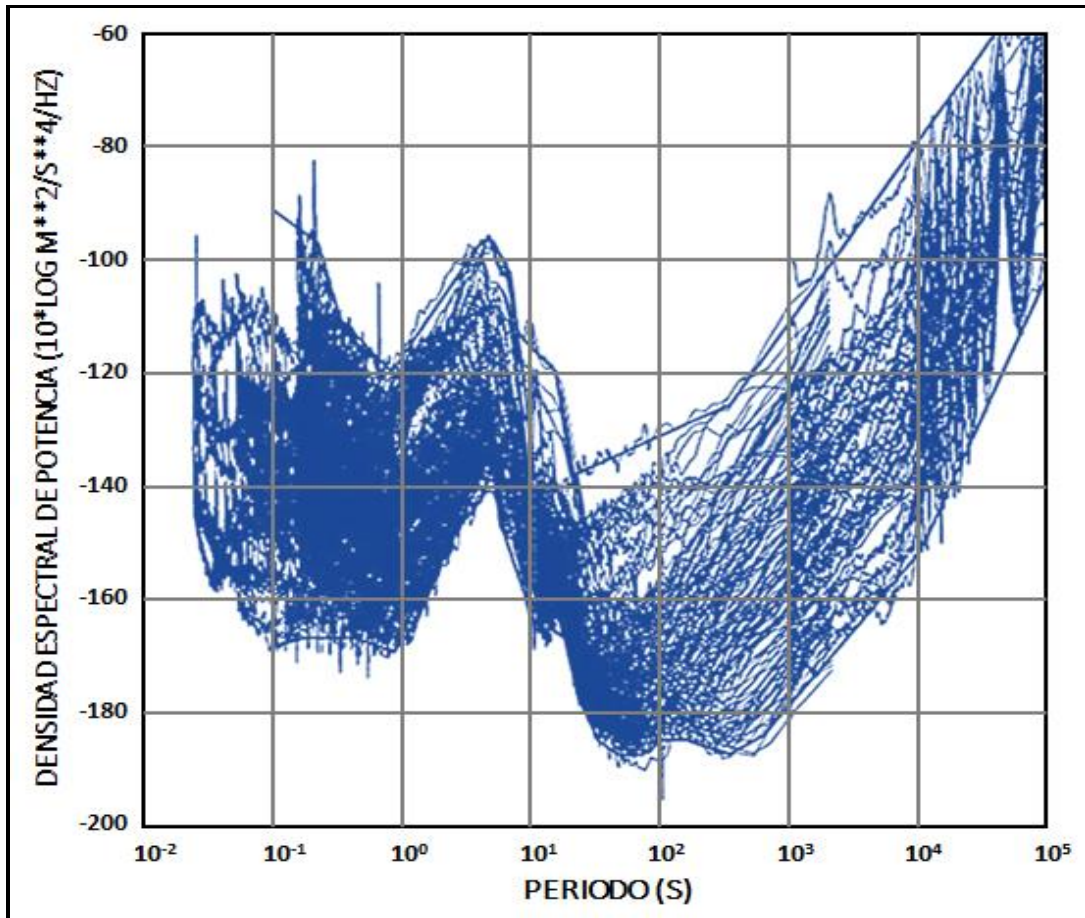
$$P_a[dB] = 10 \log[P_a/1 (m/s^2)^2/Hz] \quad \text{Ecuación 3.9}$$



*Figura 3.2; Espectro de potencia de velocidad del ruido sísmico ambiental, en condiciones no ruidosas (Quiet) y ruidosas (Noisy) para una estación típica sobre un basamento rocoso. (Modificado de Aki y Richards, 1980).*

### 3.3 MODELO GLOBAL DE NIVEL DE RUIDO

En 1993, Peterson representó un nuevo modelo global de ruido en las unidades descritas en la ecuación 3.9. Este modelo representa el nivel máximo y mínimo, desarrollado a través de la compilación acumulativa y representativa de densidades espectrales de potencia de aceleración de los registros observados para periodos muy ruidosos y no ruidosos de un total de 75 estaciones pertenecientes a la Red Global Sismográfica o GSN en sus siglas en inglés (Global Seismographic Network). Los modelos ahora se conocen como: el Nuevo Modelo de Ruidos Altos por sus siglas en inglés NHNM (New High Noise Model) y Nuevo Modelo de Ruidos Bajos NLNM (New Low Noise Model), que en conjunto representan el nuevo estándar de comparación para los límites de ruido calculado en cualquier estación sísmica. El nuevo modelo es mostrado en la Figura 3.3.



*Figura 3.3; Superposición de espectros de la red sismográfica global (GSN) con los niveles máximos y mínimos determinados (Modificado de Peterson, 1993).*

Teniendo en cuenta que el periodo representa la inversa de la frecuencia  $T = 1/f$  en segundos, para una frecuencia  $f$ , Se tendrá entonces de las ecuaciones 3.6 y 3.7;

$$P_v[dB] = P_a[dB] + 20\log(T/2\pi) \quad \text{Ecuación 3.10}$$

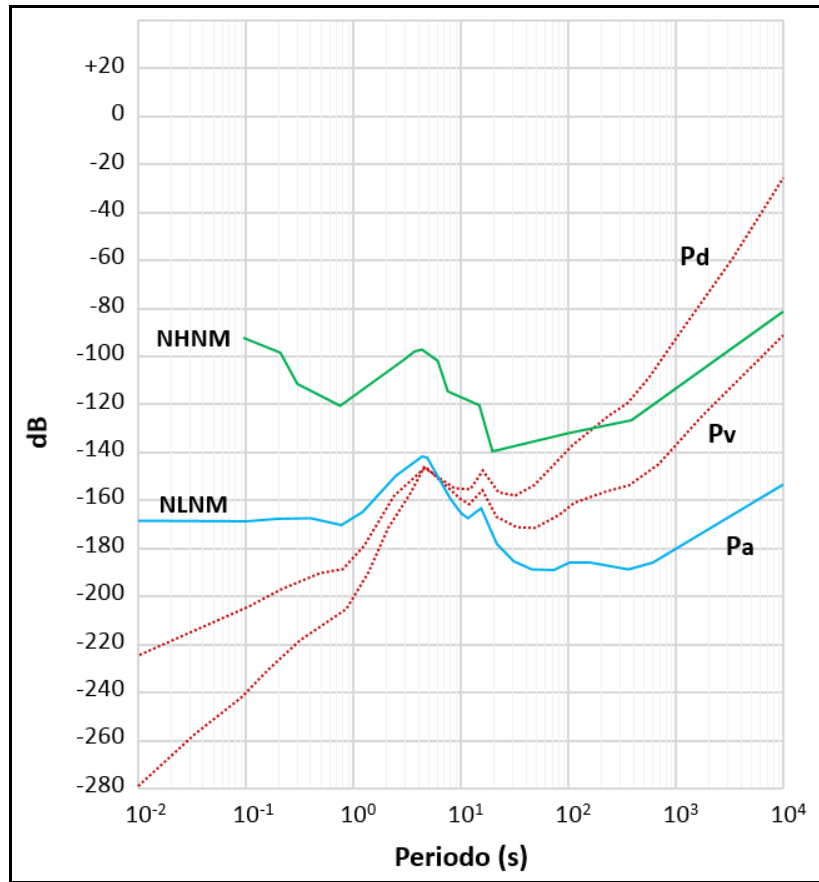
Además,

$$(T/2\pi) = P_v[dB] + 20\log(T/2\pi) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$P_d[dB] = P_a[dB] + 40\log$$

Consecuentemente, para el periodo  $T$ , se tendrá valores en números mas no en unidades de dB; por lo tanto,  $T = 2\pi = 6.28$  s,  $P_a = P_v = P_d$  () y también,  $(P_d - P_a) = 2(P_v - P_a) = \text{constante}$  para cualquier periodo dado.

En la Figura 3.4, se muestra el nivel mínimo y máximo de aceleración de acuerdo al modelo de Peterson (1993), además, están representados los modelos de velocidad y desplazamiento, los cuales fueron obtenidos a partir de los valores de aceleración determinados por Peterson mediante las ecuaciones anteriormente mencionados. Los resultados se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2 acorde al nivel máximo y mínimo de ruido respectivamente.



**Figura 3.4;** Curvas de aceleración de la densidad de potencia espectral del ruido ( $P_a$ ), como función de periodos de ruido (de acuerdo a Peterson 1993). Para NLNM fueron calculadas las curvas de velocidad y desplazamiento ( $P_v$ ) y ( $P_d$ ) respectivamente. (Modificado de Bormann, 2002).

**Tabla 3.1;** Valores de densidad de potencia espectral de aceleración, velocidad y desplazamiento para NHHM del modelo de Peterson (1993).

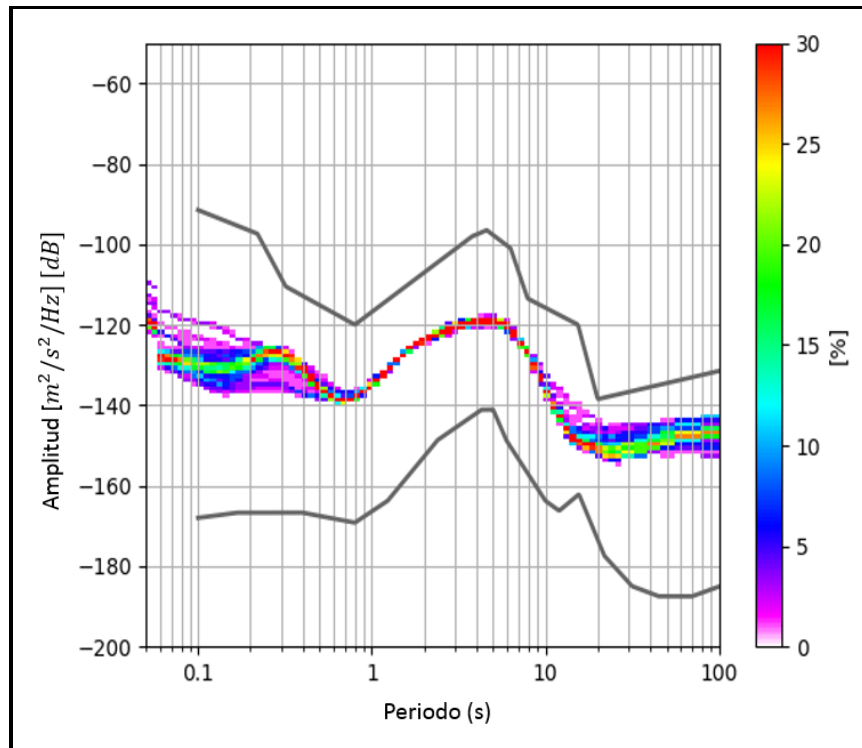
$T(s)$	$P_a[m^2 s^{-4}/Hz]$	$P_a[dB]$	$P_v[m^2 s^{-2}/Hz]$	$P_v[dB]$	$P_d[m^2 s/Hz]$	$P_d[dB]$
<b>0.10</b>	$7.1 \times 10^{-10}$	-91.5	$1.8 \times 10^{-13}$	-127.5	$4.5 \times 10^{-17}$	-163.4
<b>0.22</b>	$1.8 \times 10^{-10}$	-97.4	$2.2 \times 10^{-13}$	-126.5	$2.7 \times 10^{-16}$	-155.6
<b>0.32</b>	$8.9 \times 10^{-12}$	-110.5	$2.3 \times 10^{-14}$	-136.4	$6.6 \times 10^{-17}$	-162.2
<b>0.80</b>	$1.0 \times 10^{-12}$	-120.0	$1.6 \times 10^{-14}$	-137.9	$2.6 \times 10^{-16}$	-155.8
<b>3.80</b>	$1.6 \times 10^{-10}$	-98.0	$5.8 \times 10^{-11}$	-102.4	$2.1 \times 10^{-11}$	-106.7
<b>4.60</b>	$2.2 \times 10^{-10}$	-96.5	$1.2 \times 10^{-10}$	-99.2	$6.4 \times 10^{-11}$	-101.9
<b>6.30</b>	$7.9 \times 10^{-11}$	-101.0	$8.0 \times 10^{-11}$	-101.0	$7.9 \times 10^{-11}$	-101.0
<b>7.90</b>	$4.5 \times 10^{-12}$	-113.5	$7.1 \times 10^{-12}$	-111.5	$1.4 \times 10^{-11}$	-109.5
<b>15.40</b>	$1.0 \times 10^{-12}$	-120.0	$6.0 \times 10^{-12}$	-112.2	$3.6 \times 10^{-11}$	-104.4
<b>20.00</b>	$1.4 \times 10^{-14}$	-138.5	$1.4 \times 10^{-13}$	-128.4	$1.4 \times 10^{-12}$	-118.4
<b>354.8</b>	$2.5 \times 10^{-13}$	-126.0	$8.0 \times 10^{-10}$	-91.0	$2.6 \times 10^{-6}$	-55.9
<b><math>10^4</math></b>	$9.7 \times 10^{-9}$	-80.1	$2.5 \times 10^{-2}$	-16.1	$6.2 \times 10^4$	+47.9
<b><math>10^5</math></b>	$1.4 \times 10^{-5}$	-48.5	$3.6 \times 10^3$	+35.5	$9.0 \times 10^{11}$	+119.6

**Tabla 3.2;** Valores de densidad de potencia espectral de aceleración, velocidad y desplazamiento para NLNM del modelo de Peterson (1993).

$T(s)$	$P_a[m^2 s^{-4}/Hz]$	$P_a[dB]$	$P_v[m^2 s^{-2}/Hz]$	$P_v[dB]$	$P_d[m^2 s/Hz]$	$P_d[dB]$
0.10	$1.6 \times 10^{-17}$	-168.0	$4.1 \times 10^{-21}$	-203.9	$1.0 \times 10^{-24}$	-239.9
0.17	$2.1 \times 10^{-17}$	-166.7	$1.6 \times 10^{-20}$	-198.1	$1.1 \times 10^{-23}$	-229.4
0.40	$2.1 \times 10^{-17}$	-166.7	$8.7 \times 10^{-20}$	-190.6	$3.5 \times 10^{-22}$	-214.6
0.80	$1.2 \times 10^{-17}$	-169.2	$1.9 \times 10^{-19}$	-187.1	$3.2 \times 10^{-21}$	-214.5
1.24	$4.3 \times 10^{-17}$	-163.7	$1.7 \times 10^{-18}$	-177.8	$6.5 \times 10^{-20}$	-191.9
2.40	$1.4 \times 10^{-15}$	-148.6	$2.0 \times 10^{-16}$	-157.0	$3.0 \times 10^{-17}$	-165.3
4.30	$7.8 \times 10^{-15}$	-141.1	$3.6 \times 10^{-15}$	-144.4	$1.7 \times 10^{-15}$	-147.7
5.00	$7.8 \times 10^{-15}$	-141.1	$4.9 \times 10^{-15}$	-143.1	$3.1 \times 10^{-15}$	-145.1
6.00	$1.3 \times 10^{-15}$	-149.0	$1.1 \times 10^{-15}$	-149.4	$1.0 \times 10^{-15}$	-149.8
10.00	$4.2 \times 10^{-17}$	-163.8	$1.0 \times 10^{-16}$	-159.7	$2.7 \times 10^{-16}$	-155.7
12.00	$2.4 \times 10^{-17}$	-166.2	$8.7 \times 10^{-17}$	-160.6	$3.2 \times 10^{-16}$	-155.0
15.60	$6.2 \times 10^{-17}$	-162.1	$3.8 \times 10^{-16}$	-154.2	$2.3 \times 10^{-15}$	-146.3
21.90	$1.8 \times 10^{-18}$	-177.5	$2.2 \times 10^{-17}$	-166.7	$2.6 \times 10^{-16}$	-155.8
31.60	$3.2 \times 10^{-19}$	-185.0	$7.9 \times 10^{-18}$	-171.0	$2.0 \times 10^{-16}$	-156.9
45.00	$1.8 \times 10^{-19}$	-187.5	$9.1 \times 10^{-18}$	-170.4	$4.7 \times 10^{-16}$	-153.3
70.00	$1.8 \times 10^{-19}$	-187.5	$2.2 \times 10^{-17}$	-166.6	$2.8 \times 10^{-15}$	-145.6
101.0	$3.2 \times 10^{-19}$	-185.0	$9.7 \times 10^{-17}$	-160.9	$2.1 \times 10^{-14}$	-136.8
154.0	$3.2 \times 10^{-19}$	-185.0	$1.8 \times 10^{-16}$	-157.2	$1.1 \times 10^{-13}$	-129.4
328.0	$1.8 \times 10^{-19}$	-187.5	$4.9 \times 10^{-16}$	-153.1	$1.3 \times 10^{-12}$	-118.7
600.0	$3.5 \times 10^{-19}$	-184.4	$3.2 \times 10^{-15}$	-144.8	$3.0 \times 10^{-11}$	-108.2
$10^4$	$6.5 \times 10^{-16}$	-151.9	$3.5 \times 10^{-14}$	-87.9	$4.1 \times 10^{-3}$	-23.8
$10^5$	$4.9 \times 10^{-11}$	-103.1	$1.2 \times 10^{-2}$	-19.1	$2.6 \times 10^{-6}$	+65.0

McNamara y Bulland (2004), complementaron la metodología desarrollada por Peterson, dando lugar a la distribución frecuencial del ruido con respecto a la Función de Probabilidad de Densidad del espectro o PDF, la cual es calculada a partir de la Densidad Espectral de Potencia o PSD. En la Figura 3.5, se muestra distribuida los PSD, a partir del cual se obtuvieron promedios de octavas completas en intervalos de 1/8, y acumuladas en intervalos de 1 dB obteniendo de esta manera el modelo de PDF para cada periodo.

El procedimiento detallado para la obtención de este modelo esta descrito en el Capítulo IV correspondiente al procesamiento y análisis del presente estudio.



**Figura 3.5;** *Función de Densidad de Probabilidad de Potencia de la componente vertical de la estación Quirihuac (QRHC) correspondiente al día 28 de marzo del 2018 de la Red Sísmica Nacional (RSN) del Perú.*

### 3.4 FUENTES DE RUIDO SÍSMICO

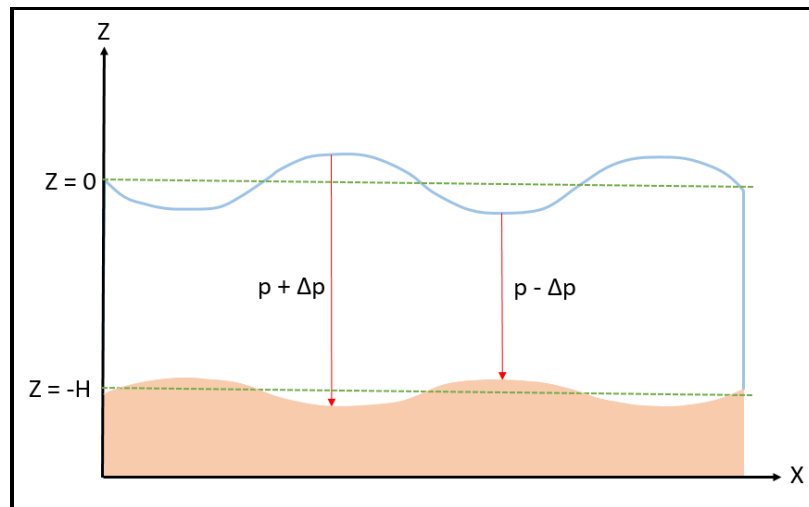
Como se mencionó inicialmente, el ruido sísmico puede darse debido a diferentes fuentes, tanto naturales como aquellas provocadas por actividades humanas. De acuerdo a Bormann (2002), el ruido sísmico puede ser parte de tres grupos, respecto a distintos

rangos de frecuencias. El primer grupo trata de microsismos originados por fuentes oceánicas, el segundo grupo considera ruidos de periodo corto, que usualmente están relacionados a ruidos culturales y, por último, el ruido generado en periodos largos.

### 3.4.1 Microsismos Oceánicos

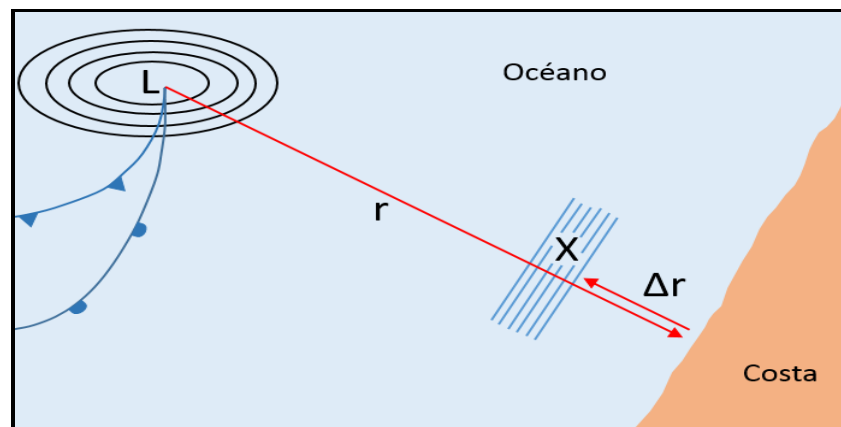
Los primeros registros que contenían ruido debido a fuentes microsísmicas fueron reportados por Algue en 1900, quien determinó que estos ruidos se generaban en periodos comprendidos entre los 6 y 10 s. Wiechert (1904) propuso que estas señales eran causadas por las olas de los océanos en la costas, más tarde se encontró que estos microsismos están representados en dos rangos de periodo, los microsismos marinos primarios, los cuales eran más pequeños con periodos alrededor de los 14 s, y los microsismos marinos secundarios relacionados con el pico de ruido principal alrededor de los 6s.

Los microsismos primarios se producen solo en aguas poco profundas en las zonas costeras, aquí la energía generada por las olas es convertida en energía sísmica, ya sea por variaciones verticales de presión o el rompimiento de las olas en las orillas, tal como se muestra en la Figura 3.6. Haubrich et al. (1963) comparo los espectros de los microsismos y el oleaje en las playas logrando demostrar la relación estrecha entre estos.



*Figura 3. 6; Generación de microsismos primarios, debido a variaciones de presión en el fondo oceánico,  $z=0$  corresponde al nivel cero del mar y  $z=-H$  al nivel del piso oceánico (Friedrich et al., 1998).*

Longuet - Higgins (1950) explica que los microsismos secundarios son generados por la superposición de ondas oceánicas de igual periodo que viajan en direcciones opuestas, generando entonces ondas de gravedad estacionarias de la mitad del periodo inicial. Estas ondas estacionarias causan perturbaciones de presión no lineal que se propagan sin atenuar el fondo del océano. Un área de interferencia **X** puede estar fuera de la costa donde las ondas de propagación hacia adelante generadas por un área **L** de baja presión se superponen con las ondas que viajan hacia atrás después de ser reflejadas desde la costa. Este comportamiento puede generarse también a mayores profundidades. Las amplitudes del ruido en las componentes horizontales y verticales de este tipo de microsismos son similares. La Figura 3.7 muestra un esquema acerca de la formación de este tipo de microsismos.



**Figura 3.7;** Generación de microsismos secundarios, *L* corresponde a una zona de presión baja, *r* es la distancia hacia la costa,  $\Delta r$  distancia de retorno y *X* el área de interferencia donde se producen ondas estacionarias con la mitad del periodo inicial (Modificado de Friedrich et al., 1998).

Muchas veces, la geometría del piso oceánico puede generar algún tipo de variación, creando fenómenos de resonancia, los cuales pueden acoplarse a la energía sísmica generada por la iteración de las olas con el litoral (Borman. 2002).

### 3.4.2 Ruidos de Periodos Cortos

Los ruidos de periodo corto, pueden darse debido a fuentes naturales, como el viento (cuando interactúa con el entorno, ya sea por árboles u otro tipo de vegetación, construcciones o la misma topografía las cuales transmiten las vibraciones generadas al terreno) y en algunas zonas por donde fluye el agua (como ríos y quebradas) etc. De acuerdo con Young et al. (1996), los vientos pueden generar ruido dentro de un rango comprendido entre 0.5 hasta 15 a 60 Hz aproximadamente. Withers et al. (1996) muestran que el ruido producido por el viento puede ser detectado con velocidades de viento a partir de 3 y 4 m/s, considerando esto alejado de cualquier fuente de ruido cultural.

Huang et al. (2007) mencionan algunas variaciones dentro del rango de frecuencias de 10 a 150 Hz que, podrían ser generadas por el movimiento de rocas, en especial debido a deslizamiento en donde la gravedad y la pendiente topográfica toman un papel importante.

A pesar de que las fuentes naturales generan algún tipo de ruido en los registros, la fuente dominante se da debido a actividades humanas (fábricas, carreteras transitadas, maquinarias, etc), esto es conocido como ruido cultural. Mc Namara y Buland (2004), consideran que el ruido cultural puede variar con valores mayores a 1 Hz y que estos se atenúan en varios kilómetros. Del mismo modo, el ruido cultural puede combinarse parcialmente en ondas corporales que se propagan a mayores profundidades (Carter et al., 1991).

En principio, el ruido cultural puede ser evitado, aunque a menudo no es práctico ubicar estaciones sísmicas a distancias suficientes de las ciudades y carreteras. Willmore (1979), sugiere algunas reglas que pueden ser consideradas para ubicar una estación. Si una central eléctrica se encuentra cerca, el sensor puede ser colocado a 25 km, a 15 km de líneas de ferrocarriles, a 6 km de carreteras principales y 1 km de carreteras más pequeñas. Con respecto al movimiento del agua, se puede ubicar a 60 km de cascadas grandes o represas y a 15 km para rabinos más pequeños (corrientes violentas generadas por ríos en zonas estrechas).

### 3.4.3 Ruidos de Periodos Largos

De acuerdo a Murphy y Savino (1975), los periodos largos podrían presentarse en rangos de frecuencia comprendidos a partir de 0.2 a 50 mHz, estos usualmente son asociados con las fluctuaciones de la presión atmosférica. En frecuencias bajas, las componentes verticales de los sismómetros reaccionan a los cambios de gravedad a medida que la masa de la atmosfera de un sitio cambia con la presión atmosférica.

Savino et al. (1972) mencionan que, si los sismómetros no se encuentran completamente sellados, estos pueden presentar aceleraciones aparentes debido a efectos de flotación en la masa de los sismómetros, y las fluctuaciones de la presión atmosférica pueden causar un ruido en las componentes horizontales durante largos periodos.

Debido a actividades de turbulencia en los límites de la capa atmosférica, se producen fluctuaciones de presión en la superficie de la tierra que causan una deformación significativa a unas pocas decenas de metros por debajo de la superficie, es por esta razón que algunos sismómetros son instalados debajo de la superficie en pozos poco profundos, para evitar grandes cambios en las componentes. Para instrumentos en superficie, las fluctuaciones de la presión atmosférica, producen señales de inclinación que hace a las componentes horizontales particularmente más ruidosas, por lo que la potencia de ruido horizontal puede volverse significativamente más grande que la potencia de ruido vertical. Esta relación aumenta con el periodo y pueden alcanzar valores de 50 dB respecto a la vertical, por lo que se puede considerar que un sitio es favorable cuando el ruido horizontal de 100 a 300 s se encuentra dentro de 20 dB por encima de la potencia del ruido de la componente vertical (Bormann y Wielandt, 2013).

Según Given y Fels (1990), el ruido en las componentes horizontales puede deberse a procesos de inclinación local, la cual es causada por efectos atmosféricos, termales y presión del viento dentro de las cajas de los sensores. En algunos casos el aumento del ruido puede deberse a la circulación del viento en las cajas de sensores; por lo tanto, se requiere un mayor cuidado al momento de

instalar y blindar los sensores para reducir las derivas y ruidos ambientales de los periodos largos.

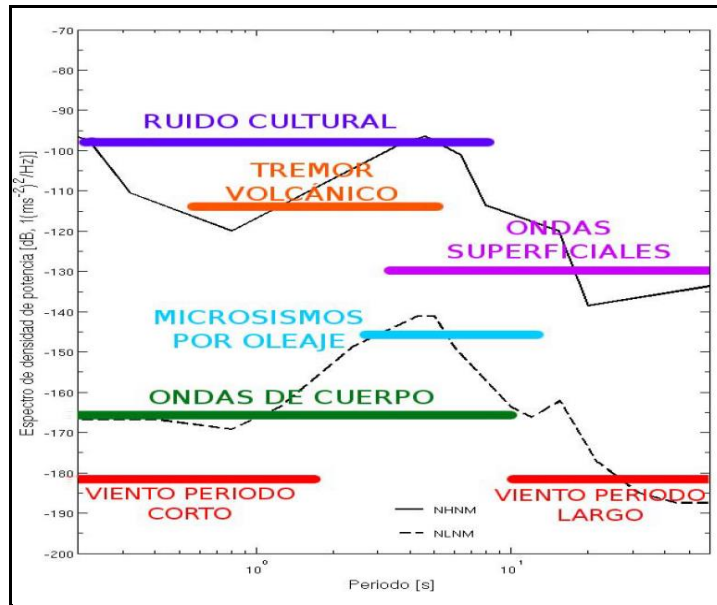
En general, cuando los suelos se encuentran poco consolidados, son más susceptibles a ruidos de periodos largos y cortos. Tal como menciona Sorrells (1971), algunos sedimentos poco consolidados son más sensitivos a las variaciones de la presión atmosférica.

Algunas variaciones de temperatura y presión pueden generar ruido no sísmico (ruido no relacionado a la deformación de la tierra) que puede cambiar las características de la respuesta del instrumento (Wielandt y Streckeisen, 1982; Holcomb y Hutt, 1992 y Bormann, 2002)

Con lo descrito por Zurn et al. (1995), los niveles de ruido alto en las componentes verticales dentro de los rangos 0.2 y 1.7 mHz, pueden reducirse en más de 10 dB al restar las señales de presión escalada localmente obtenida del registro de aceleración vertical, mejorando así la señal para las observaciones en modo normal.

Dai y Tremberth (2004), muestran que la variación de la presión atmosférica en un día se debe a la presencia de la marea barométrica, la cual es una característica importante de la estructura y la circulación de la atmósfera media y alta. Este efecto es producido por el sol (mayores temperaturas), además de algunos otros factores como la marea gravitatoria y marea lunar. En muchos casos ocurren variaciones diurnas y semidiurnas desde los trópicos a latitudes más altas respectivamente.

En general, el ruido sísmico puede presentarse en muchos rangos de periodos, tal como se muestra en la Figura 3.8, donde se muestra el modelo de relación entre el comportamiento de algunos eventos y el ruido generado por estos.



*Figura 3.8; Análisis del comportamiento de eventos de ruido sísmico de distintas fuentes en relación al modelo de Peterson (Pérez, 2010).*

## CAPITULO IV

### PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

#### 4.1 SELECCIÓN DE DATOS

Con el objetivo de analizar la variación del ruido sísmico que se presentan en las estaciones de Banda Ancha de la Red Sísmica Nacional del Perú, se compilaron datos de acuerdo a dos tipos de enfoque: el primero trata de un aspecto diurno y el segundo uno estacional, esto para mostrar los cambios del comportamiento del ruido durante un día de registro (día y noche) y un año (en base a periodos estacionales; invierno y verano) respectivamente, para de esta manera, poder seleccionar estaciones que presenten el menor ruido posible y puedan afectar en lo menos posible en los nuevos límites de niveles de Ruido Sísmico.

El procedimiento se aplicará a cada componente del sismómetro (Norte, Este y Vertical) para ambos casos (análisis diurno y estacional).

##### 4.1.1 Variación diurna

A fin de conocer la variación de los niveles de ruido registrados por un sismómetro durante su funcionamiento en un día, en especial el cambio producido en los periodos cortos, se escogieron datos correspondientes a 24 horas de registro de alguna fecha del año 2018, y con la finalidad de mostrar una mayor representatividad durante periodos diurnos y nocturnos, los datos fueron divididos en cuatro grupos como sigue a continuación:

- El primer grupo considera datos desde las 00:00 hasta las 06:00 Hrs, siendo este tramo representativo para horas de madrugada.
- El segundo, datos desde las 06:00 a 12:00 Hrs, representando a horas de la mañana.
- El tercer, datos desde las 12:00 a 18:00 Hrs, siendo este tramo representativo para horas de la tarde.
- Y el cuarto grupo, datos desde las 18:00 hasta las 00:00 Hrs, siendo el tramo representativo del periodo nocturno u horas de la noche.

Cada grupo fue dividido en segmentos de una hora, con traslapes del 50% cada uno respecto al anterior, a fin de reducir la varianza al momento de determinar la densidad espectral de potencia (PSD).

Este tipo de análisis fue considerado debido a que las condiciones entre el día y la noche son diferentes, además que la presencia del ruido cultural en el día, podría deducirse diferenciando el resultado de las horas del día y/o noche.

#### **4.1.2 Variación estacional**

Para conocer el comportamiento del ruido en periodos estacionales, se seleccionó el registro de un día completo, correspondiente a una fecha representativa de cada temporada estacional como se muestra en la siguiente lista:

- Para el periodo estacional de invierno, se usó un día representativo de los últimos días del mes de junio del 2018.
- Para el periodo estacional de verano, se eligió uno día correspondiente a las últimas fechas del mes de diciembre del 2018.

Estos periodos estacionales del año, fueron considerados debido a que los factores climáticos son completamente distintos por lo que se espera una fuerte variación de ruido.

A diferencia de trabajos anteriores, no se toma en cuenta el día de inicio de cada estación, esto porque los factores climáticos representativos de dichas temporadas estacionales no se presentan exactamente en el primer día, sino días después de iniciado este periodo.

## **4.2 PROCESAMIENTO**

Se tendrá como muestra el registro de un día, en el que se cuenta con algunos datos originados por eventos sísmicos (eventos pequeños que no afectan en gran medida al proceso de los datos), pero se evitarán aquellos con que cuenten con varios gaps y picos o pulsos de calibración a fin de no perturbar el análisis del ruido presente.

Para el procesamiento se utilizará el módulo Obspy en el lenguaje de Python, el cual es un código abierto dedicado al procesamiento de datos sismológicos, que puede ser usado

en sistemas operativos como Windows y Linux. Los algoritmos utilizados se basan en los modelos descritos por Peterson (1993) y McNamara & Boaz (2006).

#### 4.2.1 Segmentación de la información

Para este estudio, el registro de un día es dividido en segmentos de 1 hora por lo que, se obtiene una longitud finita que contienen;

- 360 000 muestras para frecuencia de 100 muestras por segundo.
- 180 000 muestras para frecuencias de 50 muestras por segundo.
- 144 000 muestras para frecuencias de 40 muestras por segundo.
- 72 000 muestras para frecuencias de 20 muestras por segundo.

Los datos mencionados anteriormente, representan las 4 frecuencias de muestreo con que registran las estaciones de la Red Sísmica Nacional.

Estas muestras estarán distribuidas continuamente en el tiempo con un traslape de 50% entre cada segmento. El traslape es usado para reducir la varianza en la estimación de la densidad espectral de potencia o PSD (Cooley y Tukey, 1965).

Con la finalidad de reducir el tiempo de procesamiento de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), el número de muestras es truncada a la siguiente potencia más baja de 2. Si se toma como ejemplo 144 000 muestras con una frecuencia de muestreo de 40, quedará entonces 131.072 muestras; por lo tanto, el tiempo de señal sísmica a analizar será reducido a  $T_h = 3276.8$  s.

Ahora, el objetivo es reducir aún más la varianza en la estimación del PSD y para ello se tendrá que dividir el nuevo segmento de tiempo de señal sísmica ( $T_h = 3276.8$  s.) en 13 nuevos segmentos con traslapes de 75% tal como sugiere McNamara & Boaz (2006), por lo que el nuevo segmento a analizar será:  $T_r = T_h/4 = 819.2$ s, con 32,768 muestras.

El tamaño de la muestra N es escogido en base al periodo más largo de interés  $T_l$  (o más baja en frecuencia  $f_l$ ). En general, la longitud de registro,  $T_r = N\Delta t$ , se elige de modo que sea 10 veces el período de resolución más largo  $T_l$ : entonces,  $T_l = 1/f_l = T_r/10 = 90$  s. El período más corto  $T_s$ , (la frecuencia más alta,  $f_h$ ) es

equivalente a la frecuencia de Nyquist,  $f_c = 1/2 \cdot t = 20\text{Hz}$ , y está dado por  $T_s = 1/f_c \leq 1/f_h \leq 0.05\text{s}$ .

#### 4.2.2 Extracción de tendencia

Para minimizar la contaminación de la señal con otras de periodos largos, los datos tienen que ser transformados a un valor medio de cero y cualquier tendencia lineal de periodo largo se eliminará mediante el método de pendiente de promedios.

Si  $u_n$  representa a los valores de los datos en la serie de tiempo  $u(t)$  de longitud  $T_r$  y  $N$  muestras, la media de los datos está dado por:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n \quad \text{Ecuación 4.1}$$

La tendencia de periodo largo  $T_{lp}$ , está definido como cualquier componente de frecuencia, cuyo periodo es más largo que la longitud de registro  $T_r$  y se define como:

$$T_{lp} = \alpha_u \left( t - \frac{T_r}{2} \right) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde  $0 \leq t \leq T$  y:

$$\alpha_u = \frac{1}{\left(\frac{T_r}{3}\right)\left(\frac{2T_r}{3}\right)} \left[ \int_{\frac{2T_r}{3}}^{T_r} u(t) dt - \int_0^{\frac{T_r}{3}} u(t) dt \right] \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Si las tendencias no se eliminan en los datos, se pueden producir grandes distorsiones en el procesamiento espectral anulando la estimación de cantidades espectrales para las frecuencias bajas.

Restando la media y la tendencia de periodo largo de la serie de tiempo original  $u(t)$ , se produce una nueva serie de tiempo  $x(t)$ :

$$x(t) = u(t) - u_{mean} - T_{lp} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

### 4.2.3 Función tapering

Para evitar la pérdida de datos en los extremos de la señal, luego del proceso de transformada de Fourier, se aplica una reducción sinusoidal del 10 % en los laterales de la serie de tiempo. Se define entonces una nueva serie de tiempo  $y(t)$ , tal que:

$$y(t) = x(t) * \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} * \frac{t}{T_r/10}\right) \quad 0 \leq t \leq T_r/10$$

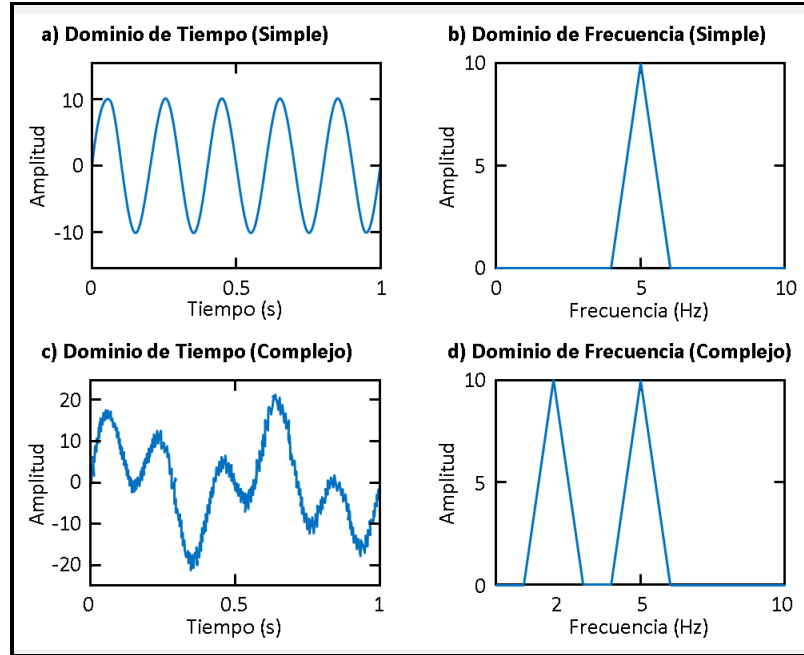
$$y(t) = x(t) \quad T_r/10 \leq t \leq T_r - T_r/10 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$y(t) = x(t) * \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} * \frac{T_r-t}{T_r/10}\right) \quad T_r - T_r/10 \leq t \leq T_r$$

Reducir la serie temporal tiene el efecto de suavizar la FFT y minimizar el efecto de la discontinuidad entre el principio y el final de la serie temporal. La reducción de la varianza de la serie de tiempo se puede cuantificar por la relación de la potencia total en la FFT sin procesar, con la potencia total en el filtro suavizado (1.142857) y se usará para corregir la potencia absoluta en el espectro final (Bendat y Piersol, 1971).

### 4.2.4 Densidad espectral de potencia

El método más usado para analizar la densidad espectral de potencia (PSD) es la transformada de Fourier (Cooley y Tukey, 1965), siendo una herramienta que evalúa el comportamiento periódico de una señal en el dominio de tiempo. Esta señal es transformada, desde el dominio de tiempo, al dominio de frecuencia, tal como se muestra en la Figura 4.1.



**Figura 4.1;** Comparación entre el dominio de tiempo y frecuencia de una señal simple y una compleja. (a) muestra una señal simple en el dominio de tiempo, (b) muestra el dominio de frecuencia de la señal simple, (c) muestra una señal compleja en dominio de tiempo y (d) su respuesta en el dominio de frecuencia. (Modificado de Cooley y Tukey, 1965).

El rango finito de la Transformada de Fourier de una serie de tiempo periódica y (t), está dada por:

$$Y(f, T) = \int_0^{Tr} y(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde, el número de estimaciones de amplitud de frecuencia  $nfft = (N/2)+1$ . Para valores de frecuencia discreta ( $f_k$ ), las componentes de Fourier están definidas por:

$$Y_k = \frac{Y(f_k, T)}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Para  $f_k = k/(Nt)$  cuando  $k=1, 2, \dots, N-1$

Entonces, usando las componentes de Fourier definidas en las ecuaciones anteriores, el total de la densidad espectral de potencia estimada, está definida como:

$$P_k \frac{2\Delta t}{N} |Y_k|^2 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Con lo anterior, la potencia total ( $P_k$ ), es simplemente el cuadrado del espectro de la amplitud con un factor de normalización de  $2\Delta t/N$ . Este proceso es repetido para cada segmento, separado por un traslape dentro la hora analizada. Después de que todos los segmentos sean analizados, la potencia total es promediada por  $q$ , que es la cantidad de segmentos dentro de la hora (en este caso sería 13). Entonces, la estimación final estará dado por;

$$P_k = \frac{1}{q} (P_{k,1} + P_{k,2} + P_{k,3} + \dots + P_{k,q}) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde  $P_{k,q}$ , es la estimación en la frecuencia  $f_k$  del segmento del tiempo  $qth$ . Debido al promedio del segmento, la cantidad de  $P_k$  tiene  $2q = 26$  grados de libertad, dando entonces un nivel de confianza de 95% de que el punto se encuentra dentro de los -2.14 dB a +2.87 dB de la estimación (Peterson, 1993).

En este punto, se corrige  $P_k$  para la reducción sinusoidal del 10 por ciento aplicada anteriormente en el procesamiento, de manera que  $P_k = P_k * 1.142857$  y luego se aplica la deconvolución de la respuesta del instrumento del sismómetro. Finalmente, se convierte el PSD suavizado en decibeles con respecto a la aceleración, esto para la comparación directa con el modelo de Peterson:

$$P_k = 10 * \log_{10}(P_k) \quad \text{Ecuación 4.10}$$

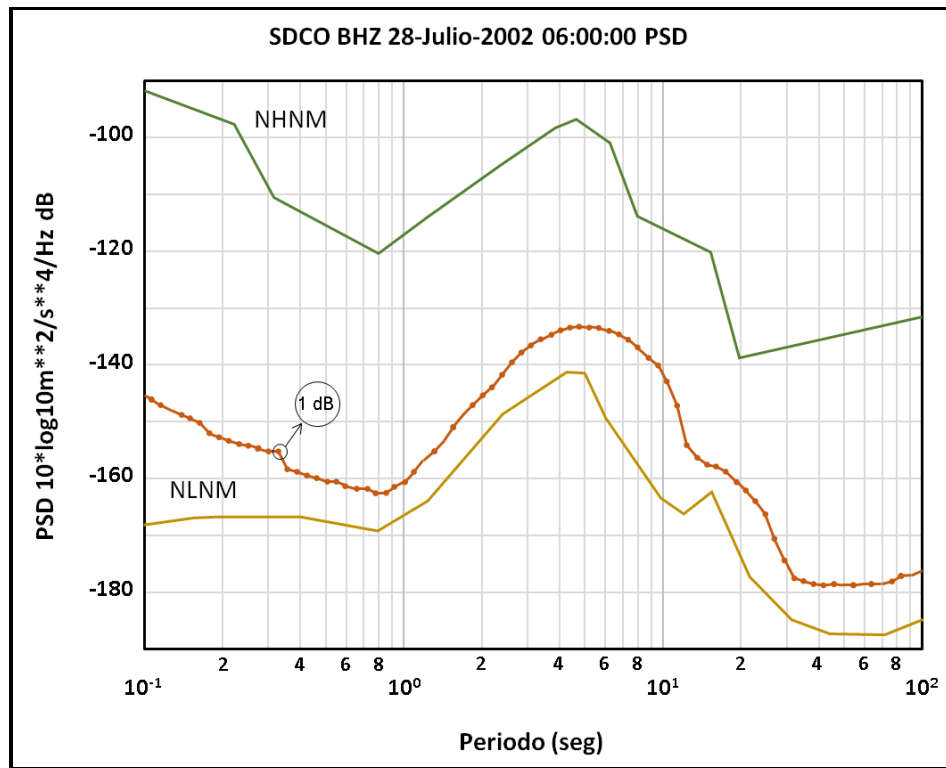
Una limitación, es que este modelo, provee una estimación espectral estable dentro de un rango definido de periodos (0.05-90 s).

#### 4.2.5 Función de probabilidad de densidad

Dado a que el objetivo es tener una idea de la verdadera variación del ruido en una estación, se puede generar funciones de probabilidad de densidad o PDF a partir de PSD procesados. Para muestrear adecuadamente los PSD, se toman promedios de octavas completas en intervalos de 1/8. Este procedimiento reduce el número de frecuencias en un factor de 169 de  $nfft=16.385$  a 97; por lo tanto, la potencia se promedia entre el período corto, ( $T_s$ ) y el período largo de  $T_l = 2 * T_s$ , con un período central  $T_c$ ; de modo que  $T_c = \text{sqrt}(T_s * T_l)$  sea el período de la media

geométrica dentro de la octava. El período varía desde  $T_s$  hasta  $T_l$  y se almacena con el período central de la octava  $T_c$  para análisis futuros.

Así mismo,  $T_s$  se incrementa en 1/8 de octava, de manera que  $T_s = T_s * 2^{0.125}$ , para calcular la potencia promedio para la siguiente casilla de período.  $T_l$  y  $T_c$  se recalculan y las potencias se promedian dentro del rango del período siguiente  $T_s$  a  $T_l$ , y el proceso continúa hasta que se alcanza el período de resolución más largo dada la longitud de la ventana de la serie de tiempo de los datos originales  $T_r / 10$  (Figura 4.2). Este proceso se repite por cada estimación para un PSD de 1 hora, lo que da como resultado varias estimaciones de PSD uniformes para cada componente de la estación analizada. Las potencias se acumulan en intervalos de 1 dB para producir gráficos de distribución de frecuencia, para cada período.



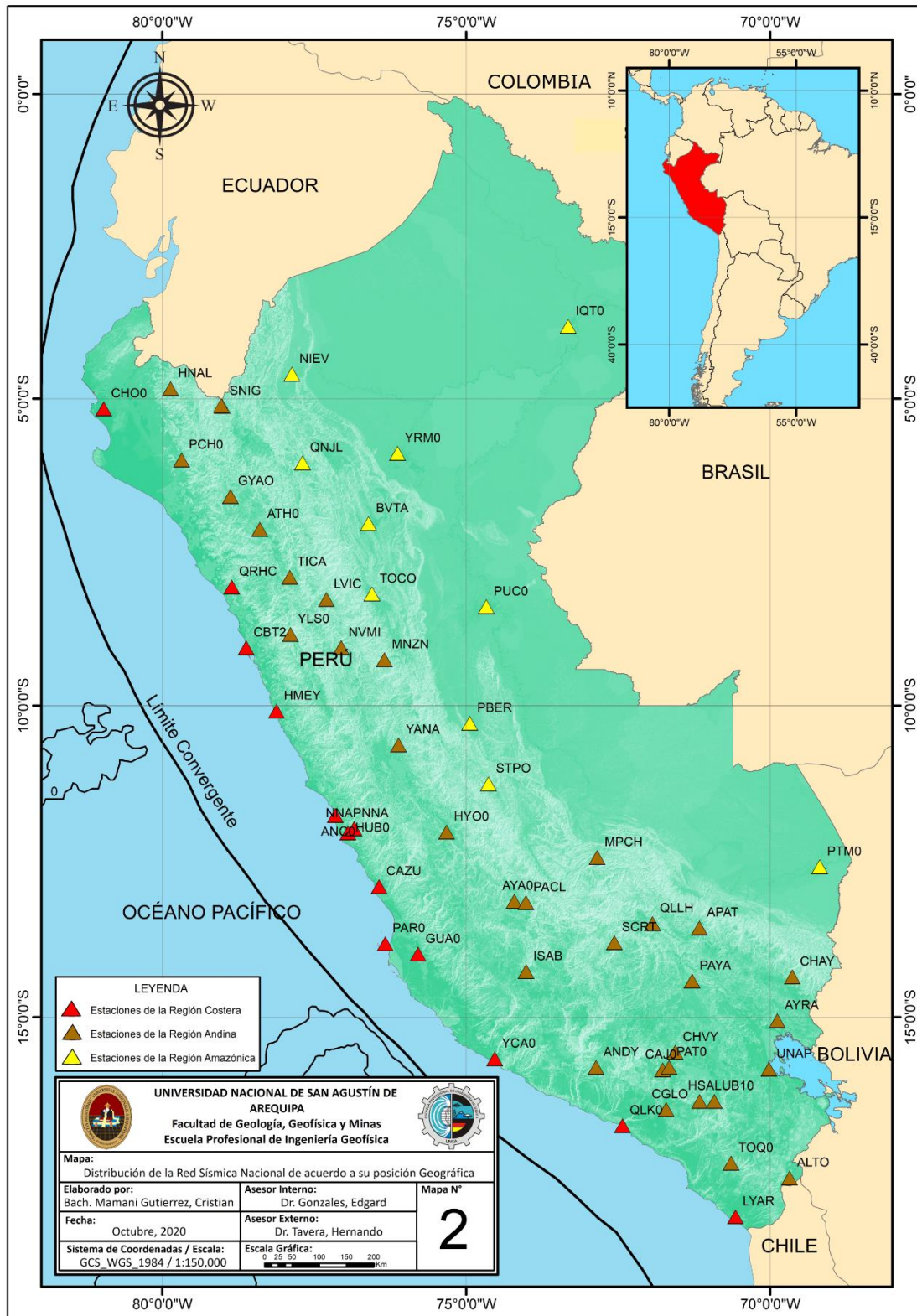
*Figura 4.2; Las potencias se promedian en octavas completas en intervalos de 1/8. Se muestran los puntos centrales del promedio para la estación de SDCO, (Modificado de McNamara & Boaz, 2006).*

### 4.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las estaciones sísmicas ubicadas en el país, son agrupadas de acuerdo a su posición geográfica en 3 regiones: Región Costera, Región Andina y Región Amazónica, tal como se muestra en la Tabla 4.1 y la Figura 4.3.

*Tabla 4.1; Clasificación de las estaciones de acuerdo a su posición geográfica.*

N°	REGIÓN COSTERA	REGIÓN ANDINA	REGIÓN AMAZÓNICA
1	ANC0	ALTO	BVTA
2	CAZU	ANDY	IQT0
3	CBT2	APAT	NIEV
4	CHO0	ATH0	PBER
5	GUA0	AYA0	PTM0
6	HMEY	AYRA	PUC0
7	HUB0	CAJ0	QNJL
8	LYAR	CGLO	STPO
9	NNA	CHAY	TOC0
10	NNAP	CHVY	YRM0
11	PAR0	GYAO	
12	QLK0	HNAL	
13	QRHC	HSAL	
14	YCA0	HYO0	
15		ISAB	
16		LVIC	
17		MNZN	
18		MPCH	
19		NVMI	
20		PACL	
21		PAT0	
22		PAYA	
23		PCH0	
24		QLLH	
25		SCRT	
26		SNIG	
27		TICA	
28		TOQ0	
29		UB10	
30		UNAP	
31		YANA	
32		YLS0	



*Figura 4.3; Distribución de las estaciones sísmicas que integran la Red Sísmica Nacional del Perú de acuerdo a su posición geográfica.*

Estas estaciones sísmicas son agrupadas, debido a que el comportamiento en cada tipo de región puede ser similar, lo que ayudaría a conocer las características sobre las cuales se encuentran ubicadas estas estaciones sísmicas.

La información geológica obtenida, para analizar el entorno de cada estación sísmica ubicada, se presenta en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2; Información geológica de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú.*

N°	CÓDIGO	*TIPO DE SUELO
1	ALTO	Gravas y material limoarenoso.
2	ANCO	Depósitos eólicos.
3	ANDY	Tonalitas con contenido de plagioclasas.
4	APAT	Cuarcitas, areniscas, lutitas y pizarras intercaladas.
5	ATH0	Calizas con lechos de lutitas y margas.
6	AYA0	Materiales tobáceos, posiblemente traqueoandesíticos.
7	AYRA	Gravas, arenas, limos y arcillas poco consolidadas.
8	BVTA	Conglomerados con matriz limoarenosa.
9	CAJO	Lavas andesíticas.
10	CAZU	Rocas plutónicas; monzodioritas y monzogranitos.
11	CBT2	Material sedimentario intercalado con material volcánico
12	CGLO	Gabrodioritas.
13	CHAY	Sucesión de pizarras fracturadas.
14	CHOO	Areniscas arcillosas
15	CHVY	Gravas y arenas poco consolidadas de matriz limoarenosa.
16	GUA0	Monzogranito.
17	GYAO	Conglomerado basal con intercalaciones de toba andesítica.
18	HMEY	Derrames de andesita, dacita, riolita y piroclásticos.
19	HNAL	Conglomerados con matriz arenosa y limoarcillosa.
20	HSAL	Andesitas porfiríticas.
21	HUB0	Ricas ígneas; dioritas.
22	HYOO	Depósitos de terrazas; conglomerados, arenas y arcillas.
23	IQT0	Gravas, arenas y arcillas inconsolidadas.
24	ISAB	Rocas volcánicas (Tobas riolíticas).
25	LVIC	Rocas metamórficas, betas de cuarzo lechoso.
26	LYAR	Secuencia clásticas marinas; areniscas y lutitas.
27	MNZN	Rocas metamórficas; esquistos.
28	MPCH	Areniscas intercaladas con pizarras.
29	NIEV	Areniscas de grano grueso con lentes de conglomerado.
30	NNA	Granito
31	NNAP	Granito

32	NVMI	Arcillas, areniscas y conglomerados.
33	PACL	Depósitos volcánicos andesíticos.
34	PAR0	Rocas intrusivas; granodioritas.
35	PAT0	Material andesítico.
36	PAYA	Depósitos aluviales; areniscas, arcillas y limolitas.
37	PBER	Areniscas de grano medio y limolitas bioturbadas.
38	PCH0	Rocas metamórficas, mayormente esquistos.
39	PTM0	Material conglomerático de guijarros de arcilla.
40	PUC0	Intercalación de capas de areniscas, lutitas, calizas y carbón.
41	QLK0	Rocas metamórficas.
42	QLLH	Intercalaciones de arcillas y lutitas
43	QNJL	Secuencia de conglomerados, areniscas y arcillas
44	QRHC	Granodioritas.
45	SCRT	Cantos envueltos en matriz areno-limosa.
46	SNIG	Depósitos volcánicos y sedimentarios.
47	STPO	Secuencia de lutitas y areniscas metamorfizadas.
48	TICA	Cuarcitas y areniscas medio intercaladas con lutitas.
49	TOC0	Clastos subangulosos de material ígneo con matriz esquistosa.
50	TOQ0	Material volcánico, con granos de cuarzo, feldespatos y micas.
51	UB10	Coladas de lava de composición andesítica.
52	UNAP	Lutitas limolíticas, areniscas y calizas intercaladas.
53	YANA	Esquistos.
54	YCA0	Conglomerados con matriz limo-arenosa.
55	YLS0	Areniscas y arcillas intercaladas.
56	YRMO	Areniscas, limoarcillas y conglomerados poco consolidados.

---

\* EL tipo de suelo fue obtenido de acuerdo a la geología regional contenida en los mapas publicados por el INGEMMET.

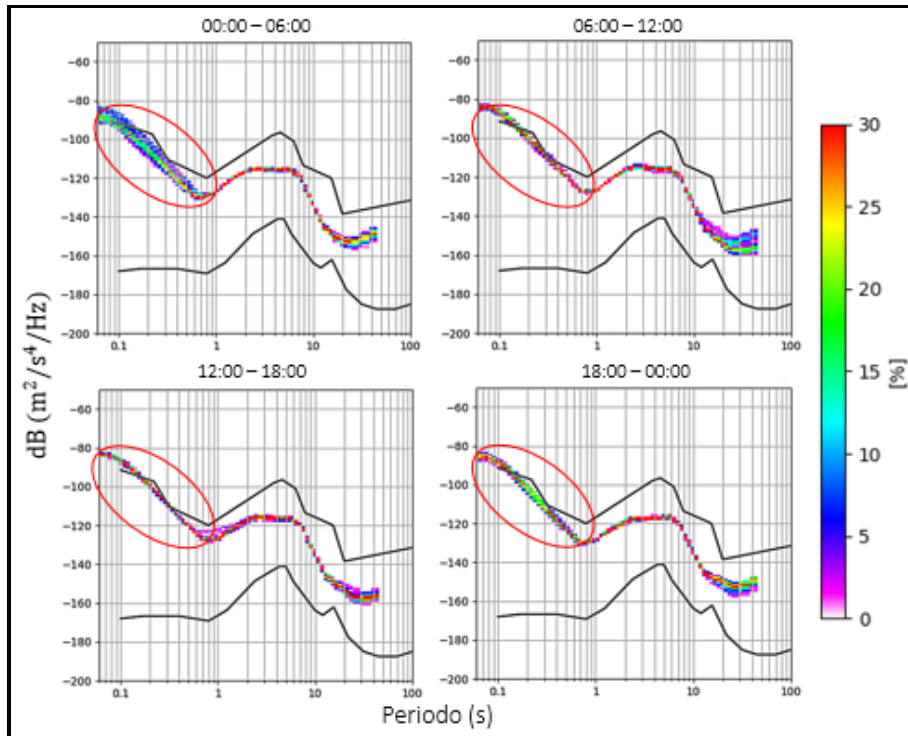
#### 4.3.1 Variación Diurna

Los estudios de variación diurna, son aplicados a los registros completos de un día de una estación sísmica y ayudan a analizar y evaluar el comportamiento del ruido presente en un día de registro, especialmente en el rango de periodos cortos y largos donde los cambios se presentan debido a agentes culturales y naturales. Los resultados se muestran a detalle en el Anexo A.

#### 4.3.1.1. Estaciones Sísmicas ubicadas en la Región Costera

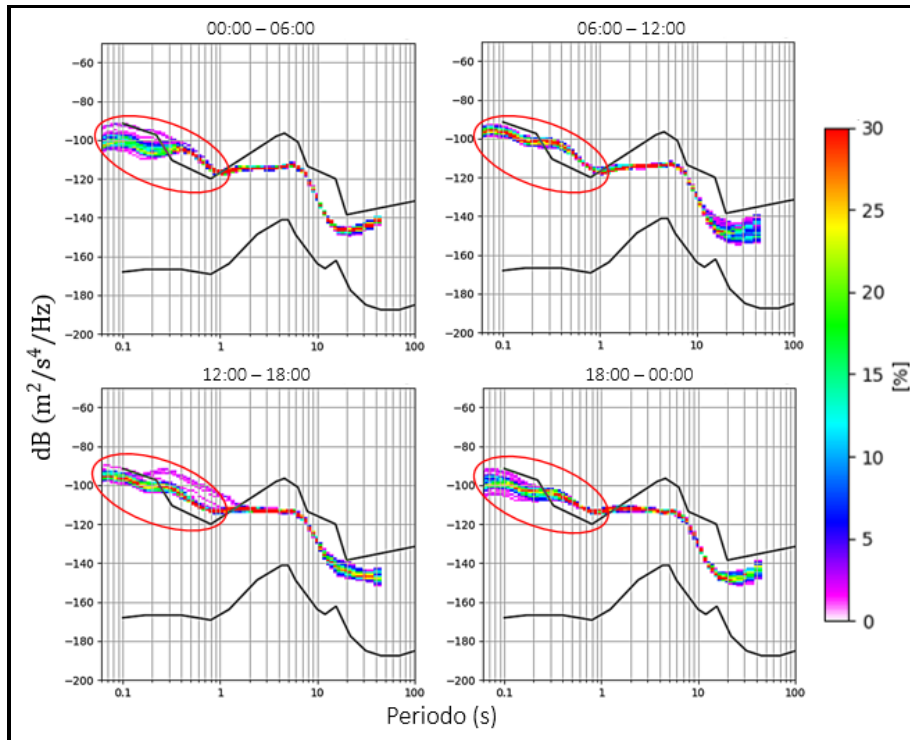
##### A) Variación de periodos cortos ( $< 1$ s)

De acuerdo a los resultados obtenidos, las estaciones de ANCO, GUA0 y HUB0 muestran niveles altos de ruido, que en horas de la mañana (06:00 – 12:00) y la tarde (12:00 – 18:00) llegan hasta el límite máximo establecido (ver Figura 4.4). Estos valores varían hasta  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad para horas de la madrugada (00:00 – 06:00), reduciéndose hasta  $\pm 2$  dB en horas de la mañana y la tarde, volviendo a aumentar para horas de la noche (18:00 – 00:00) en  $\pm 3$  dB. Las tres componentes presentan características similares a lo anteriormente mencionado. Las componentes horizontales se encuentran con 2 dB por encima de la componente vertical, la cual podría deberse a la mayor estabilidad que presenta esta última componente. La variación del ruido que se produce durante horas de la mañana y la tarde se deberían a que estas se encuentran cerca de áreas pobladas (Ancón, Guadalupe y Ate-Lima respectivamente), por lo que la presencia de la actividad humana (tránsito de vehículos, actividades industriales, etc.) de cada zona estaría afectando este rango de periodos. A pesar que las estaciones de HUB0 y GUA0 se encuentran en zonas más pobladas, estas no presentan niveles más altos de ruido, por lo que el tipo de suelo (roca) sobre el que se encuentran podría estar favoreciendo en la menor propagación de las ondas generadas por este tipo de ruido cultural. En el caso de la estación ANCO, ocurre lo contrario, dado a que estos se encuentran en suelos poco consolidados.



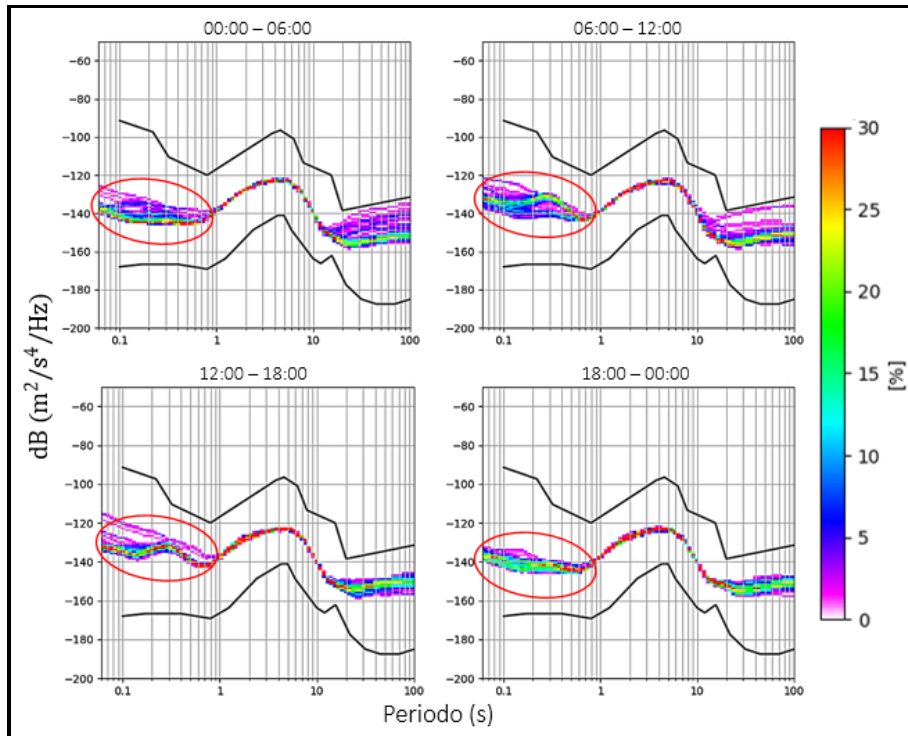
*Figura 4.4; PDF de la componente vertical de la estación de Mayorazgo (HUB0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. En áreas rojas, valores de probabilidad de tendencia elevada para horas del día y la tarde, esto debido actividades humanas.*

La estación YCA0 presenta niveles de ruido superiores al límite máximo establecido (ver Figura 5.4). Esta variación se presenta en horas de la madrugada y la noche con valores comprendidos entre  $\pm 5$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y disminuyen hasta  $\pm 3$  dB para horas de la mañana y la tarde. Este comportamiento es similar para las tres componentes. Las componentes horizontales presentan valores ligeramente por encima de la componente vertical (2 dB). Este comportamiento podría deberse a la actividad humana presente cerca de esta estación (localidad de Yauca), considerando, además, que está cerca de la Panamericana Sur, una de las carreteras de más alto tránsito del Perú. Esta fuente puede ser el causante de este elevado nivel de ruido, además el tipo de suelo sobre el que se encuentran, suelos poco consolidados, podrían favorecer la propagación de este tipo de ruido.



**Figura 4.5;** PDF de la componente vertical de la estación de Yauca (YCA0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido sobrepasan el límite máximo permitido (círculos rojos) que podría estar relacionado al alto tránsito en las carreteras cercanas.

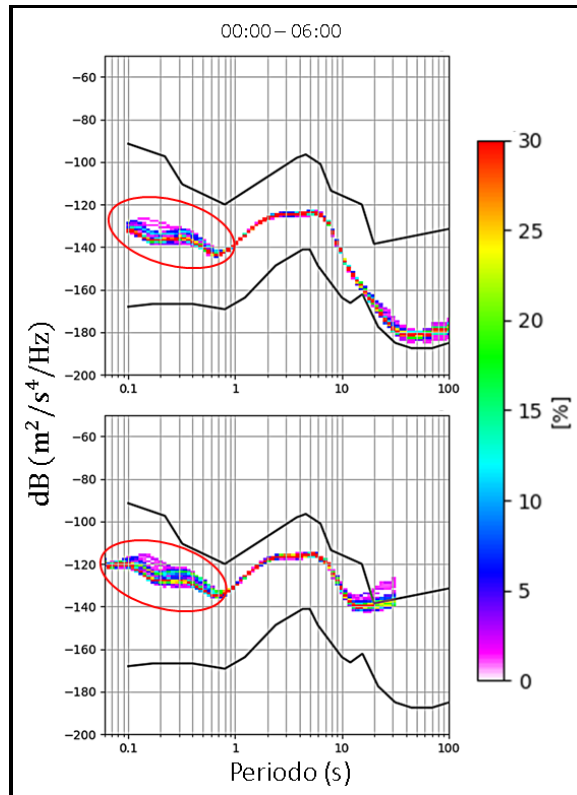
Las estaciones de CAZU, CBT2, CHO0, HMEY, LYAR, PAR0, QLK0 y QRHC presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos y muy por debajo del nivel máximo, esto a diferencia de las estaciones anteriormente analizadas (ver Figura 4.6). En horas de la madrugada el rango de variación se encuentra en los  $\pm 5$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y aumenta hasta  $\pm 6$  dB para horas de la mañana y la tarde, volviendo a disminuir a  $\pm 4$  dB en horas de la noche. Las tres componentes presentan el mismo comportamiento, siendo en algunos casos la componente vertical más estable. Esta variación que ocurre entre las horas de la mañana y la tarde respecto a la madrugada y la noche, puede deberse a actividades humanas cerca de estas estaciones, al poco tránsito cerca, y al tipo de suelo sobre el que se encuentran. Este factor ayuda a que este tipo de ruido no sea alto, tal es el caso de la estación QRHC, CAZU y QLK0 que presentan suelos bien consolidados (roca).



**Figura 4.6;** PDF de la componente vertical de la estación de Quirihuc (QRHC para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Según las áreas rojas, el nivel de ruido se mantiene dentro de los límites máximo y mínimo permitido, el comportamiento es similar en las componentes horizontales.

Las estaciones de NNA y NNAP, presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos (ver Figura 4.7). La variación en horas de la madrugada y la noche se da en  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, aumentando ligeramente a  $\pm 4$  dB para horas de la mañana y la tarde. A pesar de encontrarse en la misma posición geográfica, la estación NNAP presenta valores de hasta 8 dB por encima de los que presenta la estación NNA, esto podría deberse a la profundidad en la que se encuentra esta estación (40 m aproximadamente), haciéndola menos ruidosa en este rango de periodos. Este comportamiento es similar en las tres componentes, siendo la vertical ligeramente más estable. Para tal caso, se puede decir que las características del entorno, posición en superficie y profundidad, influyeron en la propagación de este tipo de ruido para cada estación, siendo la más satisfactoria y menos ruidosa la de la estación NNA.

Peterson (1993), determinó los niveles de ruido para la estación NNA en sus tres componentes de registro, cuyos resultados obtenidos por este autor muestran niveles bajos de ruido presentes en esta estación. Comparando este resultado con los obtenidos en este estudio, se aprecia un resultado similar, lo que indicaría que aquellos sensores ubicados en profundidad presentan comportamientos más estables y menos ruidosos, en comparación con los sensores en superficie.

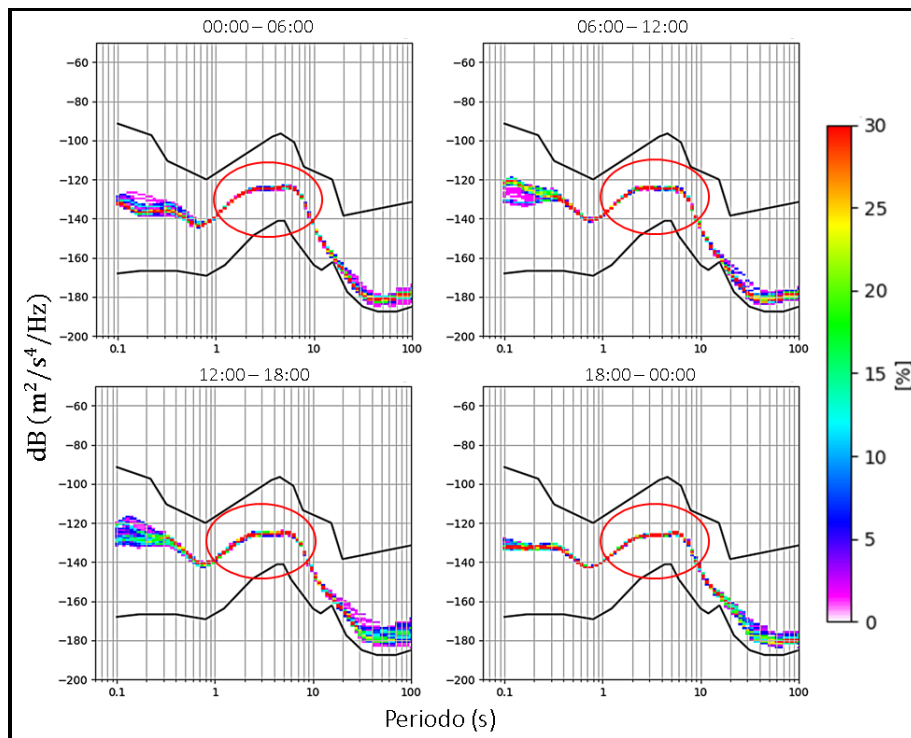


**Figura 4.7;** PDF de la componente vertical de la estación NNA (en profundidad) y NNAP (en superficie) respectivamente, para horas de madrugada (00:0 –06:00). La estación NNA presenta menores niveles de ruido en comparación con la estación NNAP (ver círculos rojos).

#### B) Variación de periodos intermedios (1 – 15 s)

Las estaciones ANC0, CAZU, CBT2, CHO0, GUA0, HUB0, LYAR, NNA, NNAP, PAR0, HMEY, QLK0, QRHC y YCA0, presentan niveles de ruido dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (ver Figura 4.8). La variación permanece dentro de los  $\pm 2$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, la cual es constante durante todo el día de registro. La componente vertical presenta

un comportamiento de hasta 5 dB por encima de las componentes horizontales. Este tipo de ruido se debería a los microsismos oceánicos secundarios, tal como lo menciona Longuet y Higgins (1950) y también al tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones. Asimismo, se nota un pequeño pico entre los 2 a 3 segundos que se atribuye a la actividad microsísmica oceánica.

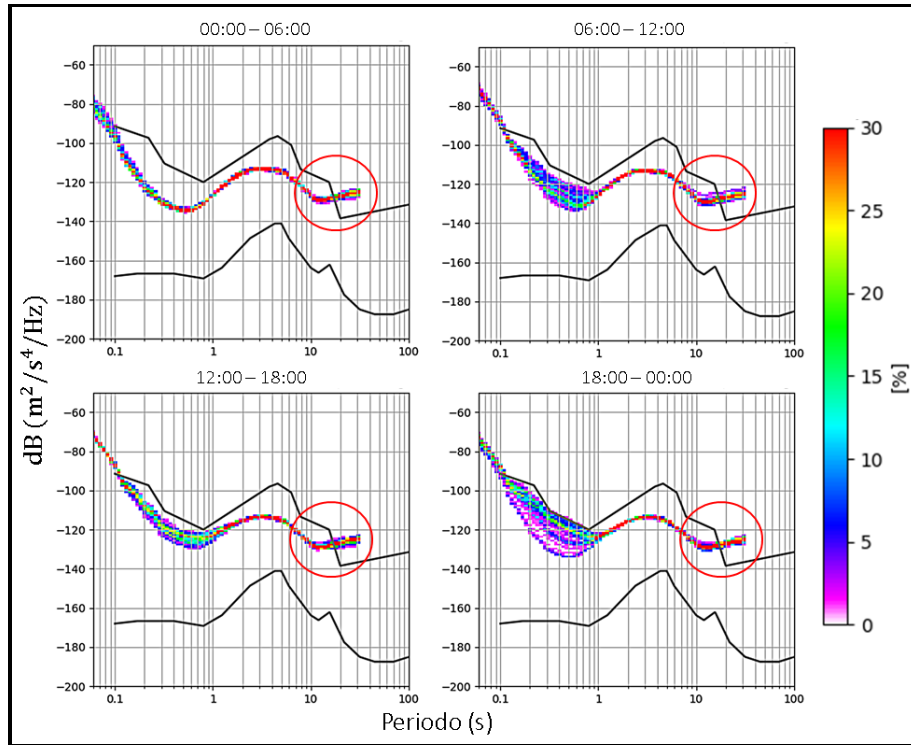


**Figura 4.8;** PDF de la componente vertical de la estación de Ñaña Internacional (NNA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. En este caso, el rango intermedio permanece dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

### C) Variación de periodos largos (> 15 s)

De acuerdo a los resultados obtenidos para este rango de periodos, las estaciones ANC0, CBT2, NNAP, CHO0 y YCA0 presenta niveles de ruido por encima del límite máximo establecido (ver Figura 4.9). Los valores, en horas de la madrugada y la noche, se presentan entre los  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y aumentan hasta  $\pm 6$  dB para horas de la mañana y la tarde. Las tres componentes presentan este tipo de comportamiento, siendo en algunos casos la componente vertical ligeramente menor que las horizontales. Estos valores altos podrían deberse a la interacción de la variación de las presiones atmosféricas con

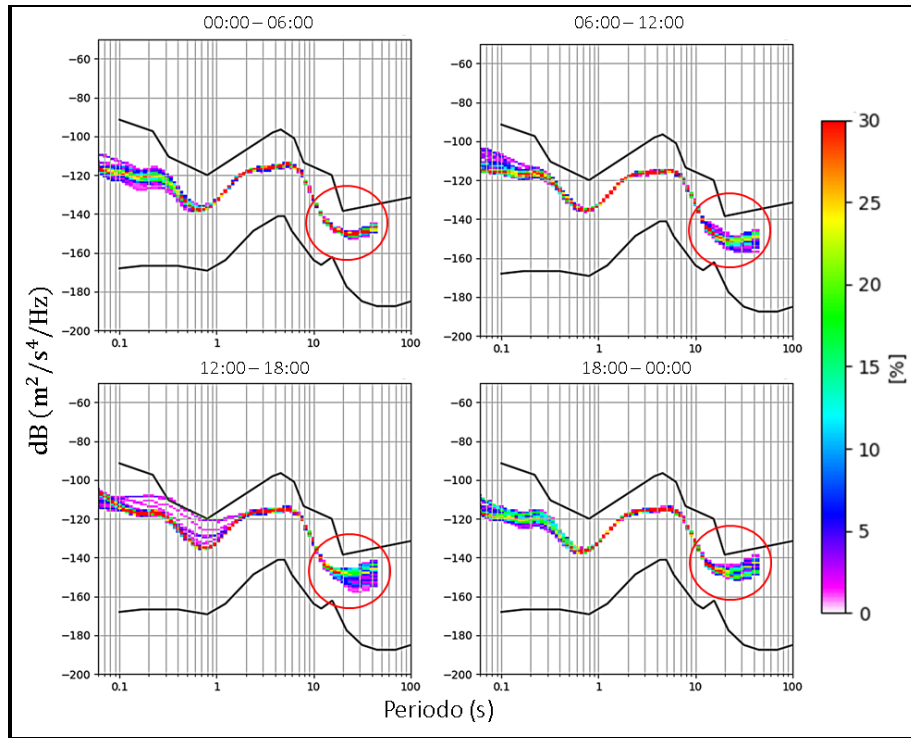
respecto al tipo de suelo y que en este caso se trata de suelos poco consolidados. También podría ser debido a los efectos del equipo, dado a que el comportamiento es diferente al que presentan otras estaciones en este rango de periodos.



**Figura 4.9;** PDF de la componente vertical de la estación de Nuevo Chimbote (CBT2) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se presentan por encima del límite máximo establecido (círculos rojos).

En las estaciones GUA0, HMEY y LYAR se presentan niveles de ruido ligeramente por debajo del límite máximo establecido en las componentes horizontales y valores muy por debajo de este límite en la componente vertical (ver Figura 4.10). Estos valores se encuentran entre los  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad para horas de la madrugada y la noche, y para horas de la mañana y la tarde estos valores aumentan hasta los  $\pm 6$  dB, esto en las componentes horizontales. La componente vertical presenta valores de  $\pm 3$  dB en horas de la madrugada y la noche, y estos aumentan hasta  $\pm 4$  dB para horas de la mañana y la tarde. Las componentes horizontales se encuentran con 12 dB por encima de la componente vertical. Los valores obtenidos se deberían a la ubicación de estas en

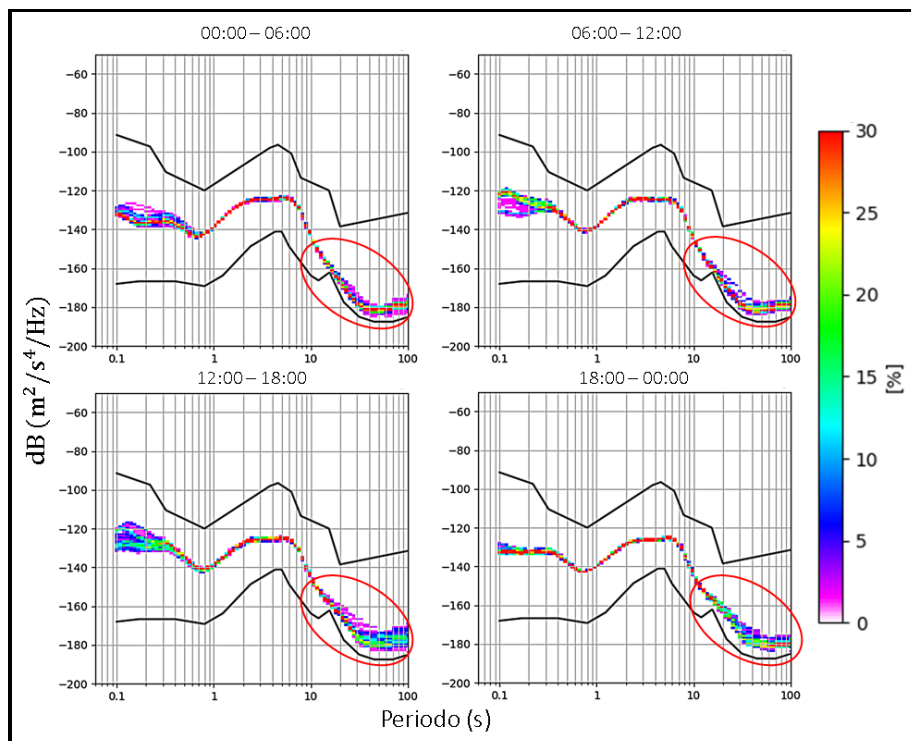
superficie y al tipo de suelo sobre el que están instaladas, el cual podría generar procesos de inclinación debido a la variación de presión atmosférica, afectando en su mayoría a las componentes horizontales, siendo la componente vertical presentaría un comportamiento más estable.



**Figura 4.10;** PDF de la componente vertical de la estación de Guadalupe (GUA0 para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se presentan dentro del límite máximo y mínimo establecido (círculos rojos).

Para las estaciones CAZU, HUB0, PAR0, QLK0 y QRHC, los niveles de ruido se encuentran muy por debajo del límite máximo establecido. En horas de la madrugada y la noche estos valores varían entre los  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y para horas de la mañana y la tarde estos valores aumentan hasta los  $\pm 5$  dB. Las componentes horizontales se encuentran con 6 dB por encima de la componente vertical. Este comportamiento podría deberse a la interacción de la variación de presión atmosférica con el tipo de suelo (en este caso se trata de suelos consolidados) haciendo a las componentes horizontales ligeramente más estables y con comportamientos similares a la componente vertical.

La estación NNA presenta niveles de ruido relativamente cercanos al límite mínimo establecido (ver Figura 4.11), que se mantienen estables con rangos de  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad para horas de la madrugada, la mañana y la noche, y aumentan ligeramente hasta en  $\pm 5$  dB para horas de la tarde. Este comportamiento es similar en las tres componentes. La estabilidad de estos valores se debería a la profundidad (40m) y el tipo de suelo sobre el que se encuentra. En comparación con la estación NNAP, a pesar de encontrarse en una misma posición geográfica, la mayor estabilidad se da en la estación NNA y se debería a la profundidad en la que se encuentra, lo que no ocurre con la estación NNAP que está en superficie. Con esto se puede afirmar que esta diferencia de profundidad a la cual se encuentra las estaciones, hacen que la estación NNA sea más estable en las tres componentes.

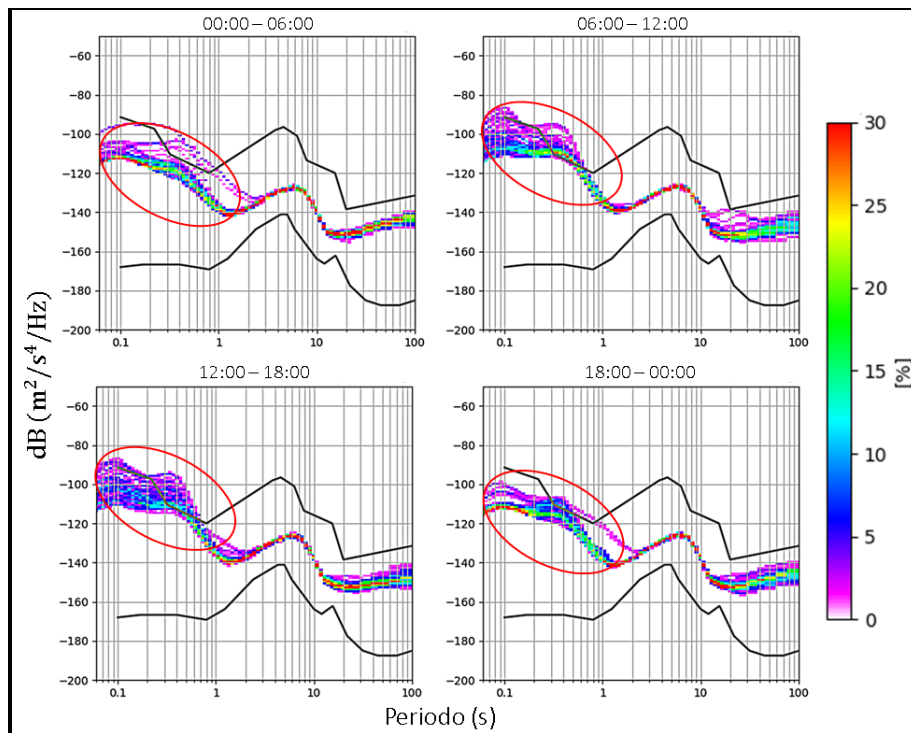


**Figura 4.11;** PDF de la componente vertical de la estación de Ñaña Internacional (NNA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido en el rango de periodos largos se encuentran próximos al límite mínimo establecido (círculos rojos).

### 4.3.1.2. Estaciones sísmicas ubicadas en la Región Andina

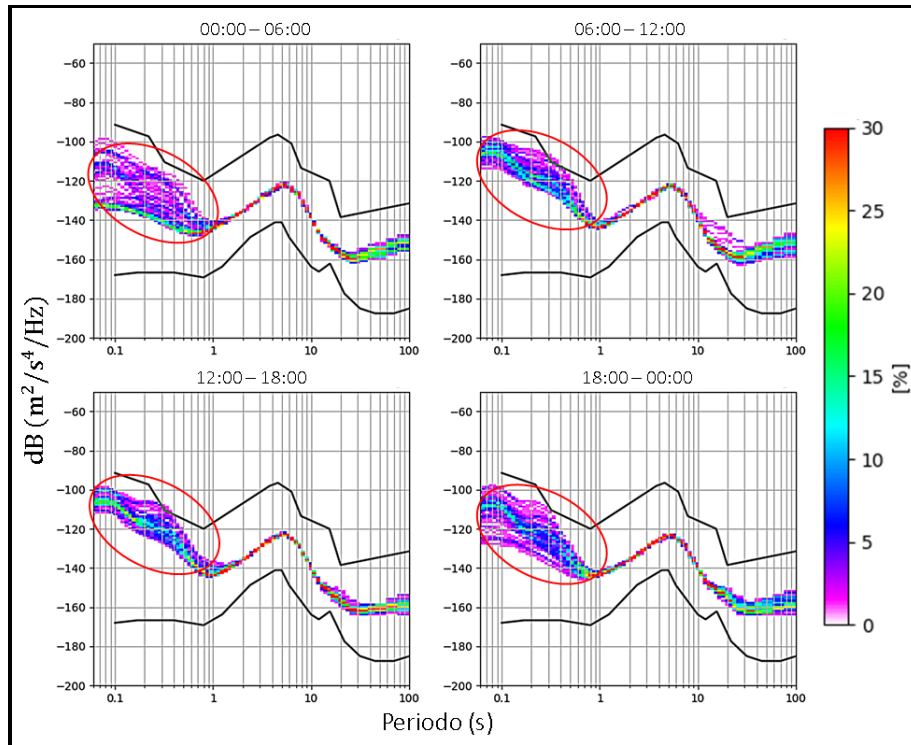
#### A) Variación de periodos cortos (< 1 s)

Con los resultados obtenidos, las estaciones de AYA0, AYRA, CHVY, PAYA, QLLH, TICA y UNAP presentan niveles de ruido que superan el límite máximo establecido en horas del día y la tarde (ver Figura 4.12). En horas de la madrugada y la noche estos valores se encuentran entre los  $\pm 6$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y para horas de la mañana y la tarde llegan hasta  $\pm 8$  dB. Las componentes horizontales presentan ligeras variaciones de 3 dB respecto a la componente vertical. Este ruido podría ser debido a la actividad humana presente cerca de cada una de estas estaciones; Ayacucho, Ayrapuni, Canacota, Langui, Quillihuata, Sarín y Puno respectivamente). Además, se debe tomar en cuenta el tipo de suelo sobre el que se encuentra las estaciones (suelos poco consolidados), ya que estarían favoreciendo la propagación de este tipo de ruido.



*Figura 4.12; PDF de la componente vertical de la estación de Payapunku (PAYA) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche (círculos rojos).*

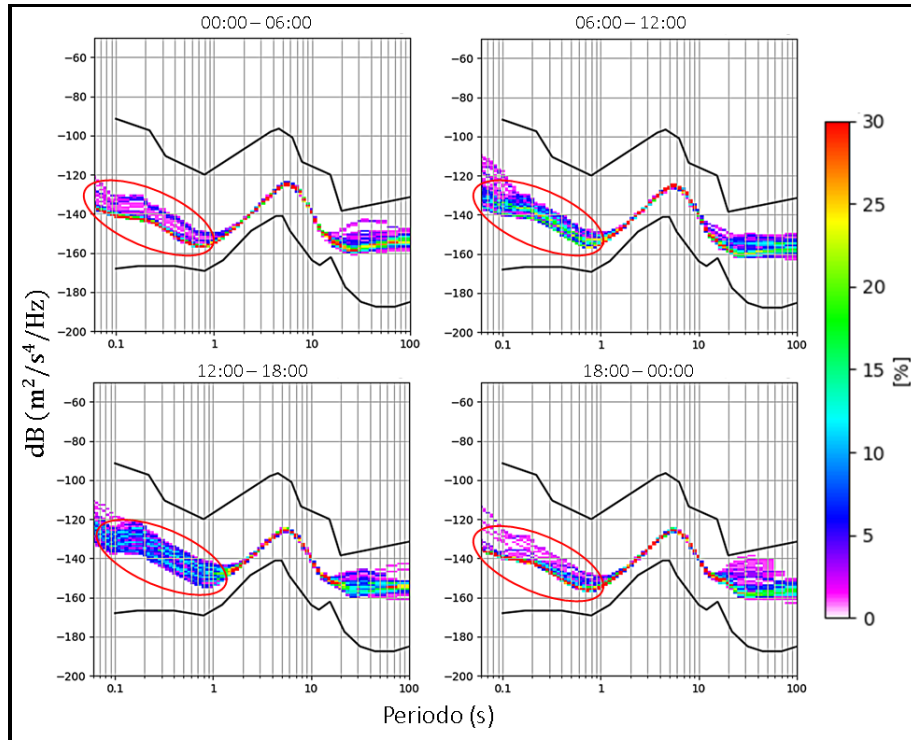
Las estaciones ALTO, ANDY, CGLO, ISAB, LVIC, SCRT, PACL YLS0 y TOQ0 presentan también ruidos elevados y muy próximos al límite máximo establecido (ver Figura 4.13). En horas de la madrugada la variación se da entre los  $\pm 8$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad. Para horas de la mañana y la tarde estos valores aumentan a  $\pm 10$  dB y vuelven a disminuir para horas de la noche. La tendencia de los valores en horas del día y la tarde se encuentran en 4 dB respecto a la tendencia generada en horas de la madrugada y la noche. Las componentes horizontales presentan valores relativamente similares a la componente vertical. Estos niveles de ruido se deberían a la actividad humana presente, dado que estas estaciones se encuentran relativamente cerca de áreas pobladas, además, de algunas carreteras de tránsito moderado. Asimismo, es necesario tener en cuenta el tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones (en su mayoría suelos consolidados) estos podrían favorecer el comportamiento de este tipo de ruido. El ruido presente en la estación TOQ0 podría estar relacionado a la actividad minera presente en el área, lo que generaría un ruido casi constante durante todo el día de registro, para este caso el factor de suelo podría favorecer la menor propagación de este tipo de ruido. Para la estación CGLO, el ruido podría ser debido al tránsito constante de vehículos en una de las carreteras principales de la zona, Panamericana Sur, la cual se encuentra a menos de 200 metros aproximadamente.



**Figura 4.13;** PDF de la componente vertical de la estación de La Victoria (LVIC) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche, El nivel de ruido se mantiene por debajo del límite máximo permitido para horas de la madrugada y aumenta sobrepasando este límite en horas de la tarde (círculos rojos).

Las estaciones APAT, ATH0, CAJ0, CHAY, GYAO, HNAL, HSAL, HYO0, MNZN, MPCH, NVMI, PAT0, PCH0, UB10 y YANA muestran niveles de ruido dentro de los límites máximos y mínimos permitidos (ver Figura 4.14). En horas de la madrugada estos valores se presentan entre los  $\pm 5$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, para luego aumentar hasta  $\pm 7$  dB para horas de la mañana y la tarde y volviendo a disminuir hasta  $\pm 4$  dB para horas de la noche. Las componentes horizontales presentan valores de hasta 5 dB por encima de la componente vertical, siendo similar en todo el registro del día. Estos valores de variación pueden estar relacionados a la poca actividad humana presente. El aumento en horas de la mañana y la tarde puede atribuirse al paso de algunos vehículos cerca de algunas carreteras cercanas a estas estaciones y al tipo de suelo sobre el que se encuentran, ya que contribuiría a la propagación de este tipo de ruido. La estación ATH0 presenta niveles menores de ruido, y podría estar

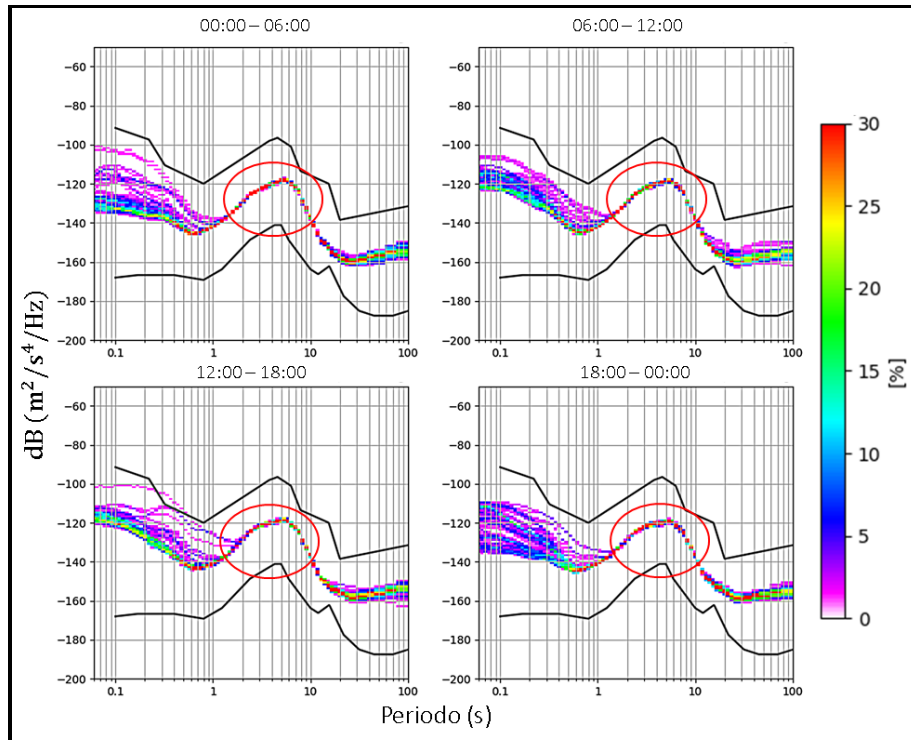
relacionada a la profundidad en la que se encuentra el sensor (100 m aproximadamente) lo que haría que esta estación tenga un comportamiento similar a la estación NNA.



**Figura 4.14;** PDF de la componente vertical de la estación de Abra Patahuasi (APAT) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se mantienen estables y dentro de los rangos máximos y mínimos permitidos (círculos rojos).

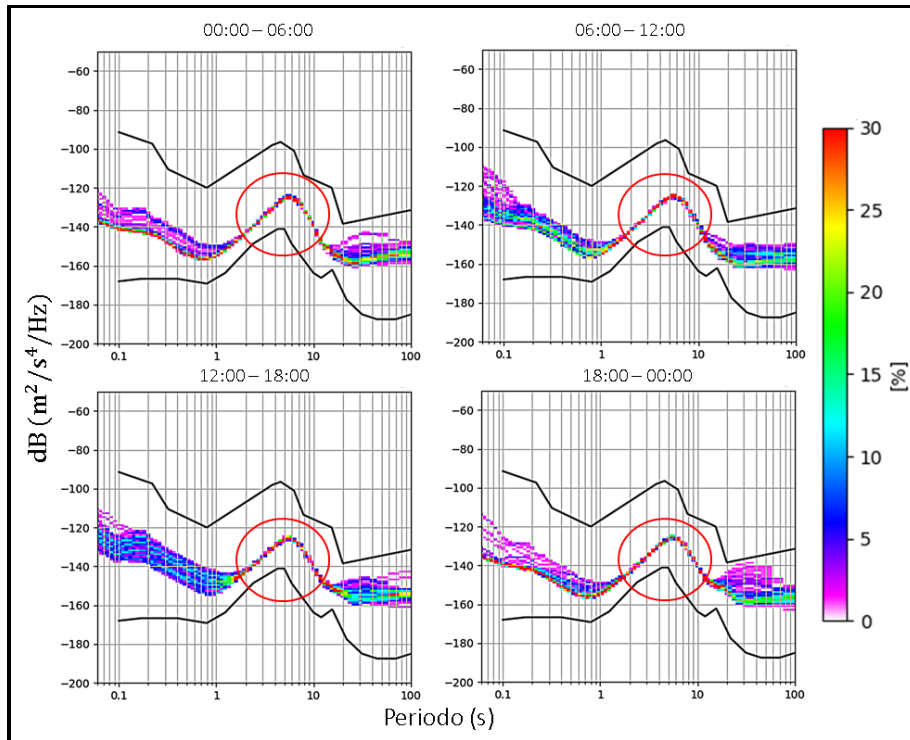
#### B) Variación de periodos intermedios (1 – 15 s)

Con los resultados obtenidos, las estaciones ANDY, AYA0, CAJ0, CGLO, HYO0, HSAL, ISAB, NVMI, PAT0, UB10 y YLS0 presentan niveles de ruidos dentro de los límites establecidos (ver Figura 4.15). Estos valores varían entre  $\pm 2$  dB durante todo el día de registro, dentro de los 2 a 3 segundos se llega a formar un pequeño pico de variación. Las componentes horizontales presentan comportamientos similares a la componente vertical. Estos niveles de ruido pueden deberse a la actividad oceánica. Además, estas estaciones presentan un comportamiento similar a las estaciones de la costa, y que podría explicarse por el tipo de suelo que presentan y la cercanía de estos al litoral. Una mayor actividad oceánica también podría favorecer este tipo de comportamiento.



**Figura 4.15;** PDF de la componente vertical de la estación de Andaray (ANDY) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites establecidos, con un pico entre los 2 a 3 segundos generado por la actividad oceánica (círculos rojos).

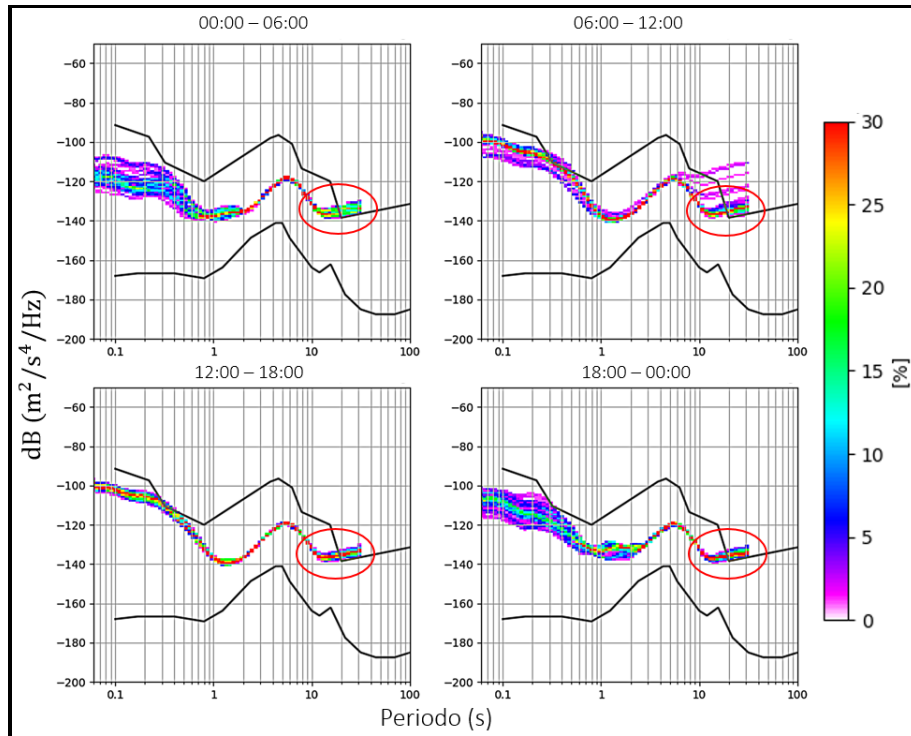
En las estaciones ALTO, APAT, ATH0, AYRA, CHAY, CHVY, GYAO, HNAL, LVIC, MNZN, MPCH, PACL, PAYA, PCH0, QLLH, SCRT, TICA, TOQ0, UNAP y YANA presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos (ver figura 4.16). Esta variación se da entre los  $\pm 2$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad. La componente vertical presenta comportamientos ligeramente más altos que las horizontales. Estos valores se deben a la actividad microsísmica oceánica, la cual para estas estaciones no están siendo muy afectadas en comparación con las estaciones inicialmente analizadas. El tipo de suelo y la distancia respecto al litoral podrían favorecer a que estos niveles de ruido no sean demasiado altos.



**Figura 4.16;** PDF de la componente vertical de la estación de Abra Patahuasi (APAT) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites establecidos (círculos rojos).

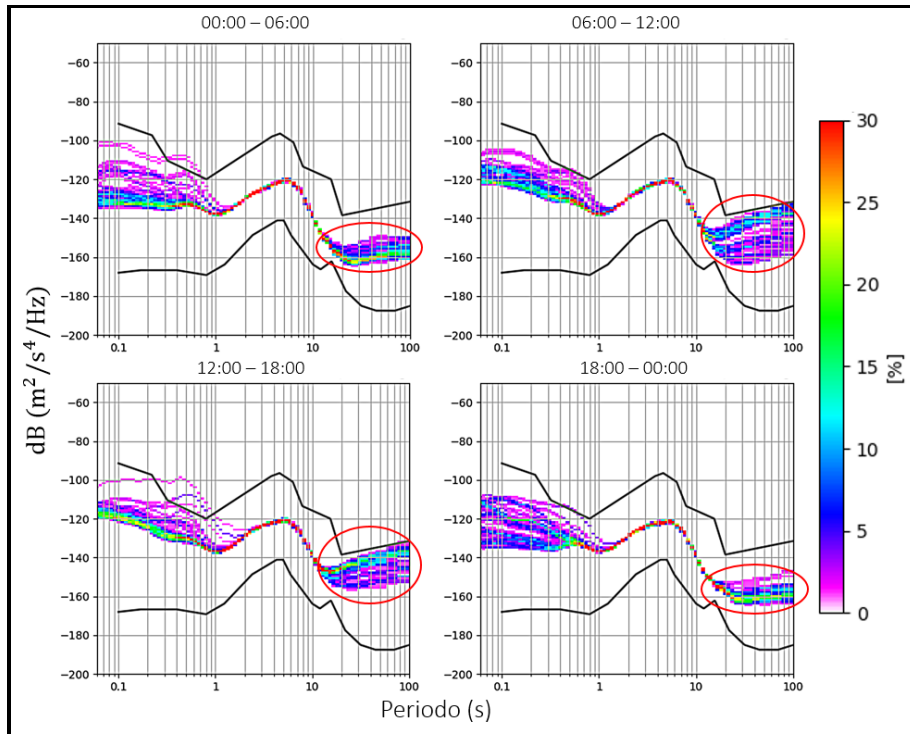
### C) Variación de periodos largos (> 15 s)

De acuerdo a los resultados obtenidos, las estaciones AYA0, HSAL y UNAP presentan niveles de ruido altos en las componentes horizontales, mientras que la componente vertical se presenta sobre el límite máximo establecido (ver Figura 4.17). Estos valores para horas de la madrugada y la noche presentan una variación de  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y para horas de la mañana y la tarde, estos valores aumentan hasta los  $\pm 8$  dB. Las componentes horizontales se presentan con 12 dB por encima de la componente vertical. Estos valores se deberían a la variación de presiones atmosféricas y con el tipo de suelo, haciendo que las componentes horizontales sean más ruidosas en comparación con la componente vertical.



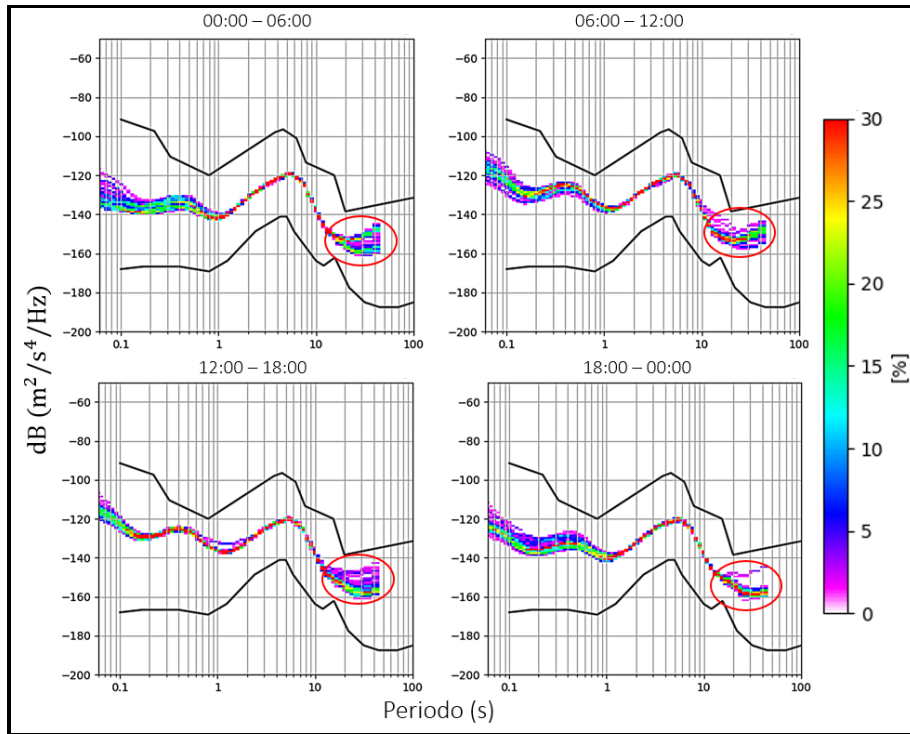
**Figura 4.17;** PDF de la componente vertical de la estación de Universidad del Altiplano (UNAP para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos).

Las estaciones ANDY, APAT, AYRA, CAJ0, CHAY, CHVY, GYAO, HNAL, ISAB, LVIC, MNZN, MPCH, NVMI, PACL, PAT0, PAYA, PCH0, QLLH, SCRT, TOQ0, UB10, YLS0 y YANA presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos que en horas del día y la tarde llegan al límite máximo (ver Figura 4.18). Las componentes horizontales en horas de la madrugada y la noche presentan valores entre los  $\pm 6$  dB y aumentan en horas de la mañana y la tarde hasta  $\pm 8$  dB. Las componentes horizontales presentan valores de hasta 15 dB por encima de la componente vertical. Estos niveles de ruido pueden estar relacionados a procesos atmosféricos y al tipo de suelo (suelos poco consolidados). La componente vertical se ve menos afectada y presenta un comportamiento casi uniforme en todo el día de registro.



**Figura 4.18;** PDF de la componente horizontal (E) de la estación de Andaray (ANDY) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos).

En las estaciones ATH0, CGLO, TICA, ALTO, HYO0 se presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos (ver Figura 4.19). En horas de la madrugada y la noche, la variación se presenta en  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y aumentan hasta  $\pm 7$  dB en horas de la mañana y de la tarde. Las componentes horizontales se encuentran relativamente por encima de las componentes verticales (2 dB). Estos valores se deben en su mayoría a la interacción de la variación de la presión atmosférica y al tipo de suelo sobre el que se encuentran instaladas las estaciones, haciendo a que las componentes sean más estables y presentando un comportamiento similar a la componente vertical. La estación ATH0 presenta un comportamiento similar en sus tres componentes y se debería a la profundidad a la que se encuentra el sensor, lo que la haría menos susceptible a los cambios de la presión atmosférica.



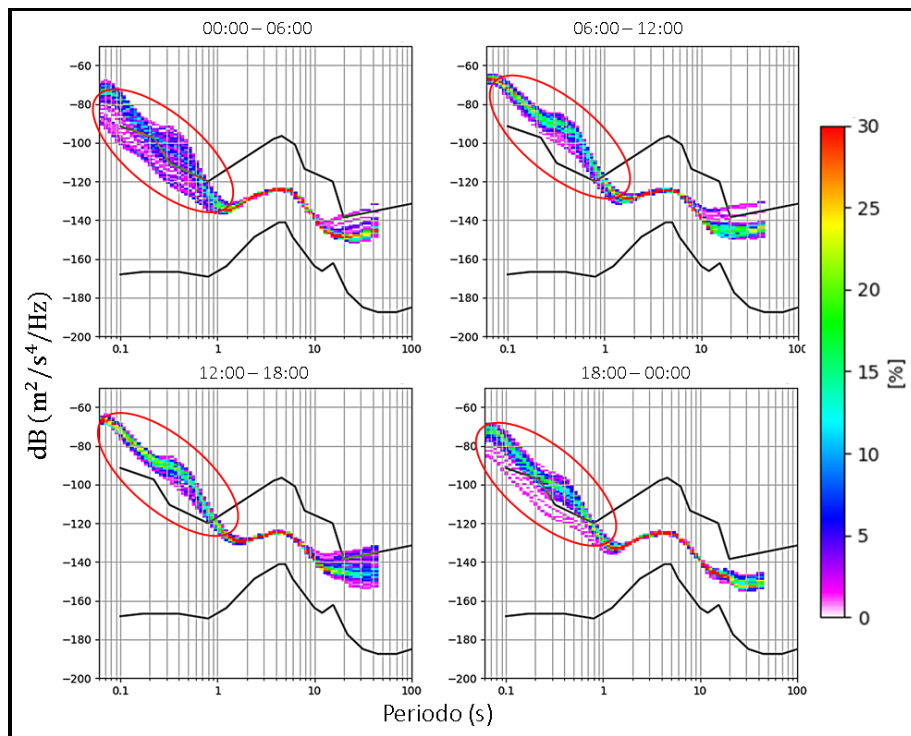
**Figura 4.19;** PDF de la componente horizontal Este (E) de la estación de Huancayo (HY00) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos)

#### 4.3.1.3. Estaciones sísmicas ubicadas en la Región Amazónica

##### A) Variación de periodos cortos (< 1 s)

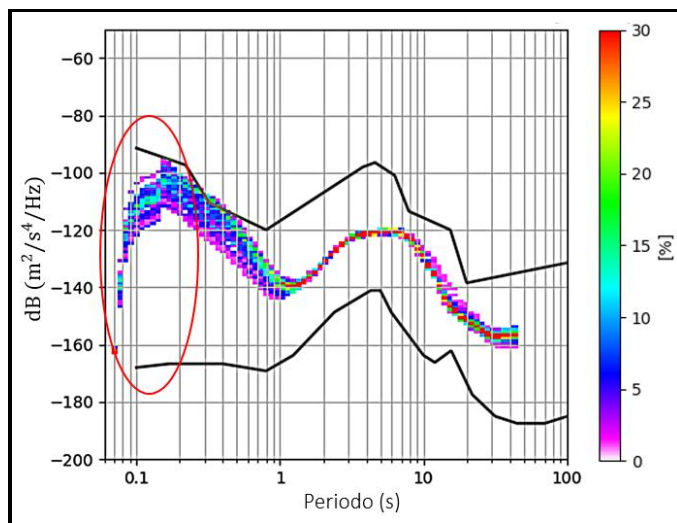
De los resultados obtenidos, las estaciones IQT0, PTM0, PUC0, TOC0 y YRM0 presentan niveles de ruidos altos para este rango de periodos, los cuales sobrepasan el límite máximo establecido, especialmente en horas del día y la tarde (ver Figura 4.20). En horas de la madrugada los valores oscilan entre los  $\pm 7$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, haciéndose más estables para horas de la mañana y la tarde con  $\pm 4$  dB y volviendo a aumentar para horas de la noche hasta  $\pm 5$  dB. El comportamiento de los niveles de ruido aumenta hasta 8 dB para horas de la mañana y la tarde, esto con respecto a las horas de la madrugada y la noche. Para este caso, las componentes horizontales presentan valores de hasta 3 dB por encima de la componente vertical. El aumento de la variación respecto a la tendencia de mayor probabilidad podría deberse a las actividades humanas ocurridas en horas comprendidas entre la mañana y la tarde, sobre todo en aquellas que se

encuentran cerca de áreas pobladas importantes (Iquitos, Puerto Maldonado, Pucallpa, Tocache y Yurimaguas respectivamente), haciendo a estas más ruidosas en comparación con horas de la madrugada y la noche. Además, debe tomarse en cuenta el tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones (suelos poco consolidados), ya que podrían ayudar a la propagación de este tipo de ruido.



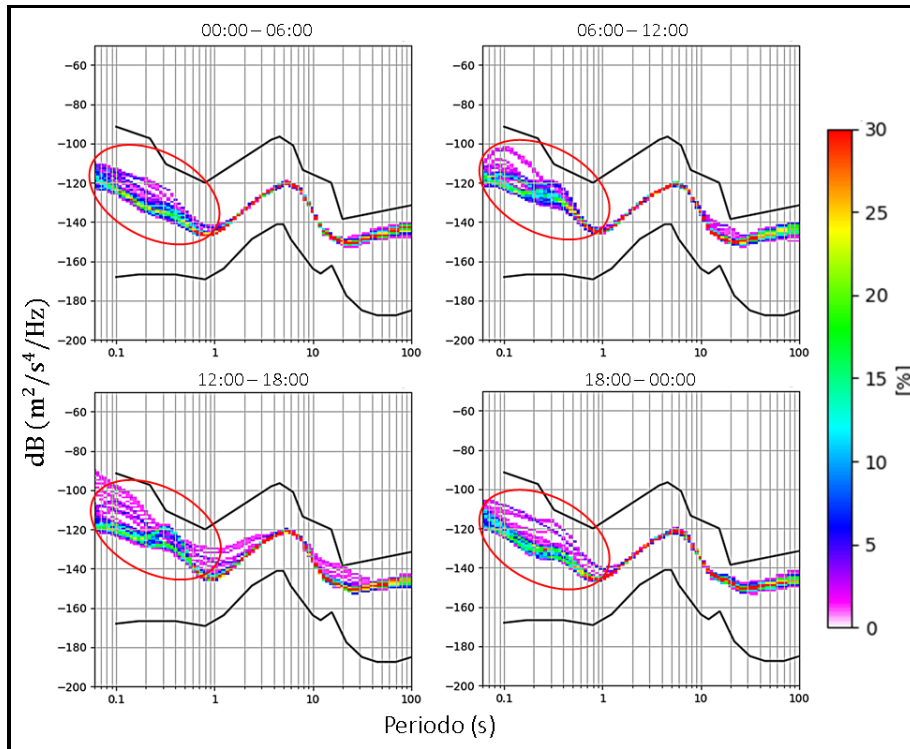
**Figura 4.20;** PDF de la componente vertical de la estación de Iquitos (IQT0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran por encima del límite máximo establecido (círculos rojos).

La estación YRM0 presenta valores anómalos para periodos menores a 0.1 s, a pesar de que el ancho de banda que tiene el equipo es superior a este. Esto se debería a la frecuencia de muestreo con el que está trabajando el equipo (20Hz) y que afectaría a valores superiores a esta frecuencia. Además, tomando en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist (1928), la frecuencia de muestreo ideal de cada estación debería corresponder al doble de la frecuencia máxima del equipo. Para el caso de YRM0, la frecuencia de muestreo es de 20 Hz, por lo que los valores obtenidos serían menores a 10 Hz (ver Figura 4.21).



**Figura 4.21;** PDF de la componente vertical de la estación de Yurimaguas (YRM0) para horas de noche (18:00 – 00:00). El cálculo para valores mayores 0.1 segundos presenta alteraciones debido a la frecuencia de muestreo del equipo (círculo rojo).

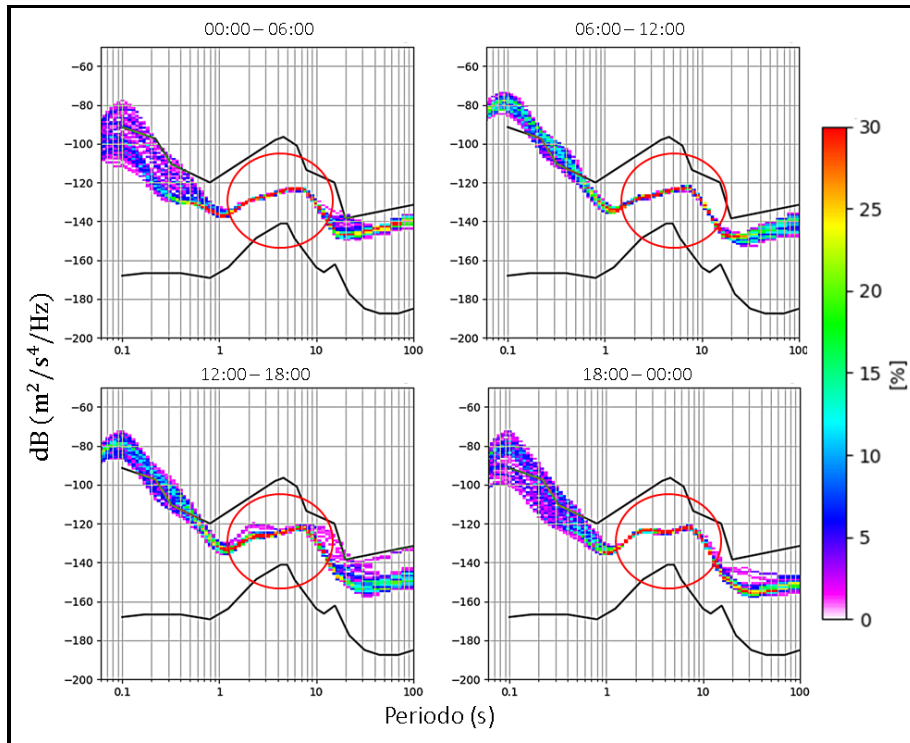
Las estaciones BVTA, NIEV, PBER, QNJL, SNIG y STPO presentan niveles de ruido que se encuentran próximos al límite máximo establecido, en especial para horas de la tarde (ver Figura 4.22). Estos valores oscilan entre los  $\pm 4$  dB respecto a la mayor tendencia de probabilidad en horas de la madrugada, para horas de la mañana y por la tarde estos valores aumentan hasta  $\pm 5$  dB y vuelven a disminuir en la noche hasta  $\pm 4$  dB. El comportamiento del ruido presente en horas de la mañana y la tarde aumenta hasta en 5 dB, especialmente en las componentes horizontales. Las variaciones presentes para horas de la mañana y la tarde se deberían a la presencia de localidades cerca de la estación (Como; Bellavista, Santa María de Nieva, Puerto Bermúdez, San Ignacio, Satipo respectivamente). Además de algunas carreteras de poco tránsito. Considerando también el tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones, en su mayoría suelos semiconsolidados, estos podrían favorecer a la propagación de este tipo de ruido.



**Figura 4.22;** PDF de la componente vertical de la estación de Satipo (STPO) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los valores de ruido se encuentran dentro de los límites establecidos (círculos rojos).

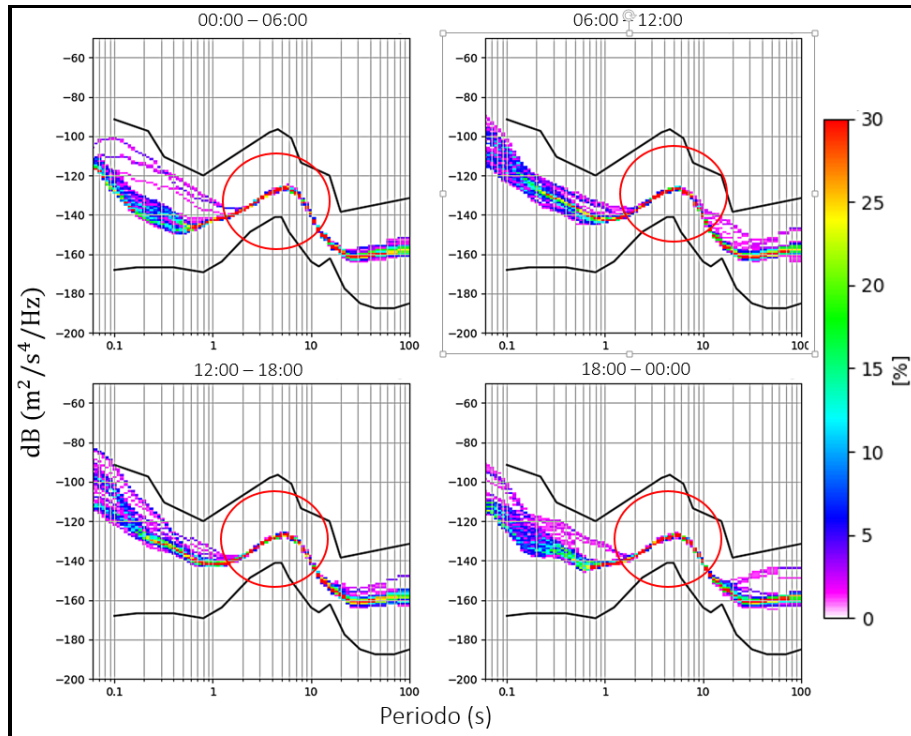
#### B) Variación de periodos intermedios (1 - 15 s)

Las estaciones BVTA, PTM0, PUC0, TOC0 y YRM0 presentan valores elevados de ruido y próximos al límite máximo establecido (ver Figura 4.23). Estos valores se dan hasta  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, siendo similar en todo el día de registro. Las componentes horizontales presentan valores ligeramente mayores a la componente vertical (3 dB). Estos valores se deberían al tipo de suelo sobre el que se encuentran instaladas las estaciones. En comparación con las estaciones ubicadas en la costa, estas presentan pequeños picos entre los 2 a 3 segundos, por lo que se puede decir que el ruido generado por la actividad microsísmica oceánica podría llegar hasta distancias muy grandes dentro de esta parte del país.



**Figura 4.23;** PDF de la componente vertical de la estación de Tocache (TOC0) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruidos altos y cercanos al límite máximo establecido (círculos rojos).

En las estaciones IQT0, NIEV, PBER, QNJL, SNIG y STPO se presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos (ver Figura 4.24). Estos valores varían entre  $\pm 2$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, similar en todo el registro del día. Las componentes horizontales presentan valores relativamente más altos que la componente vertical (2 dB). Estos valores estables se deberían a que la actividad microsísmica oceánica no afecta enormemente a estas estaciones sísmicas.

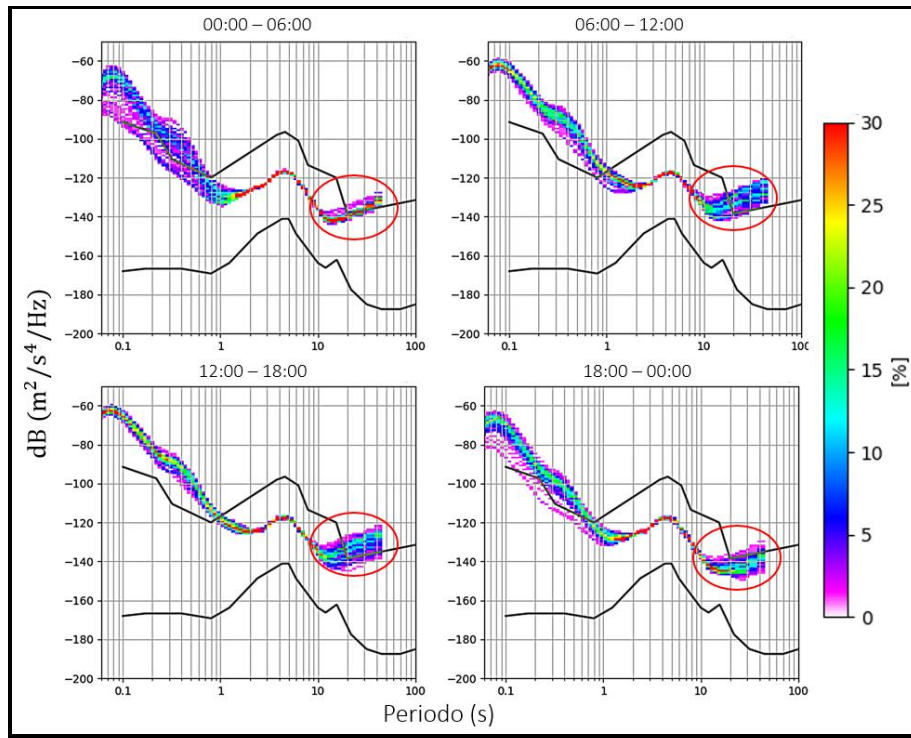


**Figura 4.24;** PDF de la componente vertical de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

### C) Variación de periodos largos (> 15 s)

Las estaciones IQT0, PTM0, PUC0 y YRM0 presentan niveles de ruidos altos, que en las componentes horizontales superan el límite máximo establecido y en la componente vertical, se mantiene relativamente por debajo de este (ver Figura 4.25). Estos valores para horas de la madrugada varían entre los  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, llegando a aumentar hasta  $\pm 6$  dB en horas de la mañana y la tarde. En horas de la noche vuelven a disminuir hasta  $\pm 4$  dB, principalmente para las componentes horizontales. Las componentes verticales presentan variaciones de  $\pm 4$  dB constantes durante todo el día de registro. El comportamiento en las componentes horizontales se da en 10 dB por encima de la componente vertical. Este comportamiento podría deberse a la interacción de los cambios de presión atmosférica con respecto al tipo de suelo sobre el que se

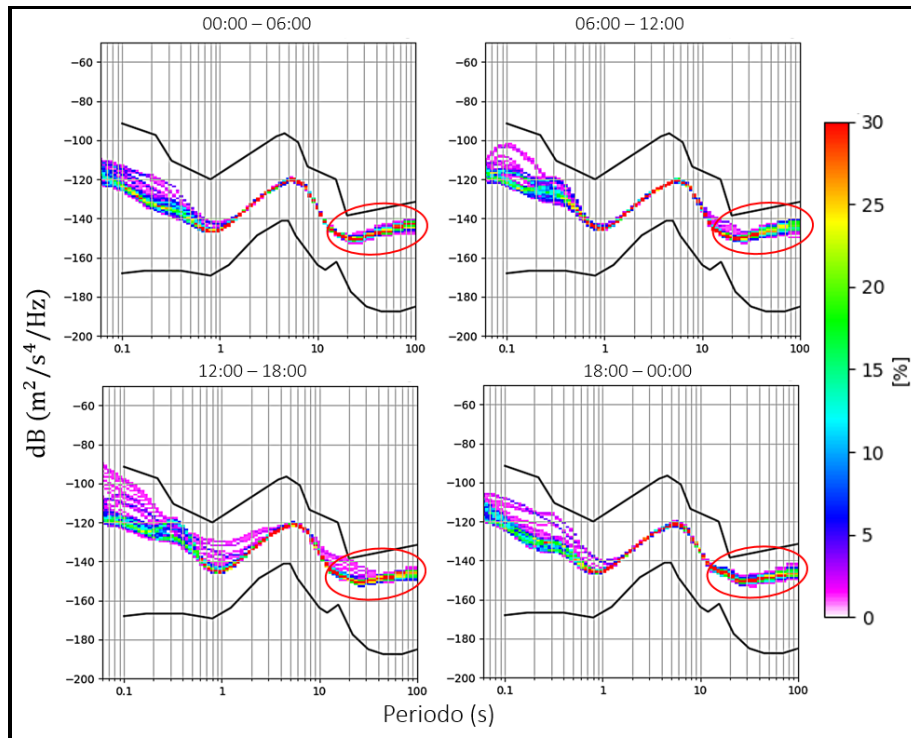
encuentran cada una de estas estaciones, produciendo en las componentes horizontales niveles de ruido muy superiores a la componente vertical.



**Figura 4.25;** PDF de la componente horizontal Norte (N) de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido son superiores al límite máximo establecido (círculos rojos).

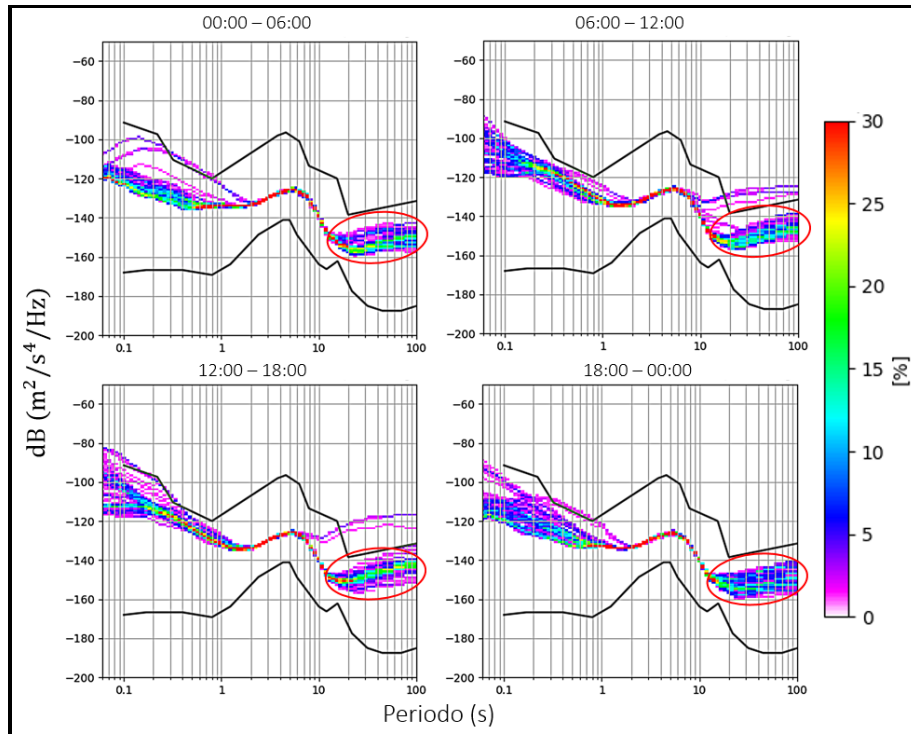
Las estaciones BVTA, NIEV, PBER, QNJL, STPO y TOC0 muestran niveles de ruido ligeramente menores al límite máximo establecido (ver Figura 4.26). Estos valores para horas de la madrugada llegan hasta  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad aumentando para horas de la mañana y la tarde en  $\pm 6$  dB y volviendo a disminuir hasta  $\pm 4$  dB para horas de la noche. La componente vertical presenta un comportamiento más estable ( $\pm 4$  dB) durante todo el registro del día. Las componentes horizontales se encuentran con 15 dB por encima de la componente vertical. Estos valores se deberían al comportamiento entre los cambios de presión atmosférica y el tipo de suelo sobre el que se encuentran instaladas las estaciones. La componente vertical presenta

valores estables, lo que haría suponer que el tipo de suelo (suelo semiconsolidado) ayudaría favorablemente a que las estaciones registren información de calidad.



**Figura 4.26;** PDF de la componente vertical de la estación de Satipo (STPO) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

La estación SNIG presenta niveles de ruido dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (ver Figura 4.27). Estos valores presentan variaciones en horas de la madrugada y en la mañana de  $\pm 5$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad, para luego aumentar hasta  $\pm 7$  dB para horas de la tarde y disminuir hasta  $\pm 6$  dB para horas de la noche, principalmente en las componentes horizontales. La componente vertical presenta variaciones de  $\pm 4$  dB, siendo constante durante todo el día de registro. Estas variaciones se deberían a la interacción de los cambios de presión atmosférica con respecto al tipo de suelo sobre el que se encuentra instaladas las estaciones (suelos consolidados) permitiendo que las componentes horizontales no presenten ruidos en estos niveles de frecuencias.



**Figura 4.27;** PDF de la componente horizontal Este (E) de la estación de San Ignacio (SNIG) para horas de madrugada, mañana, tarde y noche. Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

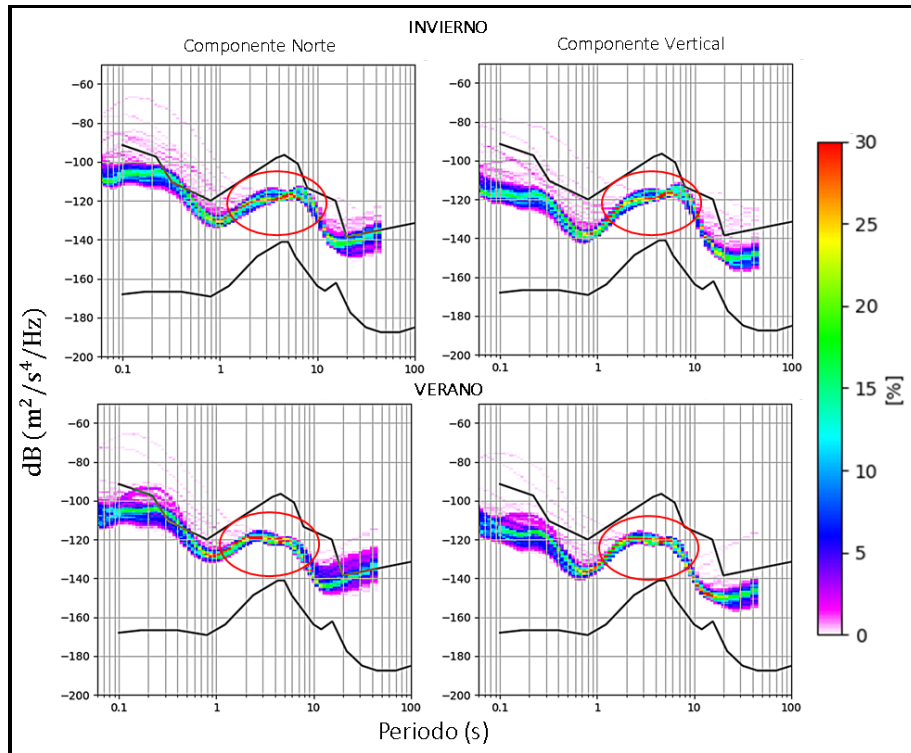
### 4.3.2 Variación Estacional

Dentro de este análisis y evaluación, se considera únicamente los periodos intermedios y largos. En cuanto a los periodos cortos, en su mayoría, estos corresponden a ruidos culturales, los cuales difícilmente cambian en cada temporada estacional, lo que no sucede con las fuentes principales de los periodos intermedios y largos que son causados por actividades oceánicas y variaciones de presión atmosférica respectivamente, ambos relacionados con cambios por periodos estacionales, El detalle para cada estación se presenta en el anexo B.

#### 4.3.2.1 Variación de periodos intermedios (1 - 15 s)

De acuerdo a los resultados obtenidos, las estaciones ANC0, CAZU, CBT2, GUA0, HUB0, HMEY, LYAR, NNA, NNAP, QRHC, QLK0, TOQ0 y YCA0 presentan niveles de ruido dentro de los límites establecidos, esto para ambas temporadas estacionales (ver Figura 4.28). En temporadas de invierno, la variación se da entre  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y

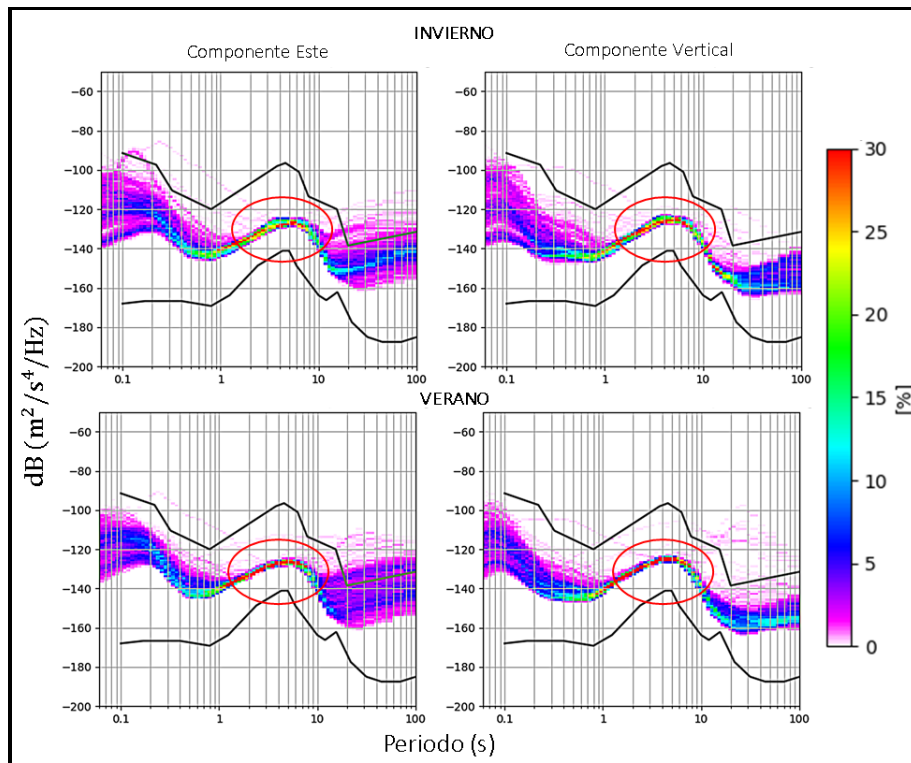
disminuye para épocas de verano a  $\pm 3$  dB. En épocas de invierno, las tres componentes presentan comportamientos similares con valores de 3 dB por encima de las temporadas de verano. Dentro del rango de 2 a 3 segundos se presenta una ligera variación, siendo más predominante en temporadas de invierno. Estos niveles de ruido se deberían a la actividad microsísmica oceánica, la cual es mayor en temporadas de invierno.



**Figura 4.28;** PDF de la componente horizontal norte (N) y vertical (Z) de la estación de Guadalupe (GUA0). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos con picos de 2 a 3 segundos, debido a la actividad oceánica que ocurre cerca del litoral (círculos rojos).

En las estaciones de ALTO, ANC0, ANDY, ATH0, AYA0, BVTA, CAJ0, CGLO, CHO0, CHVY, HSAL, HYO0, ISAB, LVIC, MNZN, NVMI, PACL, PAT0, PBER, SCRT, STPO, TICA, UB10, YANA y YLS0, los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (ver Figura 4.29). Estos valores para temporadas de invierno se mantienen dentro de los  $\pm 4$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad. Para la época de verano estos

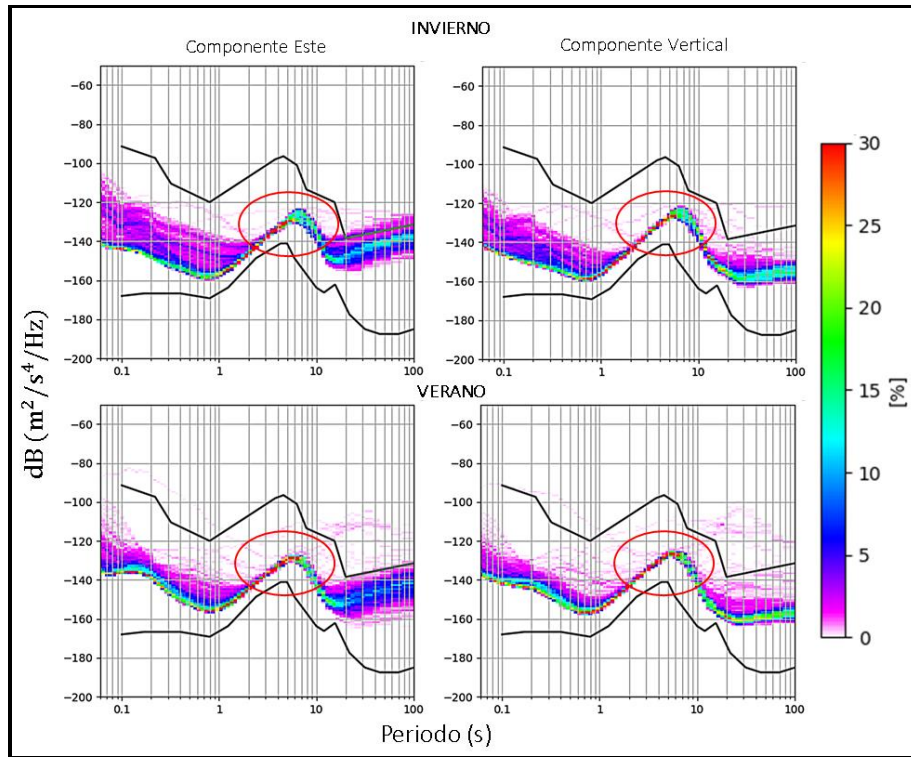
valores se vuelven más estables y oscilan entre los  $\pm 3$  dB. Los valores aumentan hasta 3 dB para épocas de invierno en comparación con las épocas de verano. Los valores mencionados anteriormente se deberían a que la actividad microsísmica oceánica es mayor en temporadas de invierno, lo que generaría valores altos. El pico de los 2 a 3 segundos se debería a la mayor actividad oceánica en invierno, la cual disminuye en las épocas de verano. La mayor estabilidad en los niveles de ruido se presenta en los días de verano, siendo constante en las tres componentes.



**Figura 4.29;** PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Guadalupe (GUA0). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

Las estaciones APAT, AYRA, CHAY, GYAO, HNAL, IQT0, MPCH, NIEV, PCHO, PAYA, PTM0, PUC0, SNIG, YRM0 y UNAP presentan valores estables dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (ver Figura 4.30). Para épocas de invierno, estos valores se encuentran entre los  $\pm 3$  dB respecto a la tendencia de mayor probabilidad y se mantienen de esta manera para la temporada de verano. Esta estabilidad se debería a que las estaciones se encuentran lejos de

las actividades microsísmicas oceánicas, y para el caso de las estaciones GYA0, HNAL, NIEV, PCHO, SNIG y YRM0 podría deberse a su posición geográfica, por lo que estas actividades serían menores en la parte norte del país. En muchos de los casos, la cordillera podría hacer que la respuesta generada por estas actividades sea bloqueada, de tal forma que sus efectos no lleguen a estaciones más alejadas.

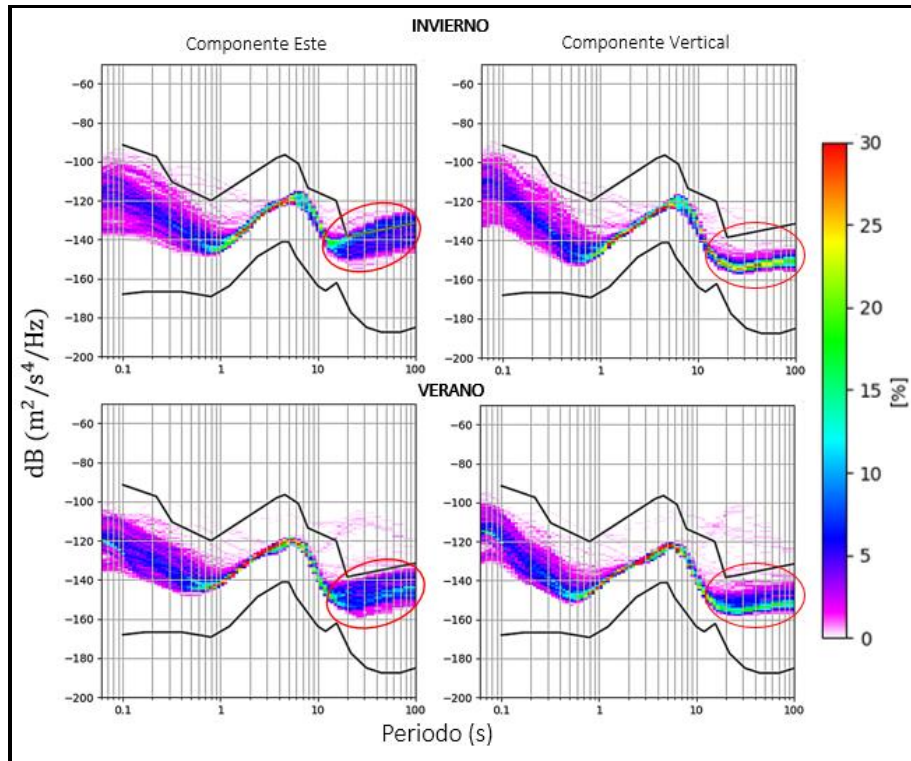


**Figura 4.30;** PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Abra Patahuasi (APAT). Los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos (círculos rojos).

#### 4.3.2.2 Variación de periodos largos (> 15 s)

Las estaciones BVTA, ALTO, ANDY, APAT, AYRA, CHAY, CHVY, GYAO, GUA0, HMEY, HNAL, IQT0, ISAB, LYAR, MNZN, MPCH, NVMI, NIEV, PACL, PAT0, PAYA, PBER, TOQ0, SCRT, SNIG, STPO, TICA, YANA, YCA0, YLS0 y YRM0 presentan niveles de ruido cerca del límite máximo establecido en las componentes horizontales mientras que para la componente vertical se encuentra muy por debajo de este límite (ver Figura 4.31). Las diferencias entre las componentes horizontales para temporadas de invierno

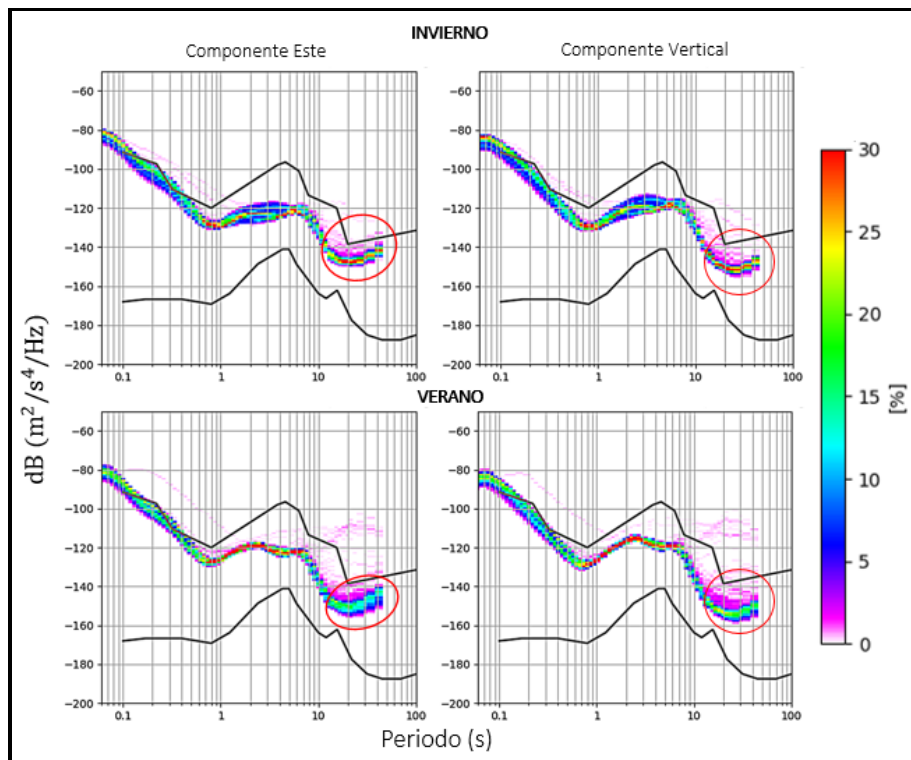
respecto a las de verano se da en 6 dB. En la componente vertical se presenta en 4 dB, siendo más estables y similares en ambas épocas estacionales. Estos valores se deberían al cambio de variaciones de presiones atmosféricas en cada temporada estacional, siendo en invierno la de mayor actividad. Las componentes horizontales presentan mayores cambios, posiblemente por el tipo de suelo en el que se encuentran instaladas las estaciones, haciéndolas más susceptibles a los cambios. La componente vertical es más estable en la mayoría de casos.



**Figura 4.31;** PDF de la componente horizontal este (E) y vertical (Z) de la estación de Alto Perú (ALTO). Los niveles de ruido son menores en las componentes horizontales para temporadas de verano (círculos rojos).

Las estaciones CAZU, CGLO, HUB0, HYO0, QRHC y QLK0 presentan niveles de ruido estables y dentro de los límites máximos y mínimos permitidos (ver Figura 4.32). En las componentes horizontales, para épocas de invierno se presentan con 3 dB por encima de lo que ocurre en temporadas de verano. La componente vertical presenta comportamientos similares en ambas épocas estacionales, siendo para días de verano más estables. Las componentes

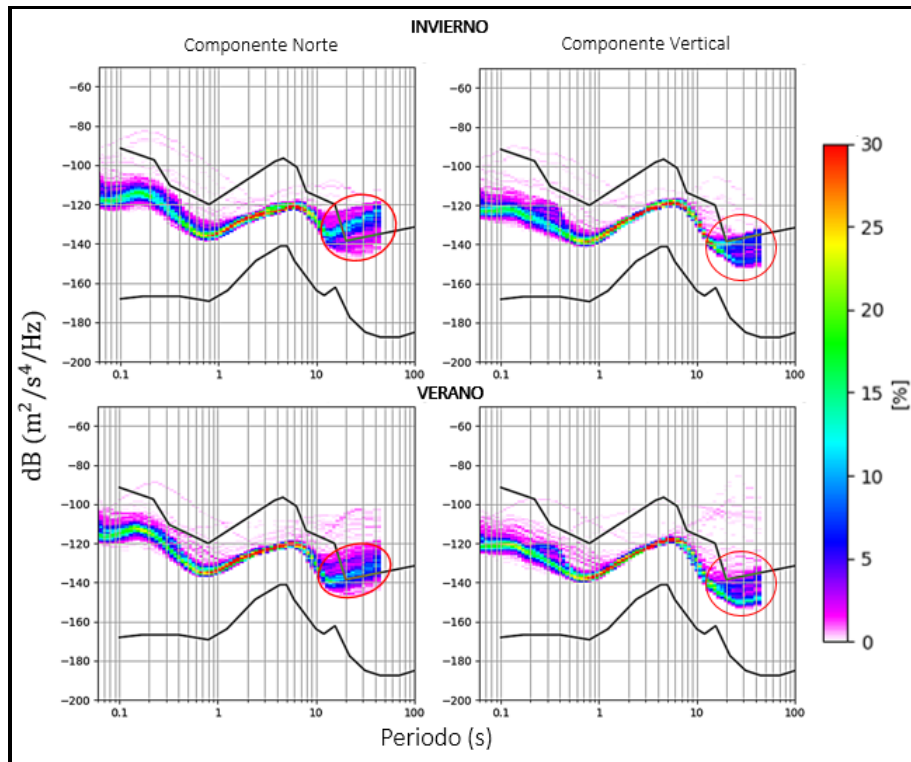
horizontales se encuentran con 4 dB por encima de la componente vertical. Estas anomalías en los valores se deberían al tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones (suelos semiconsolidados y consolidados), lo cual ayuda a que la variación de presión atmosférica no afecten a las componentes horizontales, haciéndolas más estables.



**Figura 4.32;** . Los niveles de ruido son menores y más estables en ambas componentes (círculos rojos).

Las estaciones CHO0, PCH0, PTM0, PUC0, ANC0, UB10, UNAP, AYA0, CBT2, HSAL y NNAP presentan niveles altos de ruido en las tres componentes superando el límite máximo establecido (ver Figura 4.33). En este caso, los valores para las temporadas de invierno son mayores llegando hasta 5 dB por encima de los valores ocurridos en los días de verano. La componente vertical presenta comportamientos similares en ambas temporadas estacionales. Las componentes horizontales se encuentran con 8 dB por encima de la componente vertical. Estos resultados se deberían al tipo de suelo sobre el que se encuentran las estaciones, y se relacionan con las variaciones de presión atmosférica que afectan a las

componentes horizontales y vertical, haciéndolas más ruidosas en comparación con las estaciones anteriormente analizadas.

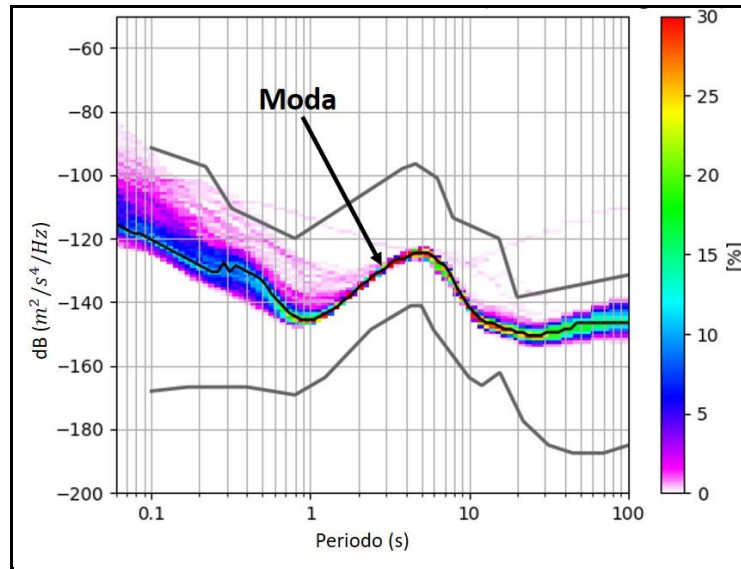


**Figura 4.33;** PDF de la componente horizontal norte (N) y vertical (Z) de la estación de Portachuelo (PCH0), muestran valores superiores al límite máximo establecido (círculos rojos).

En las estaciones NNA y ATH0 los niveles de ruido se encuentran dentro de los límites máximos y mínimos establecidos. Los valores en las componentes horizontales y para temporadas de invierno se encuentran con 3 dB superiores a los días de verano. La componente vertical presenta valores menores para épocas de verano. En general, estos niveles de ruido se deberían a la profundidad en la que se encuentran instalados los equipos (40 y 100 metros aproximadamente), por lo tanto la variación de la presión atmosférica no afectarían a las componentes del equipo.

### 4.3.3 Variación Geográfica del Ruido Sísmico

Para estudiar la variación del ruido sísmico en función de la posición geográfica de cada estación, será necesario obtener los valores de la moda estadística de los resultados anteriores, ya que estos van a representar el mayor valor de PDF para cada período dado (ver Figura 4.34). La componente a analizar es la vertical, ya que, esta presenta mayor estabilidad en todos los rangos de periodos.



*Figura 4.34; Valor de la moda estadística (línea negra) determinado a partir del PDF calculado.*

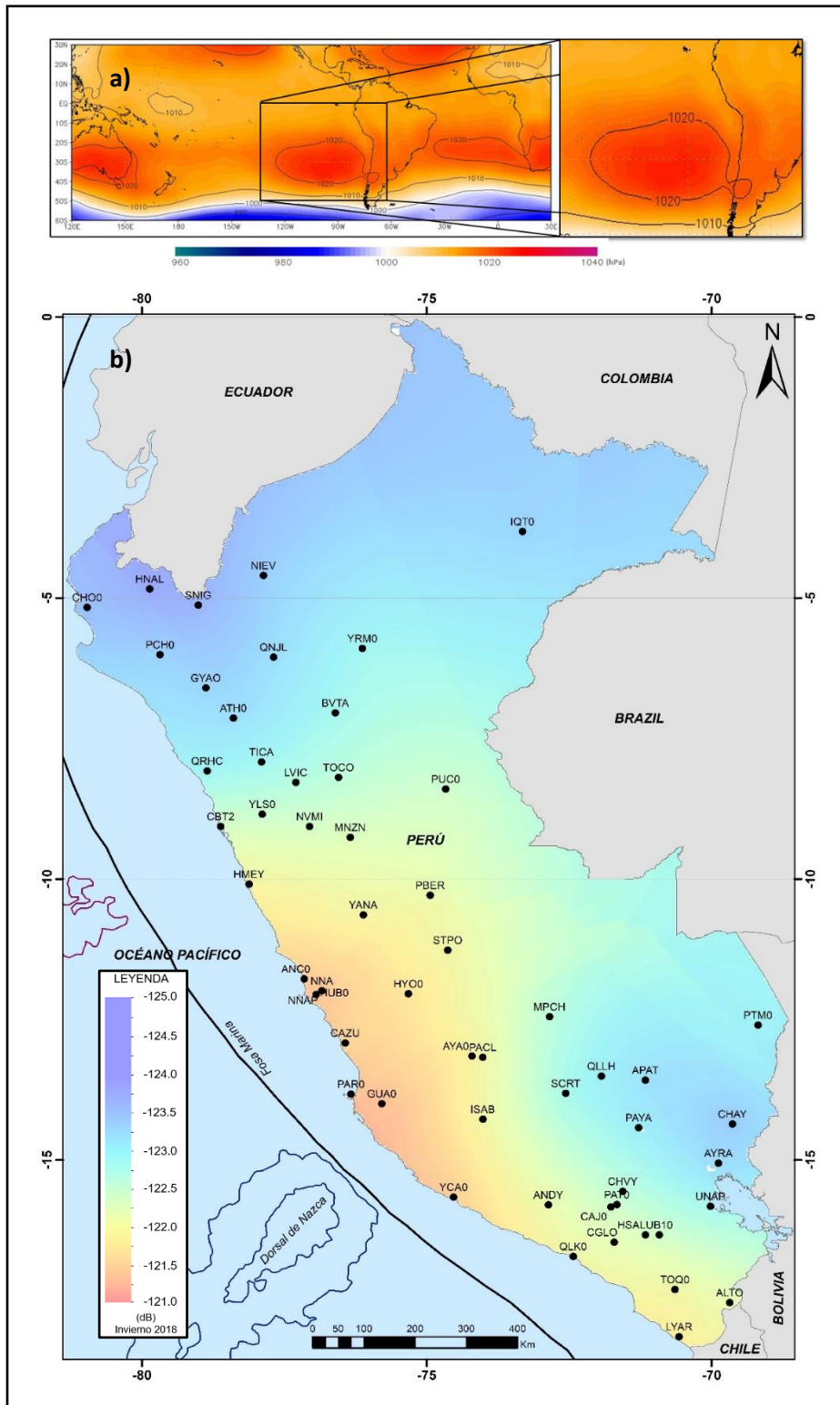
Además, para tener una mayor representatividad del ruido sísmico presente en los rangos de periodo establecidos, se va a tomar en cuenta tramos de valores representativos como se detallan a continuación:

- Para los periodos intermedios, se tomará en cuenta un tramo comprendido entre 3 y 7 s.
- Para los periodos largos, el tramo a tomar en cuenta abarca desde 50 y 70 s.

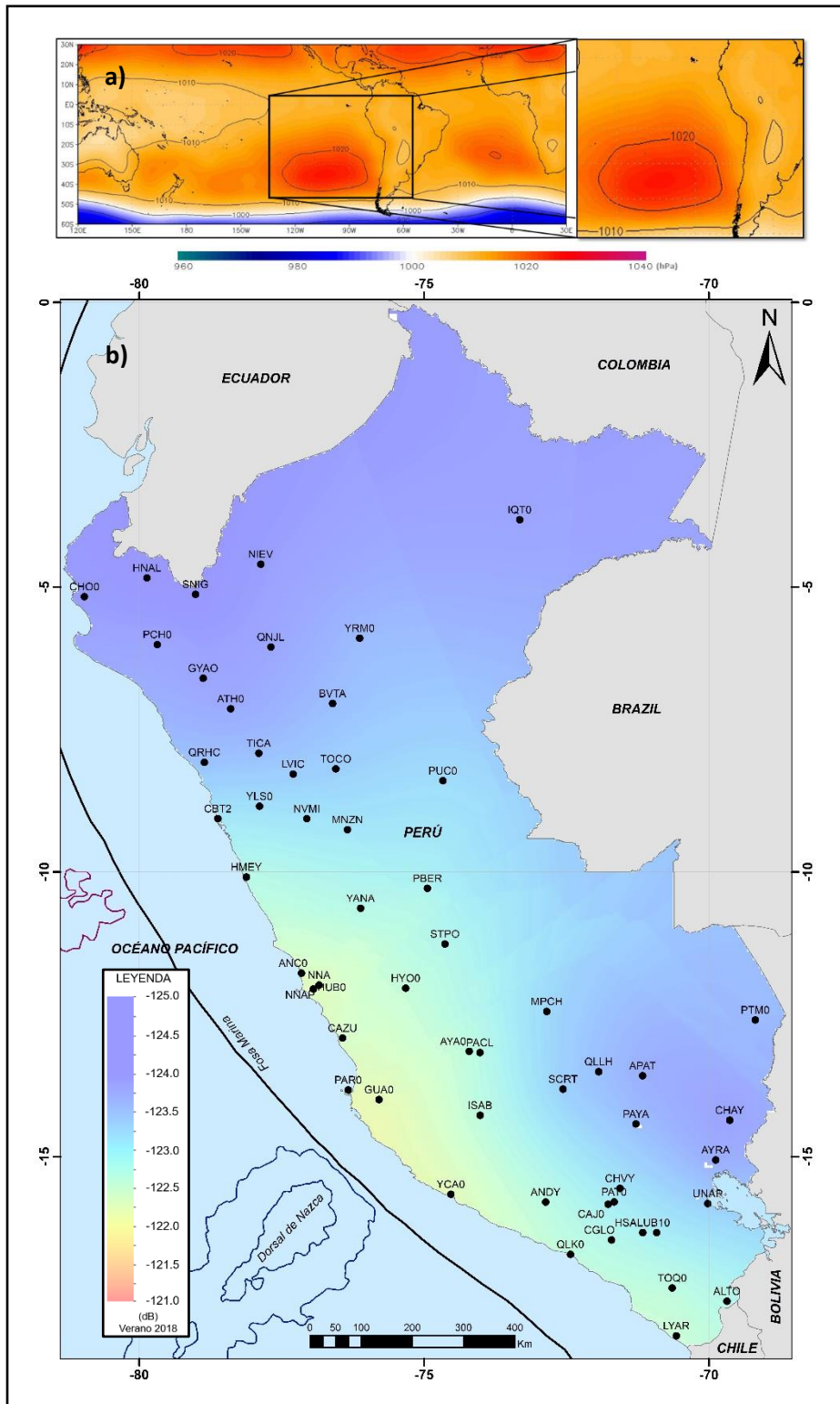
Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó el promedio de la moda estadística de cada tramo, obteniendo así, un único valor representativo para cada rango de periodo y por cada estación, el cual es ploteado en el mapa del Perú e interpolado mediante el método de Kriging.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el comportamiento del ruido dentro de los periodos intermedios (3 - 6 s) presenta valores altos en la parte centro y sur del país y muy cerca del litoral. Para temporadas de invierno, la actividad atmosférica es mayor y tal como menciona Friedrich (1998) esta generaría un comportamiento mayor de actividad oceánica (ver Figura 4.35a). La región norte del país se ve menos afectada por esta actividad dado a que se encuentra muy cerca de la línea ecuatorial, donde la actividad atmosférica se torna más estable. Por lo expuesto anteriormente, los niveles de ruido microsísmico mostrados en la Figura 4.35b muestran valores altos en la región sur y centro del país, para luego distribuirse hasta dentro del continente. En la región sur, esta actividad es reducida y llega únicamente a departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Para las zonas de Puno y Madre de Dios, los valores disminuyen, y debido probablemente a la presencia de la cordillera de los Andes que actuaría en forma de escudo evitando el paso de ruido microsísmico.

En la región centro del país se presenta valores altos en las zonas de Ica y Lima disminuyendo hacia el centro del país. Posiblemente este comportamiento se deba a la extensión de la cordillera en esta parte del país, la cual es más estrecha en comparación con el de la región sur. Para la región norte del país, el comportamiento es más estable, dado que las actividades son menores, a pesar de tener este comportamiento, los valores son moderadamente altos pero no tan trascendentes como los que se presentan hacia el sur. En días de verano, la actividad oceánica disminuye, dado a que las variaciones de presión atmosférica se alejan del litoral peruano y chileno (ver Figura 4.36a). La región sur, presenta comportamientos similares a la temporada de invierno pero con valores menores. La región centro se comporta de la misma manera, es en esta zona donde los valores, a pesar de ser menores respecto a la estación de invierno, para los días de verano son los más altos en todo el Perú, para luego disminuir gradualmente hasta zonas de la selva. La región norte presenta los valores menores y más estables en todo el área de estudio, esto debido a que la actividad microsísmica oceánica es menor en esta parte del país (ver Figura 4.36b).



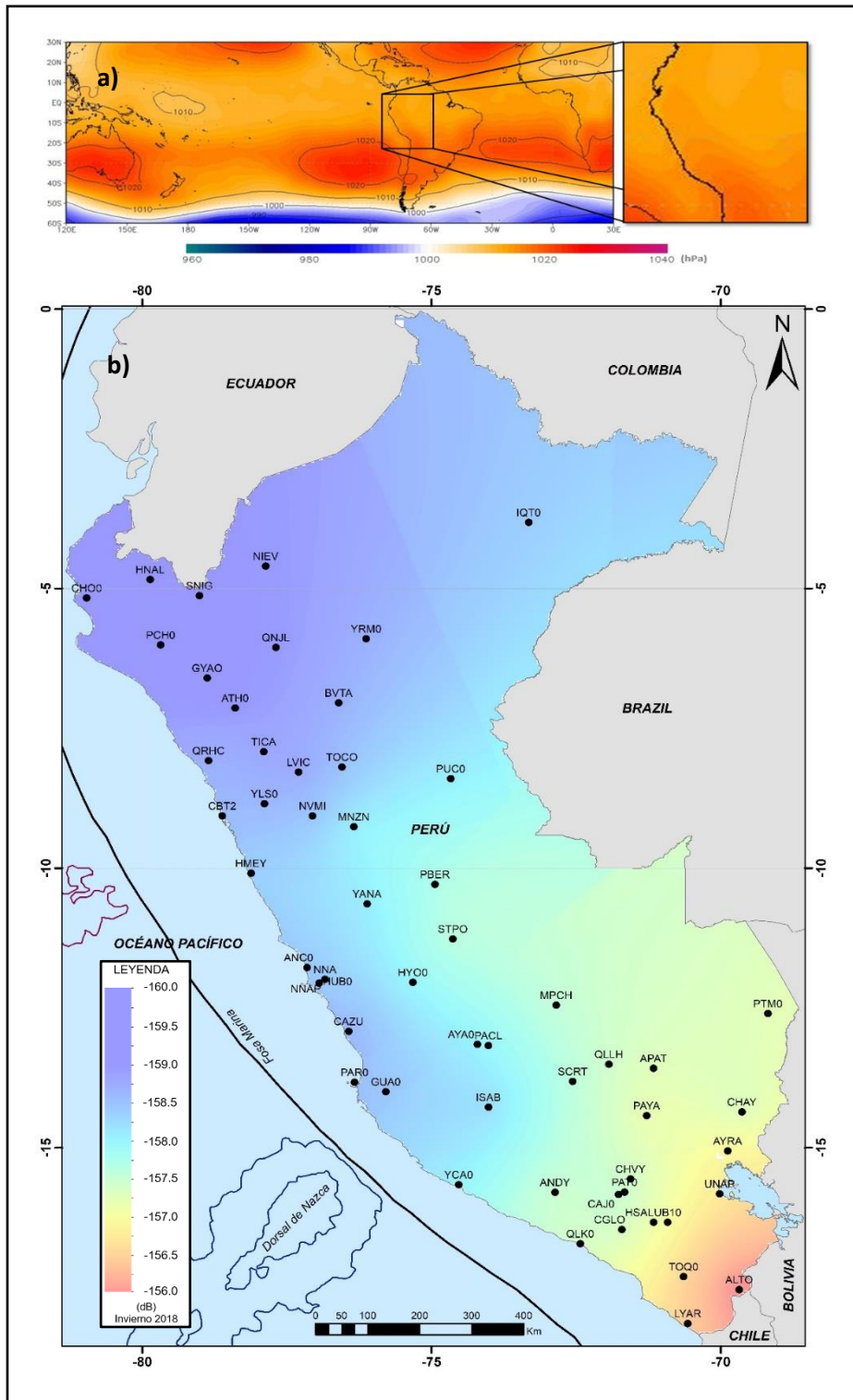
**Figura 4.35;** a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada del invierno 2018 (mes de junio) Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos intermedios (3 - 6 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional: temporada de invierno 2018.



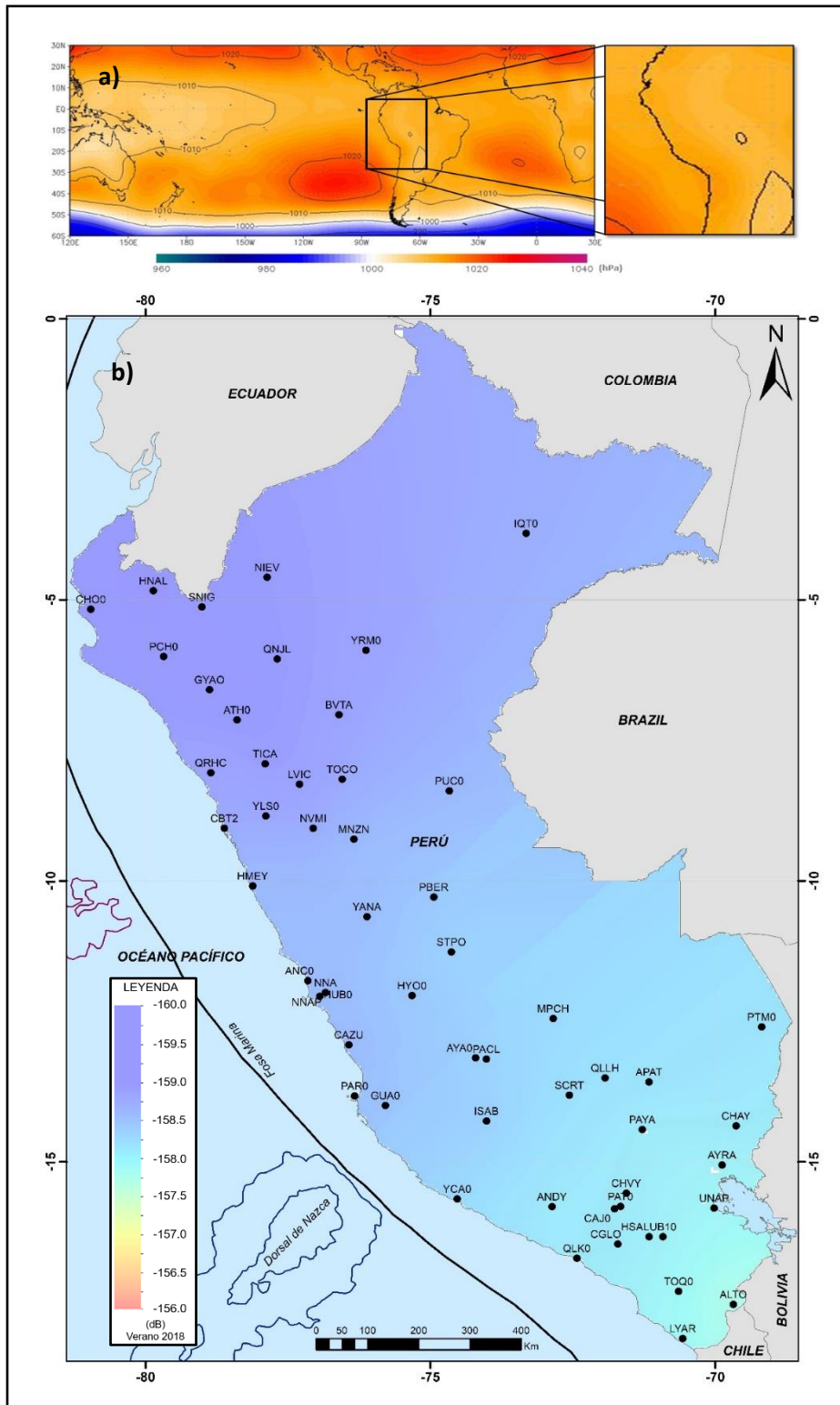
**Figura 4.36;** a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de verano 2018 (mes de diciembre) Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos intermedios (3 -6 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional: temporada de verano 2018.

Para los periodos largos (50-70 s), la mayor actividad de variación de presión atmosférica se presenta en la región sur del país y de acuerdo a la Figura 4.37a estos valores altos disminuyen hacia el norte del país a lo largo de la cordillera de los Andes. En temporadas de invierno, los valores altos llegan hasta la región centro del país y con máximos valores en la región de norte de Chile y sur del Perú. El comportamiento de estos valores altos se presenta en la Figura 4.37b, donde la región sur presenta niveles altos de ruido y van disminuyendo hasta llegar a la región centro del país.

En días de verano, esta actividad atmosférica disminuye (ver Figura 4.38a) y la zona centro y norte del país presenta valores menores en comparación con los valores altos que se presentan en la región sur del Perú. En la Figura 4.38b se muestran los resultados de los niveles de ruido para la temporada de verano, siendo estos menores en comparación con épocas de invierno, teniendo niveles de ruido relativamente altos en la región sur del país y que disminuyen gradualmente hasta la región norte, donde el comportamiento es menor y más estable. Este comportamiento se correlaciona con el mapa de presión atmosférica para la temporada estacional de verano.



**Figura 4.37;** a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de invierno 2018 (mes de junio). Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos largos (50 - 70 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional en temporada de invierno 2018.



**Figura 4.38;** a) Variación de la presión atmosférica (hPa) durante la temporada de verano 2018 (mes de diciembre). Fuente; NOAA CDAS-1. b) Comportamiento de los niveles de ruido (dB) en periodos largos (50 - 70 s), para las componentes verticales de las estaciones de la Red Sísmica Nacional en temporada de verano 2018.

## CAPITULO V

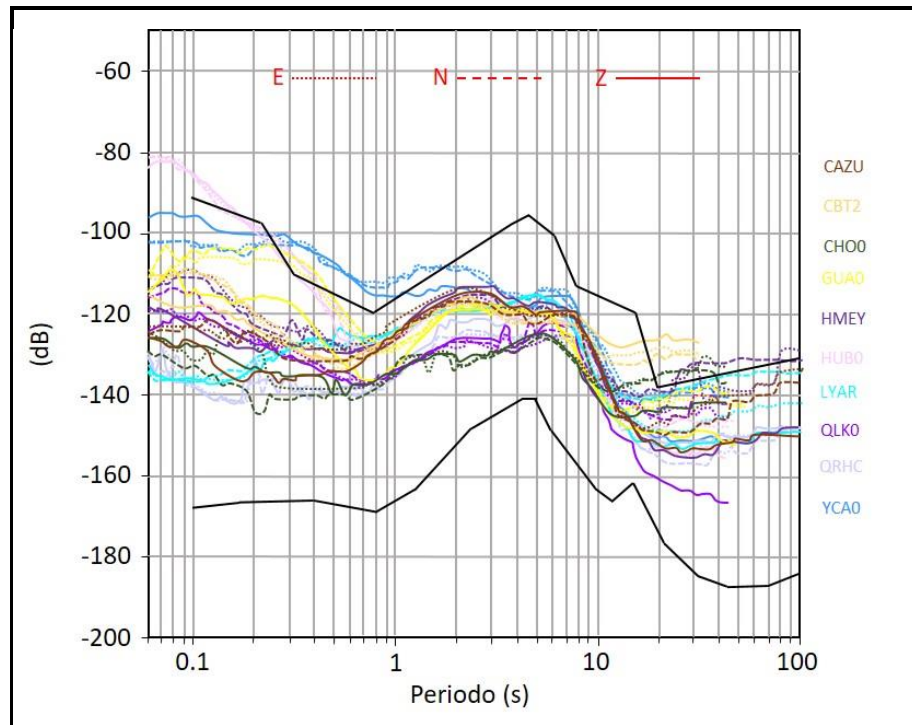
### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1. DETERMINACIÓN DE LÍMITES MÍNIMOS Y MÁXIMOS

De manera general, para poder generar los límites Mínimos y Máximos de niveles de Ruido Sísmico, se toma en cuenta el análisis de los registros sísmicos en base al comportamiento diurno y estacional, de esta manera, se discretiza y conoce a las estaciones sísmicas con altos niveles de ruido sísmico que podrían causar errores en la obtención de los límites de ruido presente, para esto se toma en cuenta los resultados obtenidos en el anterior capítulo.

Los valores de moda estadística han sido obtenidos de los resultados anteriormente analizados (valores calculados para cada una de las componentes), los cuales, son plotados en un mismo plano, de tal manera que estos se encuentren superpuestos y puedan mostrar tendencias de acumulación de valores, que serán analizados para posteriormente determinar gráficamente los límites mínimos y máximos.

En la región costera, las estaciones sísmicas CAZU, CBT2, CH00, GUA0, HMEY, HUB0, LYAR, QLK0, QRHC y YCA0, ubicadas cerca al litoral peruano, presentan valores estables alrededor de los 7 s y valores relativamente altos en el rango de 1 a 4 s (0.25 – 1 Hz), el cual se debería a la presencia del ruido sísmico debido a fuentes microsísmicas oceánicas y a la cercanía de estos con la costa peruana. Para los periodos cortos, los niveles de ruido sísmico son variables y muy altos en las estaciones de HUB0, YCA0 y GUA0, el cual, se da por la presencia de actividad cultural presente cerca de estas. En el resto de estaciones, los valores son más estables y menores al límite máximo de niveles de ruido. Para el rango de periodos largos se muestran valores relativamente altos y muy próximos al límite máximo de ruido sísmico, especialmente en las componentes horizontales. La componente vertical, presenta valores estables y menos ruidosos (Ver Figura 5.1).

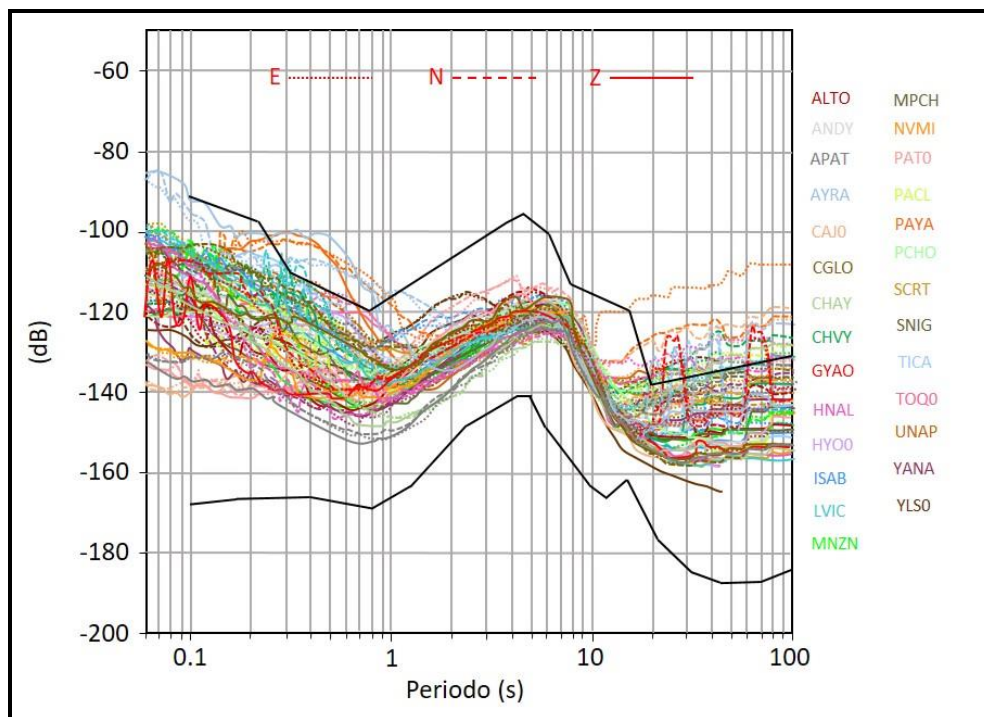


**Figura 5.1;** Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Costera.

Dentro de la región andina, las estaciones ALTO, ANC0, APAT, AYRA, CAJ0, CGLO, CHAY, CHVY, GYAO, HNAL, HYO0, ISAB, LVIC, MNZN, MPCH, NVMI, PAT0, PACL, PAYA, PCH0, SCRT, SNIG, TICA, TOQ0, UNAP, YANA y YLS0, en los periodos cortos presentan valores estables y dentro de los límites mínimos y máximos de ruido establecidos, con excepción de las estaciones de AYRA y PAYA, cuyos niveles de ruido son mayores en el rango de 0.2 a 1 s (1 – 5 Hz), el cual se debería a la actividad humana presente alrededor de la estación y al tipo de suelo (suelos poco consolidados) sobre el que se encuentran. Los periodos intermedios presentan niveles de ruido estables y en su mayoría indican una sola tendencia, a diferencia de las estaciones de la costa, en este periodo no se presentan picos elevados en el rango de 1 a 4 s (0.25 – 1 Hz), esto se debería a la lejanía de estas estaciones del litoral peruano, a excepción de la estación de YLS0, cuya localización es más cerca en comparación de las demás estaciones de esta

región, por lo que esta se vería afectada por el ruido generado por actividades microsísmicas oceánicas.

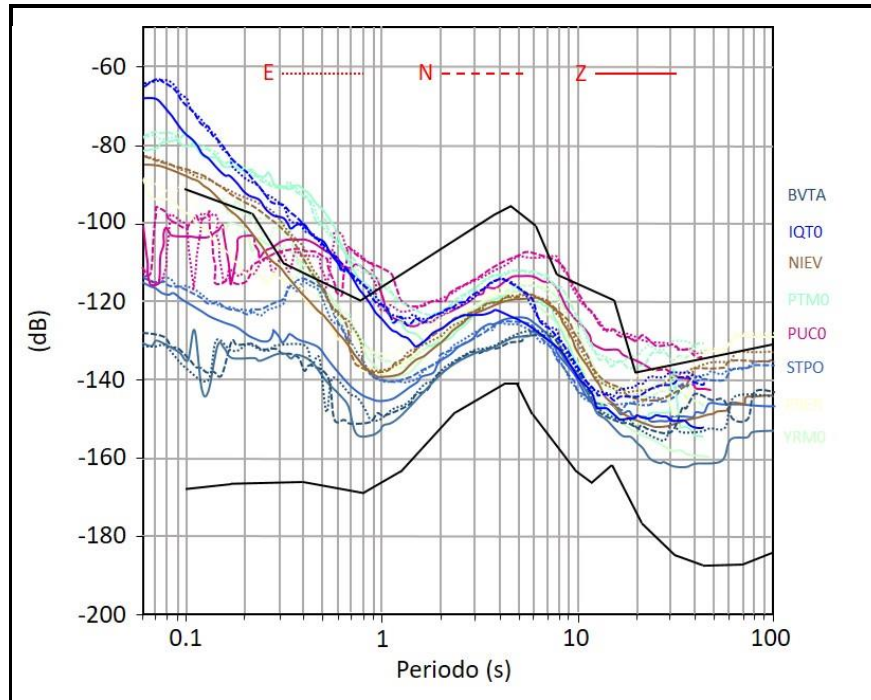
Los periodos largos presentan valores cercanos al límite máximo, especialmente en las componentes horizontales. El ruido presente en este rango, se da debido a la variación de la presión atmosférica y su interacción con el suelo sobre el que se encuentran ubicadas las estaciones sísmicas (Ver Figura 5.2).



**Figura 5.2;** Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Andina.

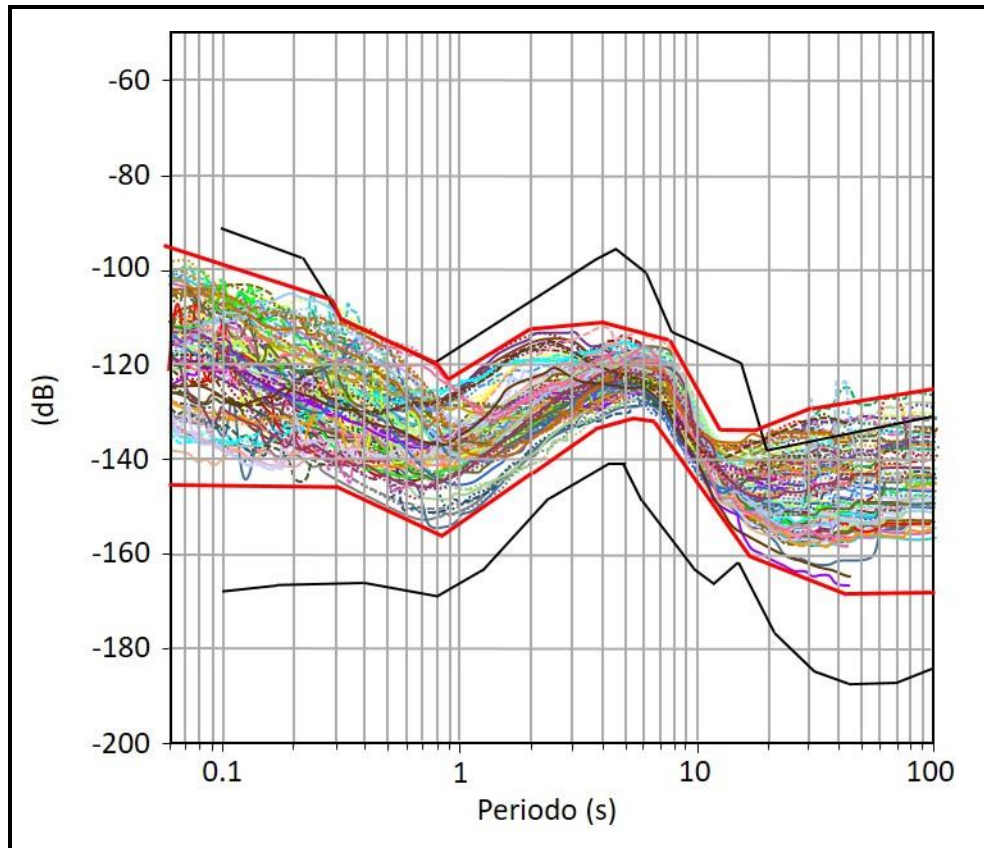
Las estaciones BVTA, IQT0, NIEV, PTM0, PUC0 y STPO de la región amazónica, dentro de los periodos cortos se muestran valores muy inestables y mayores al límite máximo establecido, en especial en las estaciones de IQT0, PTM0, PUC0 y NIEV con valores altos en el rango de 1 a 0.5 s (50 – 1 Hz), estos estarían relacionados a la presencia de ruido cultural al suelo poco consolidado sobre el que se encuentran instaladas. Para los periodos intermedios, al igual que las estaciones de la región andina, los valores se presentan dentro de los límites mínimos y máximos establecidos y no tienen valores elevados en el rango de 1 a 4 s (0.25 – 1 Hz). Los periodos largos, muestran niveles de

ruido dentro de los límites establecidos. Las estaciones de PUC0 y PTM0 presentan valores ligeramente por encima del límite máximo y solo en el rango de 15 – 40 s (0.067 – 0.025 Hz) (Ver Figura 5.3).



**Figura 5.3;** Valores de la moda estadística de los PDF analizados para las estaciones de la Región Amazónica.

Con los resultados obtenidos, se generó un modelo con los valores de la moda estadística de todas las estaciones analizadas en el presente estudio. Estos fueron ploteados dentro de una sola gráfica, obteniendo así, valores de tendencia de los niveles mínimos y máximos de ruido sísmico presentes en la Red Sísmica Nacional del Perú (Ver Figura 5.4). Para la determinación de estos límites no se consideraron estaciones con niveles de ruido que sobrepasan enormemente los límites mínimos y máximos globales propuesto por Peterson (1993), ya que estos valores elevados (especialmente en el rango de periodos cortos) podrían enmascarar las ondas de cuerpo de eventos sísmicos de magnitudes pequeñas. Además, no se consideraron las estaciones instaladas en profundidad, ya que, estas presentan condiciones diferentes a las ubicadas en superficie.



*Figura 5.4; Determinación de límites mínimos y máximos obtenidos a partir de los valores de la moda estadística para las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú (líneas rojas).*

Como se muestra en la Figura anterior, el nuevo límite mínimo determinado en este estudio, presenta valores de 18 decibeles aproximadamente por encima del establecido por Peterson (1993). Esta diferencia se debe a que Peterson consideró muchas estaciones ubicadas en profundidad (donde los niveles de ruido sísmico son menores) y las estaciones analizadas en este estudio se encuentran instaladas en superficie, por lo que estarían más expuestas aquellos agentes de ruido sísmico predominantes en cada rango de periodo. Además, Peterson tuvo un enfoque regional, despreciando en muchos casos las condiciones locales de las zonas.

Dentro del nuevo límite máximo establecido, el rango de periodos cortos tiene un comportamiento similar al propuesto por Peterson, la diferencia se presenta alrededor de los 0.3 segundos, con valores menores en 8 dB aproximadamente, esto se debería a que las estaciones presentan menores niveles de ruido en este rango. Los periodos

intermedios se encuentran por debajo del propuesto por Peterson, donde el rango de 1 a 4 s presenta valores ligeramente altos, debidos a la cercanía de las estaciones a la costa, estando más expuestas a ruidos microsísmicos oceánicos. Los periodos largos, presentan mayor variación respecto al modelo propuesto por Peterson, con valores de 7 dB aproximadamente, el cual se debe a la mayor exposición de las estaciones en superficie a la fuente principal de ruido sísmico (variación de presión atmosférica).

Los límites propuestos en este estudio, siguen la tendencia general de los niveles de ruido sísmico presente en las estaciones de la Red Sísmica Nacional, por lo que, si futuras estaciones son instaladas, estas deberían de presentar un comportamiento similar a estos límites.

## **5.2. NIVELES DE RUIDO SÍSMICO EN LA RSN**

Con el análisis realizado en el anterior capítulo, se pudo determinar que la actividad microsísmica oceánica es la principal fuente de ruido dentro de los periodos intermedios, el cual, gracias al análisis estacional y a la variación del ruido sísmico de acuerdo a su posición geográfica, presenta niveles de ruidos más altos en temporadas de invierno en comparación con los valores obtenidos en verano, dado que en esta época del año, la diferencia de presión que ocurre en Océano Pacífico está más cerca a la costa peruana el cual genera una mayor actividad oceánica. Con esto, se puede corroborar lo mencionado por Longuet - Higgins (1950), quien relaciona a esta actividad como fuente principal para la generación de microsismos oceánicos.

Los niveles de ruido sísmico predominantes en los periodos cortos, en su mayoría, están asociados a la relación de la actividad cultural presente cerca de las estaciones sísmicas instaladas y el tipo de suelo sobre el cual se encuentran ubicadas. Tal como se vio en el análisis diurno, las estaciones que se encuentran cerca de áreas pobladas, presentan mayores niveles de ruido en horas de la mañana (06:00-12:00) y la tarde (12:00-18:00) en comparación con las horas de la noche (18:00-00:00) y la madrugada (00:00-06:00), los cuales en muchos casos superan el límite máximo establecido. En algunas estaciones, a pesar de encontrarse cerca de áreas pobladas, se presentan niveles de ruido estables y menores, esto debido al suelo bien consolidado sobre el que se encuentra ubicados, el cual, atenuaría este ruido dentro de este rango de periodos, mientras que, los suelos poco

consolidados están más afectados por este tipo de ruido, lo que desfavorecería en la operatividad de la estación sísmica. Bajo este análisis, se puede ratificar lo observado por Mc Namara y Buland (2004), quienes explican que la mejor manera de diferenciar a la principal fuente de ruido sísmico en los periodos cortos (actividad cultural), es mediante una diferenciación entre el registro obtenido entre el día y la noche.

Los niveles de ruido sísmico en los periodos largos, de acuerdo al análisis estacional, están asociados a la variación de presión atmosférica, que, en conjunto con el tipo de suelo, generarían niveles de ruidos altos y muy cerca del límite máximo propuesto por Peterson (1993). Como se observa dentro del análisis de la variación del ruido sísmico de acuerdo a su posición geográfica, existe una relación entre las estaciones que presentan altos niveles de ruido (en los periodos largos) con las zonas de mayor variación de presión atmosférica, pudiendo de esta manera reafirmar lo mencionado por Murphy y Savino (1975), quienes relacionan esta actividad atmosférica con el ruido presente en este rango de periodos. Además, se aprecia dentro el análisis diurno, que la variación de la actividad atmosférica genera mayor ruido sísmico en las componentes horizontales, especialmente en estaciones donde el suelo es poco consolidado, lo que confirmaría lo propuesto por Sorrells (1971), quien explica que los sedimentos poco consolidados son más sensitivos a las variaciones de la presión atmosférica.

Dentro de la información procesada, existen dos estaciones que se encuentran instaladas a profundidad (ATH0 y NNA), del análisis de estos, se puede afirmar que la ubicación del sensor sísmico en profundidad influye bastante en la señal sísmica adquirida por este, siendo esta muy favorable, dado a que las fuentes de ruido sísmico predominantes en los rangos de periodos analizados, afectarían menos a estaciones ubicadas en este punto. En comparación con las estaciones ubicadas en superficie, las componentes horizontales, para este caso, presenta mayor estabilidad, teniendo un comportamiento muy similar a la componente vertical, el cual se ha demostrado que, a pesar de estar en superficie, es más estable y menos ruidoso.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis de variación diurna y estacional del ruido sísmico presente en cada una de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú.

**Tabla 5.1;** Niveles de ruido de las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Perú para diferentes rangos de interés.

Estación	Ruido de Periodos Cortos (<1s)			Ruido de Periodos Intermedios (1-15 s)			Ruido de Periodos Largos (>15s)		
	COMPONENTES			COMPONENTES			COMPONENTES		
	N	E	V	N	E	V	N	E	V
ALTO	C	C	C	C	C	C	C	C	C
ANCO	B	B	B	C	C	C	A	A	B
ANDY	C	C	C	C	C	C	B	B	C
APAT	C	C	C	B	B	B	B	B	C
ATHO	C	C	C	C	C	C	C	C	C
AYA0	A	A	A	B	B	C	A	A	B
AYRA	B	B	B	C	C	C	B	B	C
BVTA	C	C	C	B	B	B	B	B	C
CAJO	C	C	C	C	C	C	B	B	C
CAZU	C	C	C	C	C	C	C	C	C
CBT2	C	C	C	C	C	C	A	A	A
CGLO	B	B	C	C	C	C	C	C	C
CHAY	C	C	C	B	B	B	B	B	C
QNJL	C	C	C	C	C	C	B	B	C
CHOO	C	C	C	C	C	C	B	B	C
CHVY	B	B	B	C	C	C	B	B	B
QLLH	B	B	B	C	C	C	B	B	C
GUA0	B	B	C	C	C	C	B	B	C
GYAO	C	C	C	C	C	C	B	B	C
YLS0	B	B	B	C	C	C	B	B	C
HMEY	C	C	C	C	C	C	B	B	C
HNAL	C	C	C	C	C	C	B	B	C
HSAL	C	C	C	C	C	C	A	A	A
HYOO	C	C	C	C	C	C	C	C	C
HUBO	B	B	B	C	C	C	C	C	C
IQT0	A	A	A	C	C	C	B	B	C
ISAB	C	C	C	C	C	C	B	B	C
LVIC	B	B	C	C	C	C	B	B	C
LYAR	C	C	C	C	C	C	B	B	C
MNZN	C	C	C	C	C	C	B	B	C
MPCH	C	C	C	C	C	C	B	B	C
NIEV	B	B	B	C	C	C	B	B	C
NNA	C	C	C	C	C	C	C	C	C
NNAP	C	C	C	C	C	C	A	A	B
NVMI	C	C	C	C	C	C	B	B	C
PACL	C	C	C	C	C	C	B	B	C

PARO	-	-	C	-	-	C	-	-	C
PATO	C	C	C	C	C	C	B	B	C
PAYA	B	B	B	C	C	C	B	B	C
PBER	B	B	C	C	C	C	B	B	C
PCHO	C	C	C	C	C	C	B	B	C
PTMO	A	A	A	B	B	B	A	A	B
PUCO	A	A	A	B	B	B	A	A	B
QLK0	C	C	C	C	C	C	C	C	C
QRHC	C	C	C	C	C	C	C	C	C
SCRT	B	B	B	C	C	C	B	B	C
SNIG	C	C	C	C	C	C	B	B	C
STPO	B	B	C	C	C	C	B	B	C
TICA	A	A	A	C	C	C	B	B	C
TOCO	A	A	A	C	C	C	B	B	C
TOQ0	B	B	B	C	C	C	B	B	C
UB10	C	C	C	C	C	C	B	B	C
UNAP	B	B	B	C	C	C	B	B	B
YANA	C	C	C	C	C	C	B	B	C
YCA0	A	A	A	B	B	B	B	B	C
YRMO	A	A	A	B	B	C	B	B	C

A = Alto

B = Cerca del Límite Máximo

C = Bajo

## CONCLUSIONES

El análisis y la evaluación de los niveles de ruido sísmico presente en 56 estaciones sísmicas pertenecientes a la Red Sísmica Nacional (RSN) administrada por el Instituto Geofísico del Perú permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se determinaron los límites mínimos y máximos de los niveles de ruido sísmico a partir del análisis de función de probabilidad de potencia del espectro (PDF), los cuales permitieron conocer los niveles de ruido sobre el que encuentran operando las estaciones sísmicas. Donde, el límite mínimo determinado presenta valores altos comparados con el límite mínimo global, la diferencia presente es de alrededor de los 18 dB aproximadamente, mismo que puede deberse a la posición en superficie de los sismómetros de la RSN. El límite máximo presenta valores altos en el rango de los periodos largos, 7 dB por encima del límite máximo global, estos se deberían a la posición en superficie de las estaciones sísmicas y a la interacción de las fuentes de ruido con el tipo de suelo sobre el cual se encuentran instaladas, en los periodos menores a 0.3 s se presenta una diferencia de 8 dB por debajo del límite máximo global, lo que indicaría la menor presencia de ruido dentro de este rango de periodos. Con estos límites, se podrá controlar y mejorar la calidad de las señales sísmicas registradas por la Red Sísmica Nacional. Además, se podrá usar como estándar de comparación para futuros estudios de niveles de ruido de estaciones que se deseen instalar dentro del territorio peruano.
2. Los niveles de ruido sísmico en la RSN, presentan valores altos en los periodos cortos, en su mayoría, debidos a la relación de la actividad cultural y al tipo de suelo sobre el que se encuentran instaladas algunas estaciones. Los periodos intermedios presentan ruidos de origen microsísmico oceánico que afecta mayormente a las estaciones ubicadas en el litoral peruano. Los periodos largos, presentan valores estables en la componente vertical, pero en las componentes horizontales los valores son elevados, esto se debería a la ubicación de estas estaciones en superficie y a la interacción de la variación de la presión atmosférica con el tipo de suelo sobre el que se encuentran instaladas.
3. Con el análisis de variación diurna se pudo discretizar y conocer el comportamiento del ruido sísmico presente en un día de registro, siendo la fuente de ruido generada

por la actividad cultural la más evidente. De acuerdo a la variación estacional, se comprueba que las fuentes naturales que generan ruido varían conforme a cada temporada estacional, presentándose niveles de ruido sísmico más altos en las temporadas de invierno en comparación con las de verano.

4. Del análisis de ruido sísmico de acuerdo a la posición geográfica, se concluye que los mayores niveles de ruido en los periodos intermedios se presentan en la región centro y sur del país, cerca del litoral peruano. Los periodos largos presentan mayores valores en la zona sur del país, disminuyendo gradualmente hacia el norte a lo largo de la cordillera de los Andes.

## RECOMENDACIONES

1. Proponer al Instituto Geofísico del Perú la instalación de estaciones sísmicas importantes en profundidad, a fin de mejorar la calidad de las señales sísmicas registradas en la Red Sísmica Nacional.
2. Realizar comparaciones entre los niveles de ruido registrados por las estaciones instaladas a nivel superficial con las instaladas a profundidad, a fin de evaluar a detalle la calidad de las señales y la influencia que tiene el ruido sísmico en estas estaciones.
3. Realizar medidas correctivas necesarias para las estaciones que presentan niveles de ruidos altos, tanto en periodos cortos y largos, en especial para las estaciones que sobrepasan el límite máximo establecido, dado que algunos sismos locales podrían ser enmascarados por estos.
4. Ampliar la información obtenida de la variación del comportamiento de acuerdo a la posición geográfica, dado a que este puede ser un nuevo punto de estudio que podría ayudar a complementar el conocimiento del comportamiento de la actividad oceánica y atmosférica en el Perú.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. and P. G. Richards (1980) Quantitative seismology – theory and methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco, Vol 1, Chapter 10: principles of seismometry, pp 477- 524.
- Algue J. (1900) Relation between quelques mouvements microseismiques et l'existence, the position and the distance des cyclones, Proces-Verbaux et Memories du congress international de meteorology, pp 131.
- Bendat, J.S. and A.G. Piersol. (1971) Random data: analysis and measurement procedures, John Wiley and Sons, New York, pp 407.
- Bormann P. (2002) New Manual of Seismological Observatory Practice, GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam, Germany, Chapter 7, pp 15.
- Bormann, P. and Wieland E. (2013) New manual of seismological observatory practice, Chapter 4 (NMSOP), Geo Forchungs Zentrum Potsdam.
- Bruce Townsend (2014) Symmetric Triaxial Seismometers, Nanometrics, Inc., Kanata, Ontario, Canada. pp 3-10.
- Brune and Oliver (1959) The seismic noise of the Earth's surface, Bull. Seismol. Soc. Am. 49 (1959), pp. 349–353.
- Carter, J.A., N. Barstow, P.W. Pomeroy, E.P. Chael, and P.J. Leahy (1991) High frequency seismic noise as a function of depth, Bull. Seismal. Soc. Am., 81(4), pp 1101-1114.
- Cooley, J.W., and J. W. Tukey (1965) An algorithm for machine calculation of complex Fourier series, Math. Comp., 19, pp 297-301.
- haubriHua V., Tavera H. y Bernal I. (2006) Análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones sísmicas de banda ancha de la red sísmica nacional del Perú, Bol. Sociedad Geológica del Perú, 101, pp 165 – 177.
- Dai, A. yK. E. Trenberth, (2004) The diurnal cycle and its depiction in the Community Climate System Model, J. Climate, 17, pp 930–951

- Friedrich, A., Klinge, K., and Krüger, F. (1998) Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array, *J. Seism.*, no2, pp 47-64.
- Galperin EI. (1955) Azimuthal method of seismic observations (in Russian), *Gostoptechizdat* 80.
- Given, H. K. (1990) Variations in broadband seismic noise at IRIS/IDA stations in the USSR with implications for event detection, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80, no. 6B, pp 2072–2088.
- Haubrich, R. A., Munk, W. H., and Snodgrass, F. E. (1963) Comparative spectra of microseisms and swell, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 53, pp 27-37.
- Havskov J. and J. Alguacil (2002) Instrumentation in Earthquake Seismology, Institute of Solid Earth Physics University of Bergen Norway and Instituto Andaluz de Geofisica University of Granada Spain. pp 14-68.
- Havskov, J., and J. Alguacil (2004) Instrumentation in Earthquake Seismology, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 358.
- Holcomb, G. L., and Hutt, C. R. (1992) An evaluation of installation methods for STS-1 seismometers, Open File Report 92-302, U. S. Geological Survey, Albuquerque, NM.
- Huang, C.-J., H.-Y. Yin, C.-Y. Chen, C.-H. Yeh, and C.-L. Wang (2007) Ground vibrations produced by rock motions and debris flows, *J. Geophys. Res.*, pp 112.
- Jaiswal and Santosh Mishra (2008) Seismic Instrumentation: Indian Perspective, Indian National Centre for Ocean Information Services and National Geophysical Research Institute, Hyderabad. pp. 3-4.
- Lay, T and T. C. Wallace (1995) Modern global seismology, Academic Press, 521 pp.
- Longuet-Higgins, M. D. (1950) A theory on the origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, A 243, pp 1-35.
- McNamara, D. E., and R. P. Buland (2004) Ambient noise levels in the continental United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 94, no. 4, pp 1517–1527.

McNamara D. E. and Boaz R. I. (2006) Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package, U.S. Geological Survey.

Medina S. (2016) Evaluación de los niveles de ruido sísmico en la Red Sísmica Satelital para

- la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú, Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa – Perú.
- Moreno, J. y C. Alfaro (2000) De los microsismos a los microtemblores, VIII Congreso Colombiano de Geociencia 2000 – Sociedad Colombiana De Geotecnia.
- Murphy, A.J. and J.R. Savino (1975) A comprehensive study of long period (20-200 s) Earth noise at the high gain worldwide seismograph stations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, pp 1827-1862.
- Peterson, J. (1993) Observations and modeling of seismic background noise, U.S. Geol. Survey Open-File Report 93-322, pp 95.
- Peterson, J., and C. R. Hutt (1989) IRIS/USGS plans for upgrading the Global Seismograph Network, USGS Open File Rep.89-471, U.S.Geological Survey, Reston,Va.
- Savino, J., McCamy, K., and Hade, G. (1972) Structures in Earth noise beyond twenty seconds - a window for earthquakes, *Bull. Seismal. Soc. Am.*, 62(1), pp 141-176.
- Scherbaum, F. (1996) Of poles and zeros, fundamentals of digital seismology, Kluwer Academic Publishers.
- Sorrells, G. G. (1971) A preliminary investigation into the relationship between long-period seismic noise and local fluctuations in the atmospheric pressure field, *Geophys. J. Int.* 26, nos. 1/4, pp 71–82.
- Trnkoczy A., Jens Havskov, et al. (2011) Seismic Networks, Chapter 8 de New Manual, pp 3-10.
- Trnkoczy, A., P. Bormann, W. Hanka, L. G. Holcomb, and R. L. Nigbor (2002) Site selection, preparation and installation of seismic station, in IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice, vol. 1, edited by P. Bormann, chap. 7, pp. 1–106, GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Wiechert, E. (1904) Verhandlungen der zweiten internationalen Seismologischen Konferenz, *Beitr. Geophys., Ergänzungsband II*, pp 41-43

- Wielandt, E. (2002) Seismometry, in International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A, edited by W. H. K. Lee et al., pp 283– 304, Academic, San Diego, Calif.
- Wielandt, E., and Streckeisen, G. (1982) The leaf-spring seismometer: Design and performance, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, pp 2349-2367.
- Willmore, P. L. (Ed.) (1979) Manual of Seismological Observatory Practice, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-20, September 1979, Boulder, Colorado, pp 165.
- Withers, M. M., Aster, R. C., Young, Ch. J., and Chael, E. P. (1996) High-frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 5, pp 1507-1515.
- Whipple, F. J. W. y A. W. Lee (1935) Notes on the theory of microseisms, *Monthly Not Of the Roy, Astron. Soc., geoph. Suppl.*, Vol. 3.
- Young, Ch. J., Chael, E. P., Withers, M. W., and Aster, R. C. (1996) A comparison of the high- frequency (>1Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 5, pp 1516-1528.
- Zanon, F.S. (1938) I microseismi registrati in Venezia causati da cicloni sull'Atlantico e sull'Adriatico, *Bolletino della Societa Sismologica Italiana*, Vol. 35, pp 219-226.
- Zürn, W., Laske, G., Widmer-Schmidrig, R., and Gilbert, F. (2000) Observation of Coriolis coupled modes below 1 mHz, *Geophys. J. Int.*, 143, pp 113 - 118.

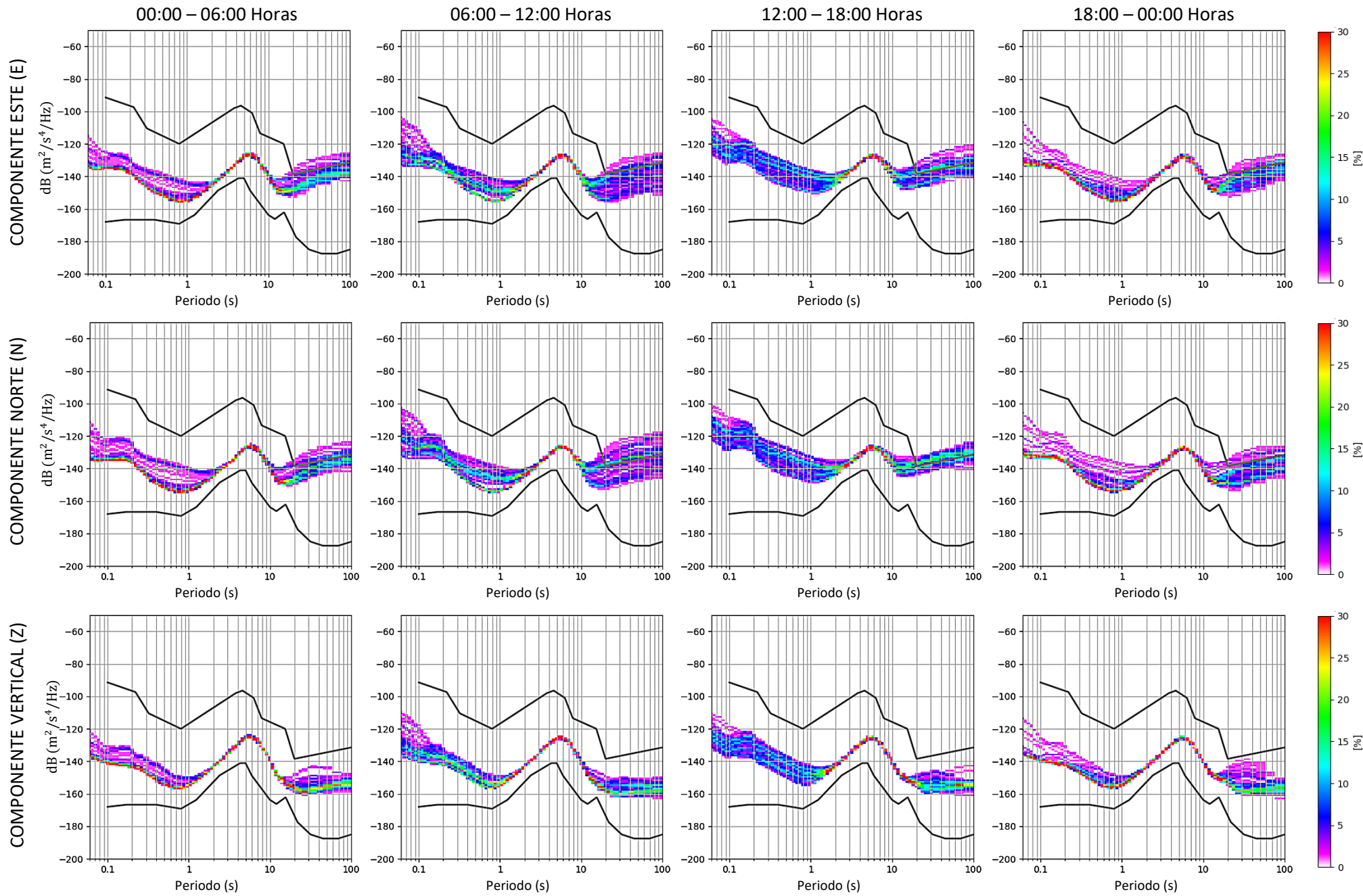
## **ANEXOS**

# **ANEXO A**

Variación Diurna de las Estaciones de la  
Red Sísmica Nacional del Perú

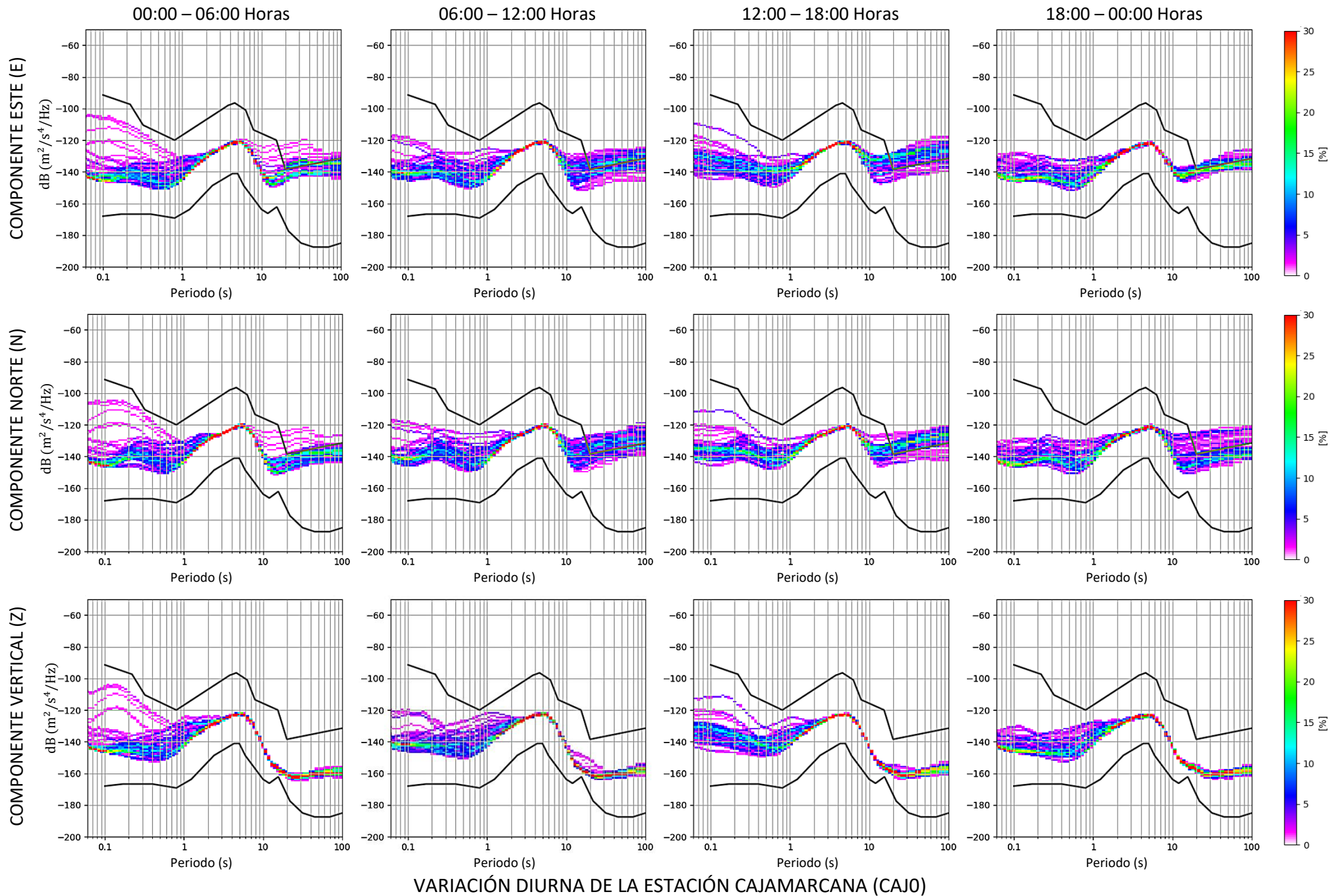




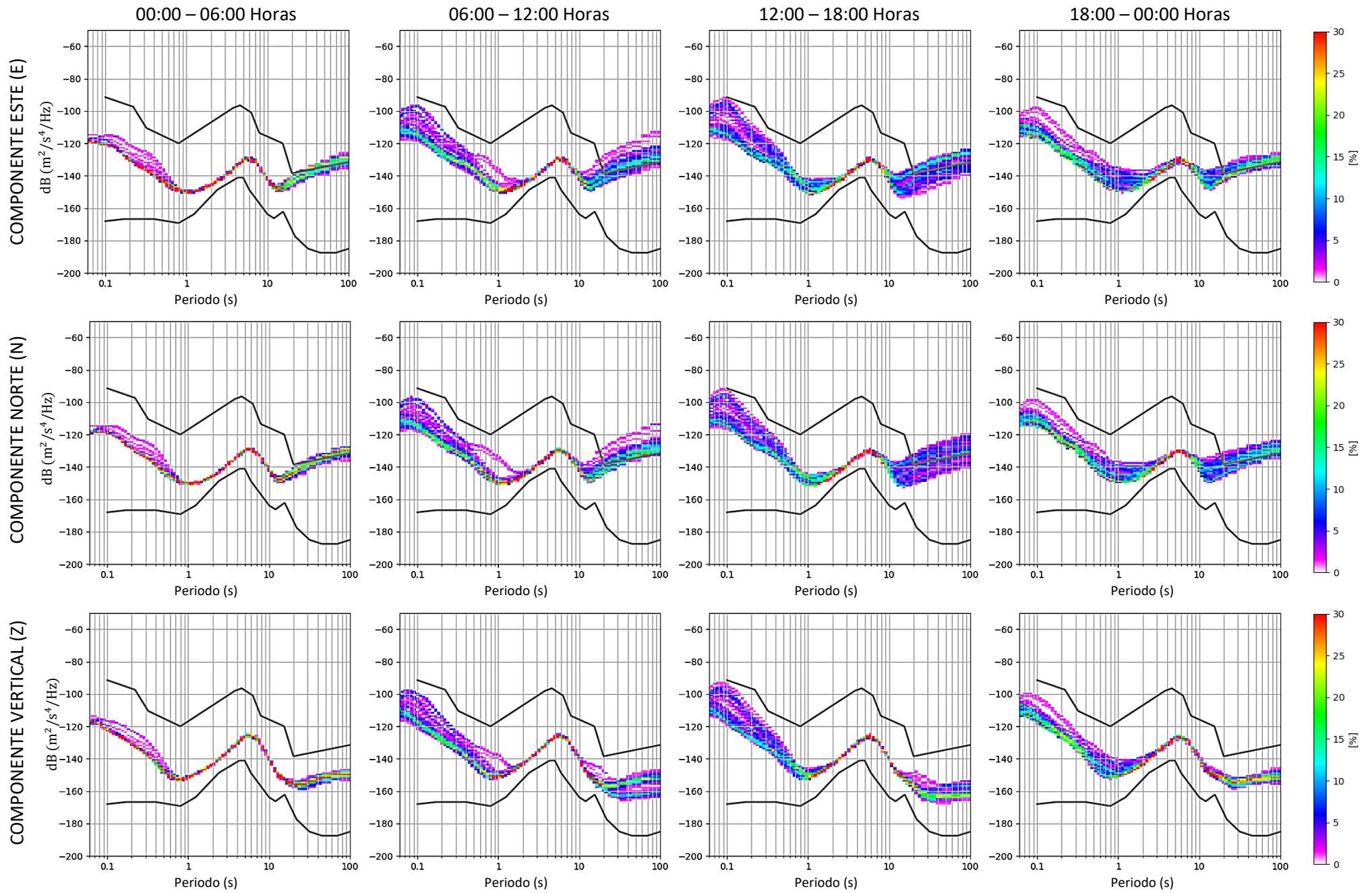


VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN ABRA PATAHUASI (APAT)

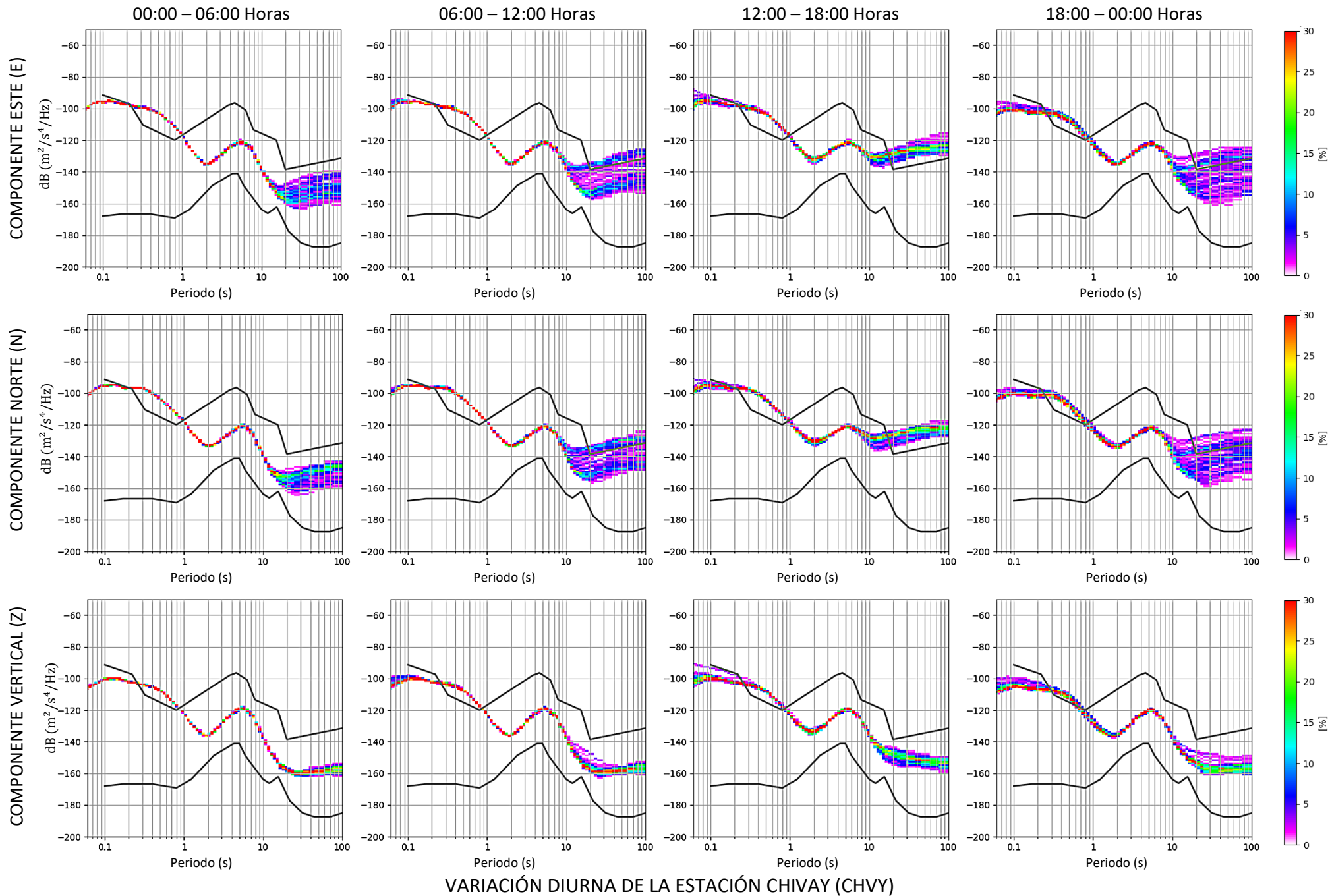




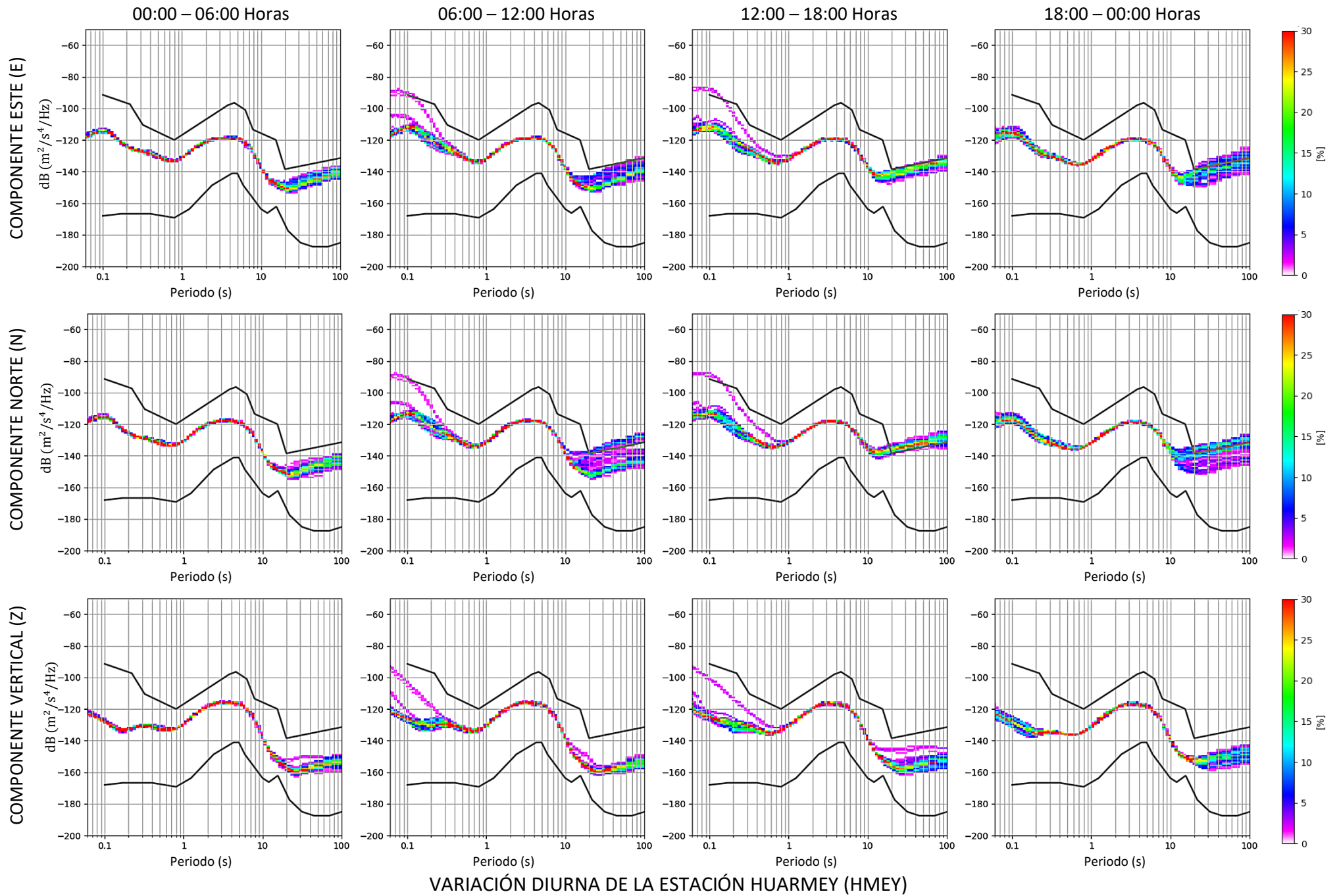




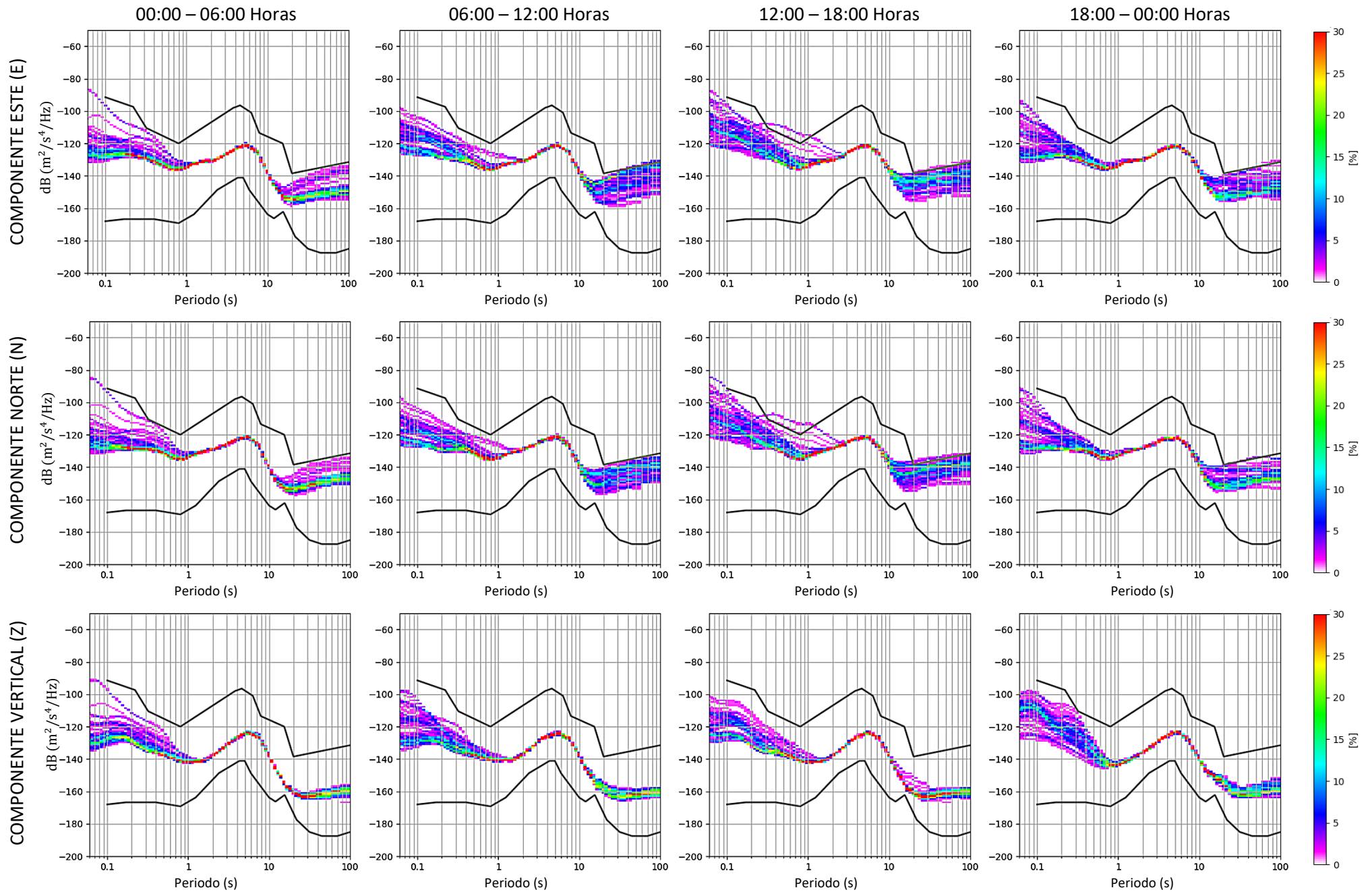
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN CHAUPI AYLLU (CHAY)



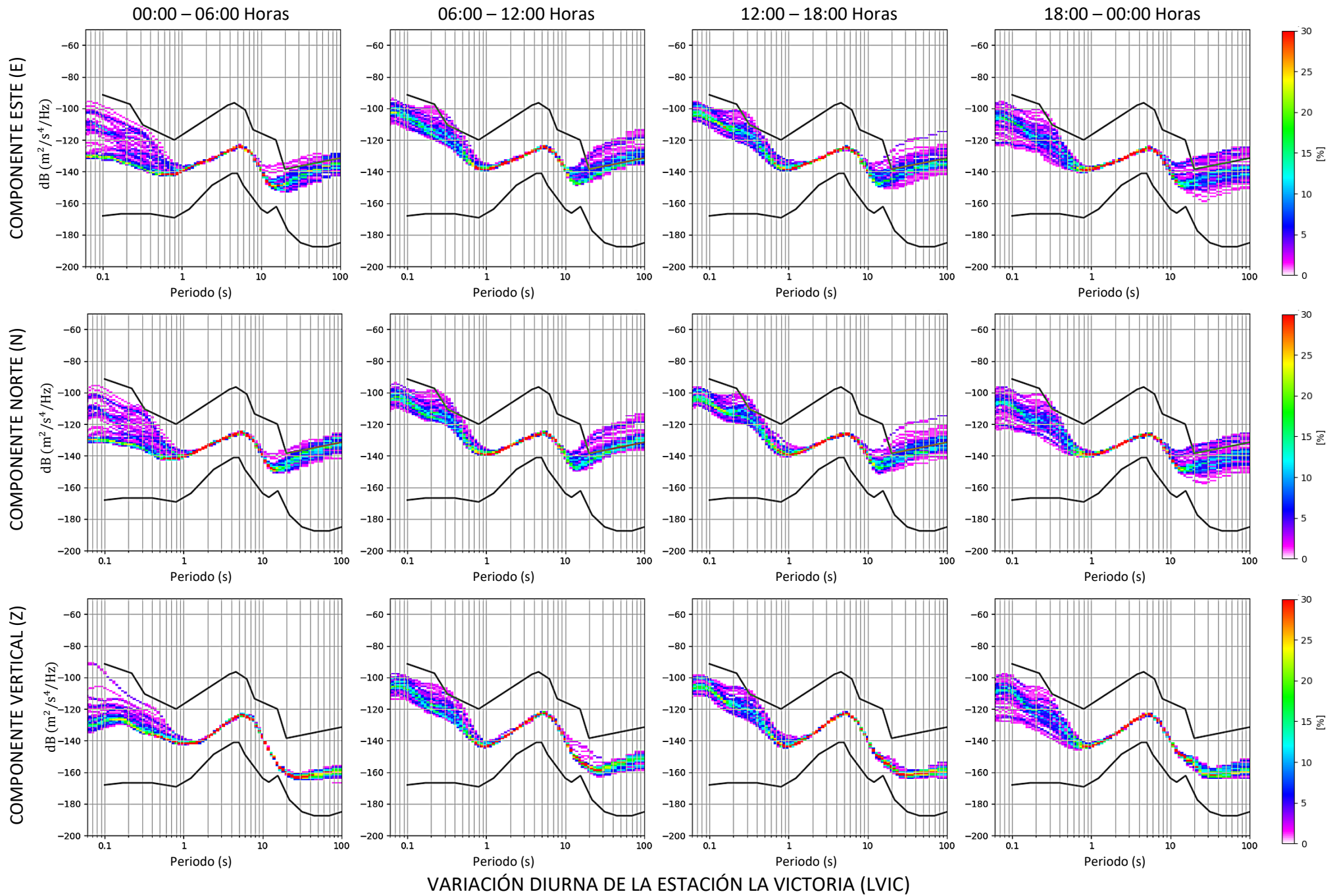


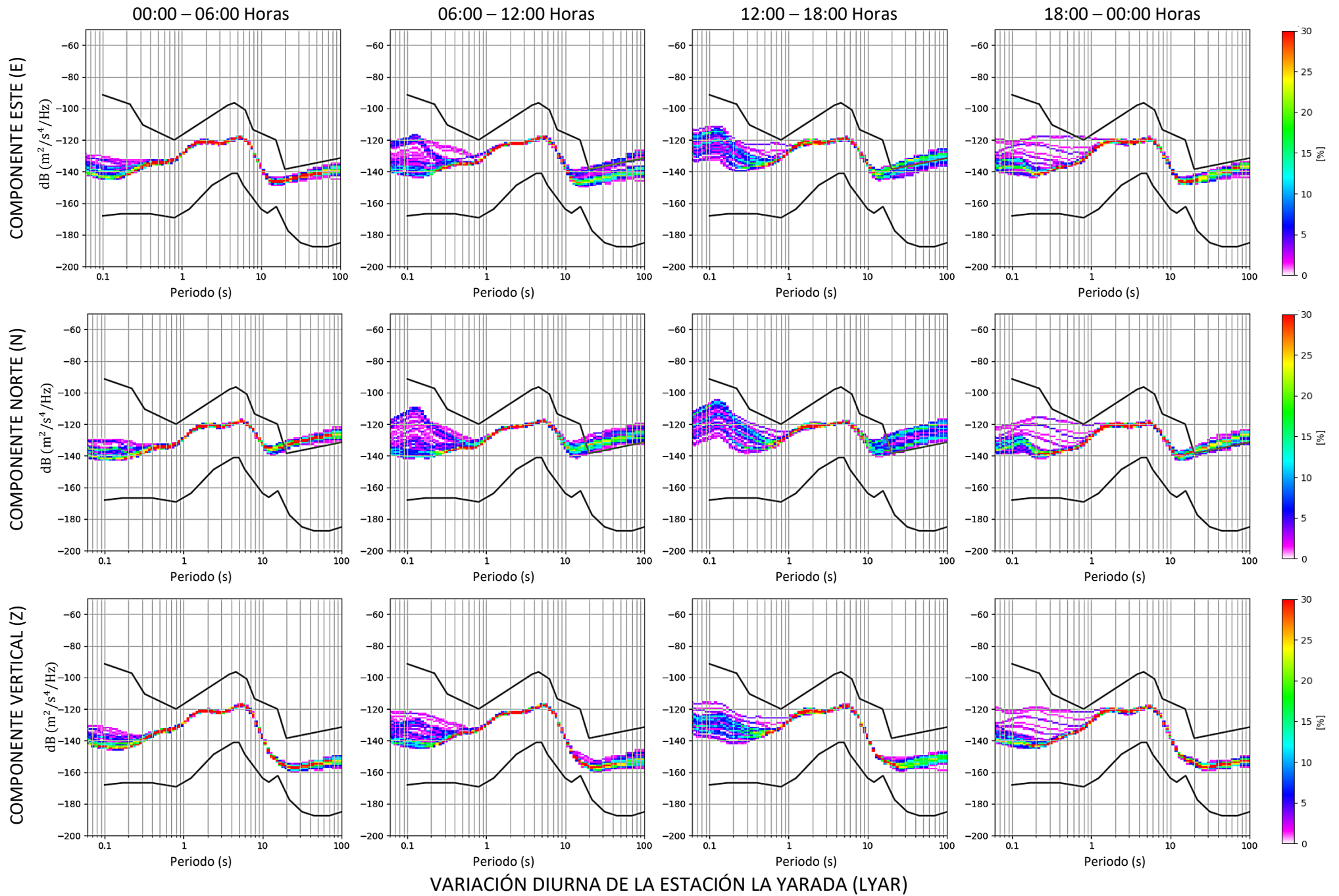


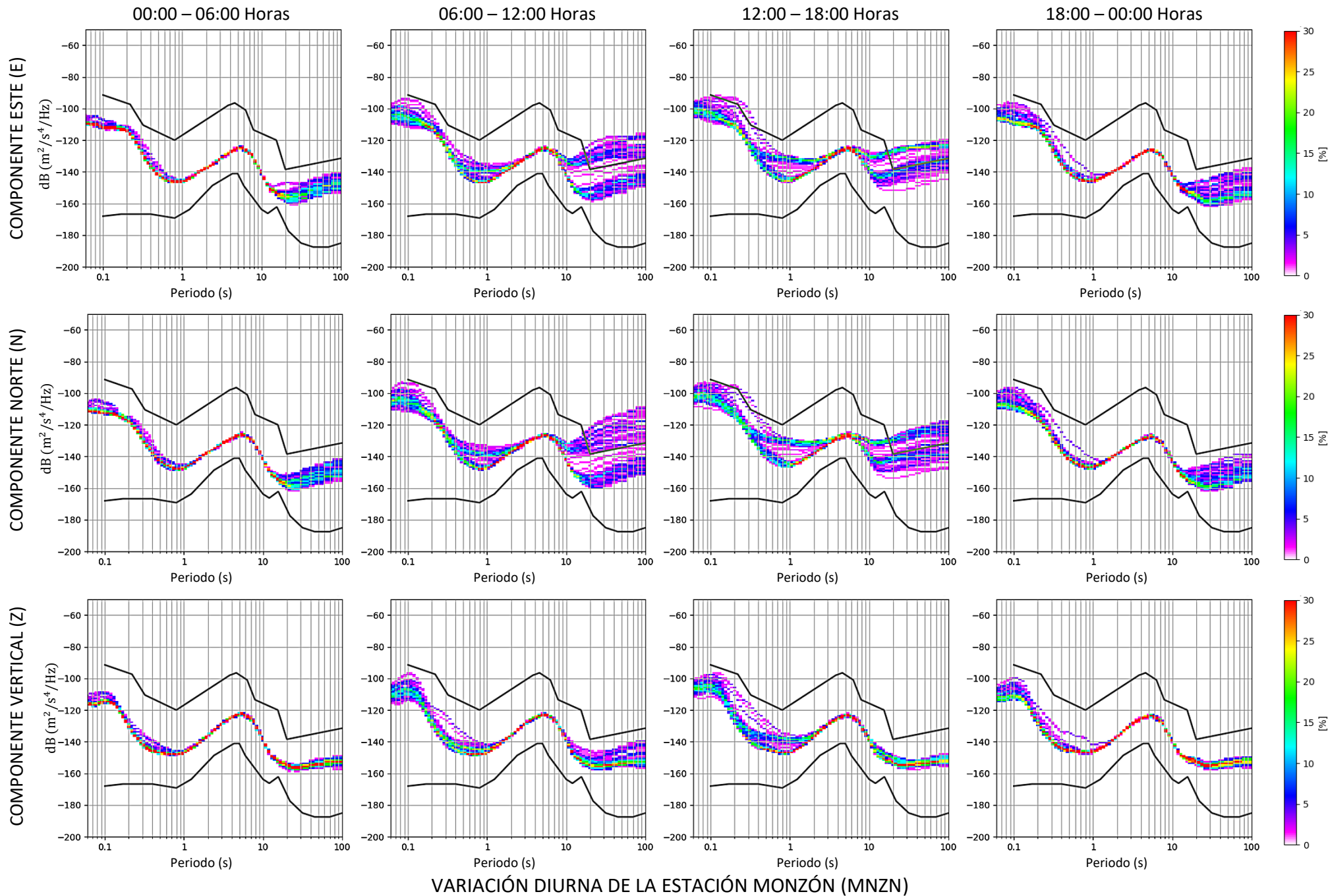


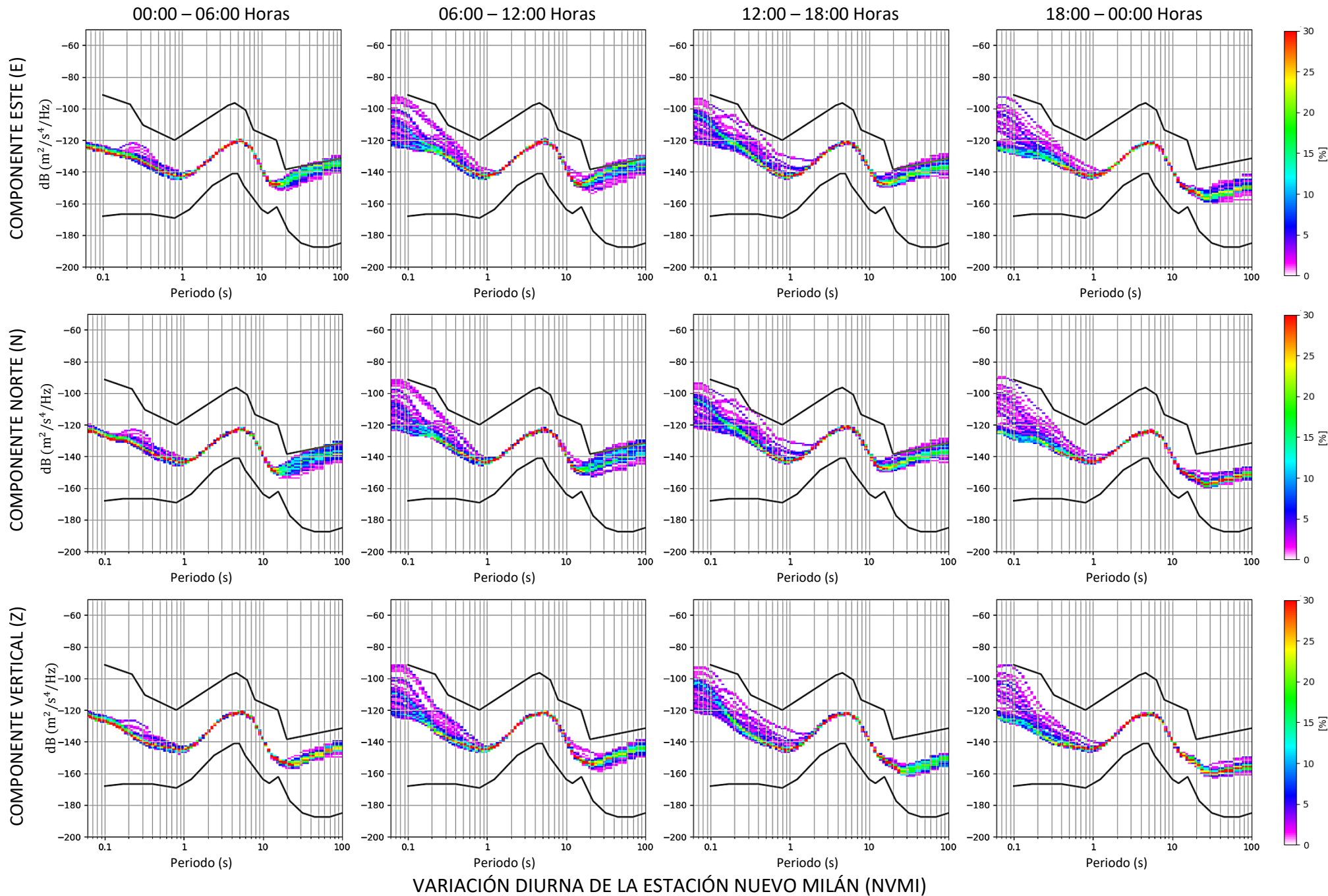


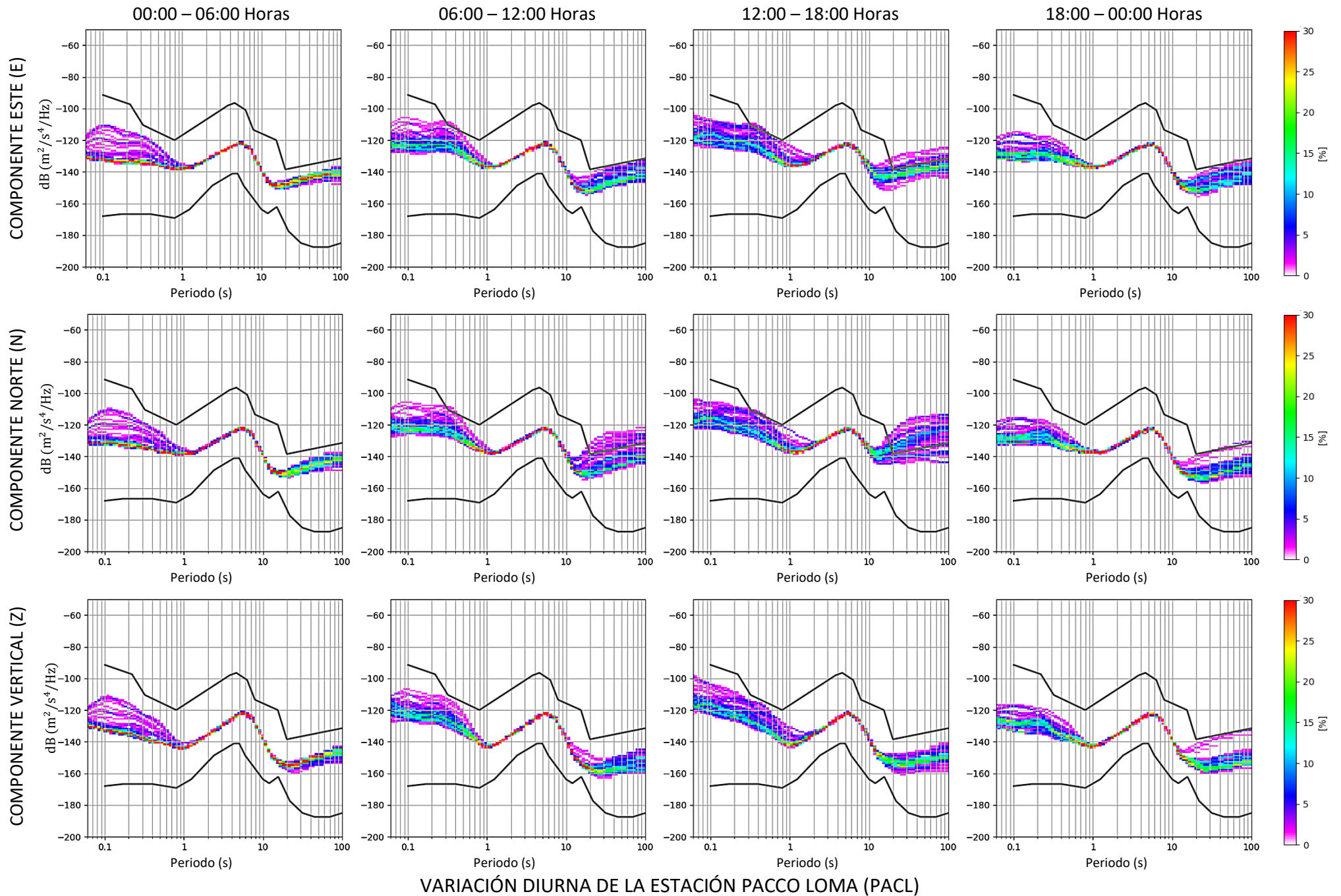
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN SANTA ISABEL DE CHAPA (ISAB)

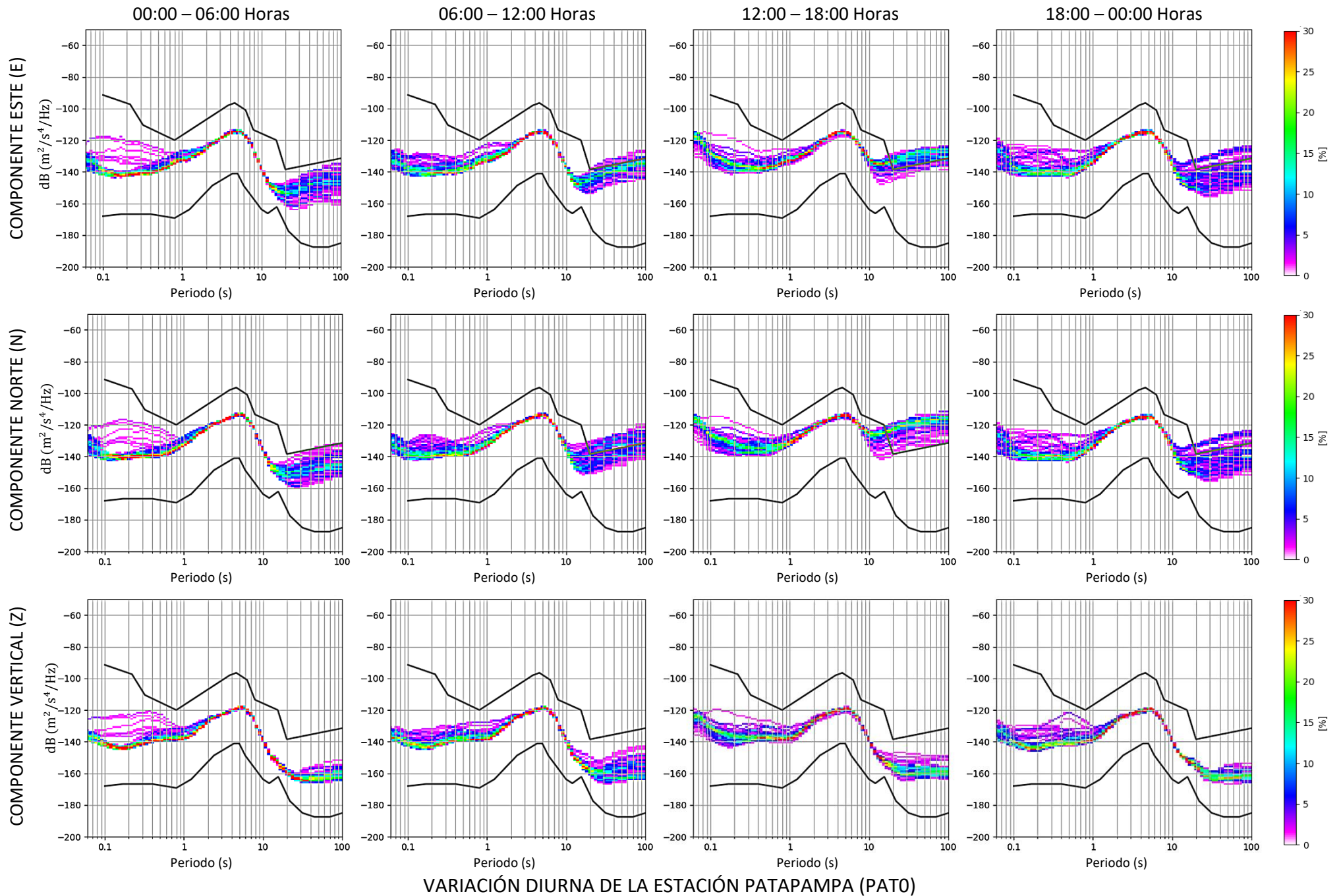


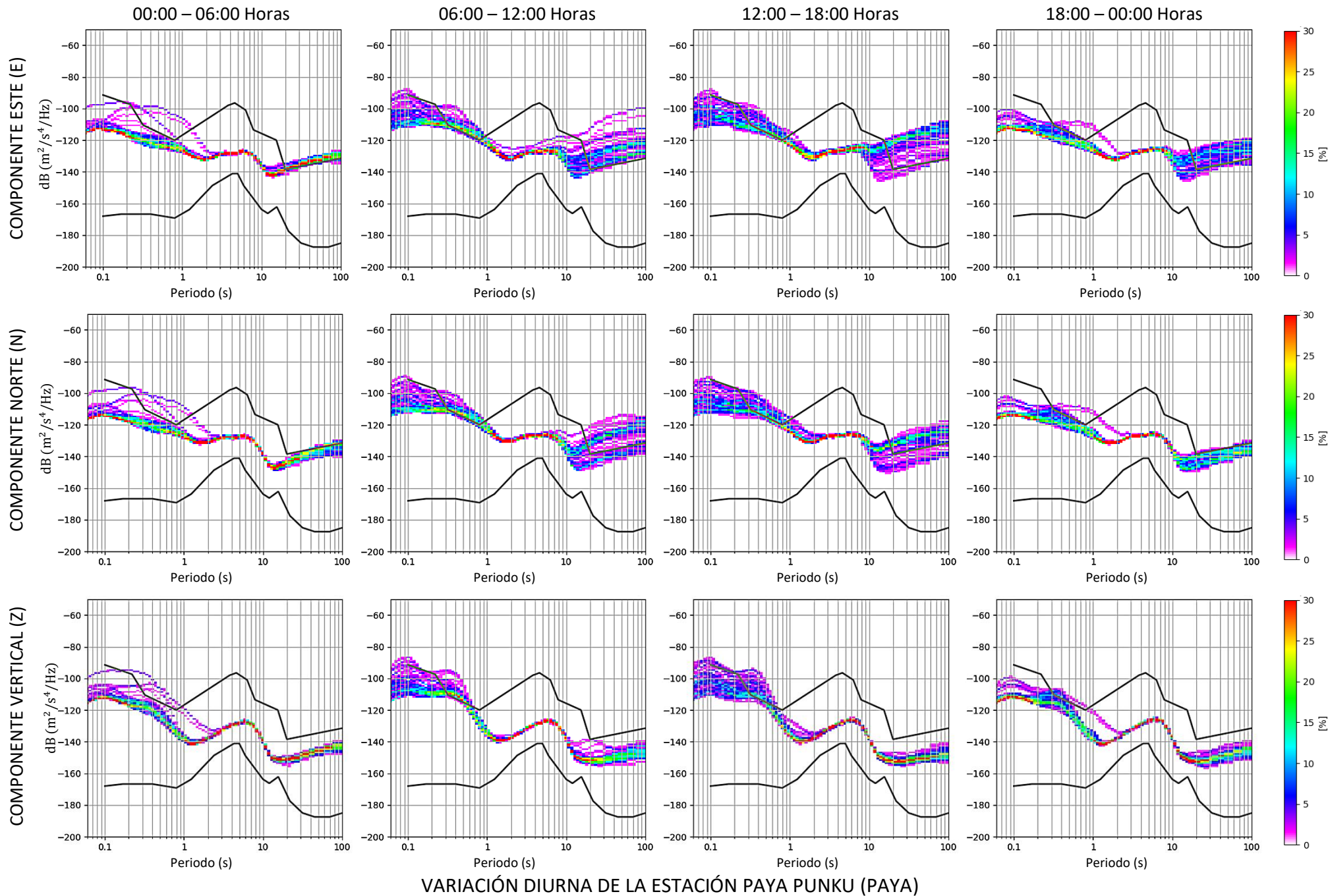


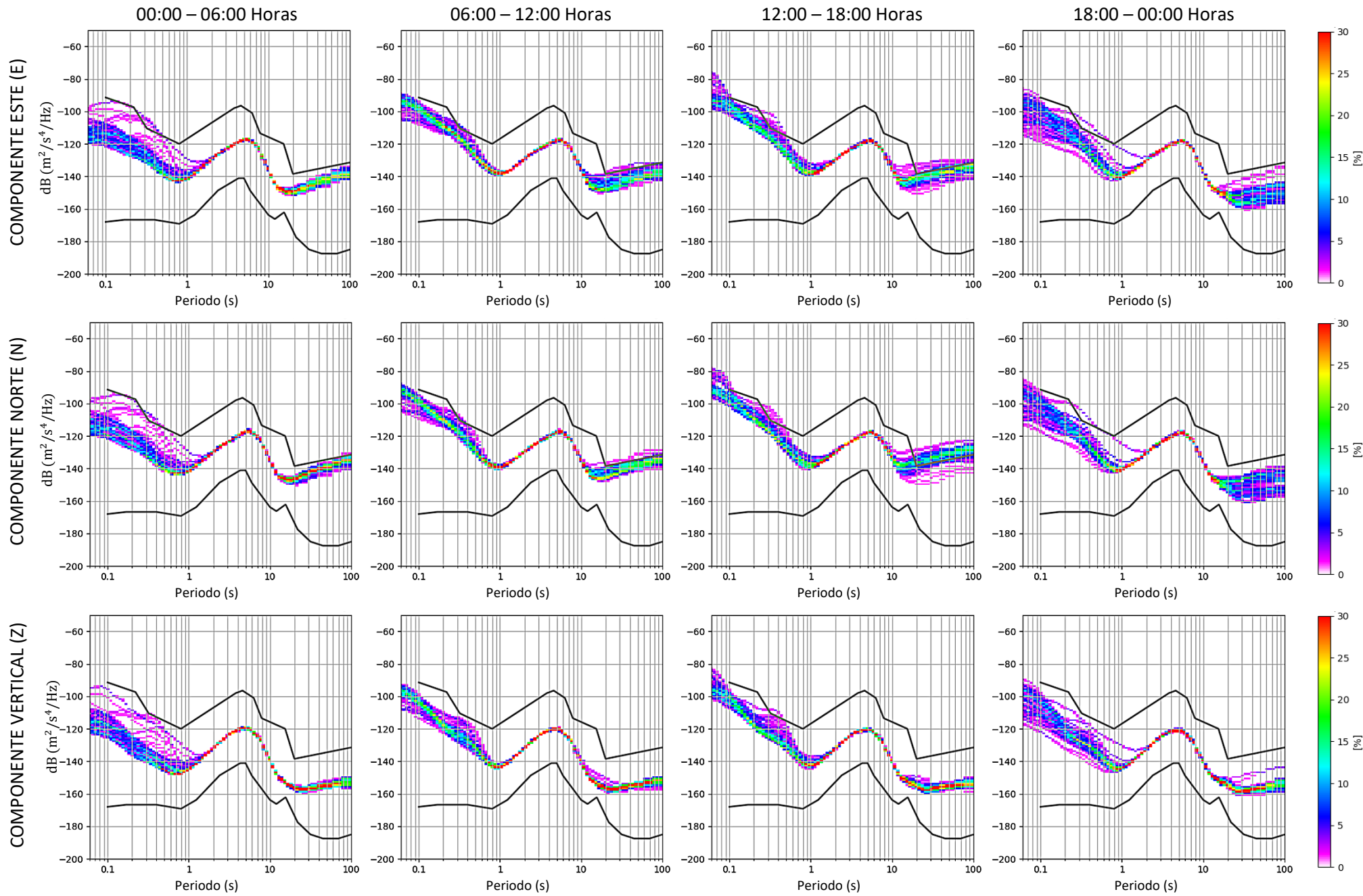






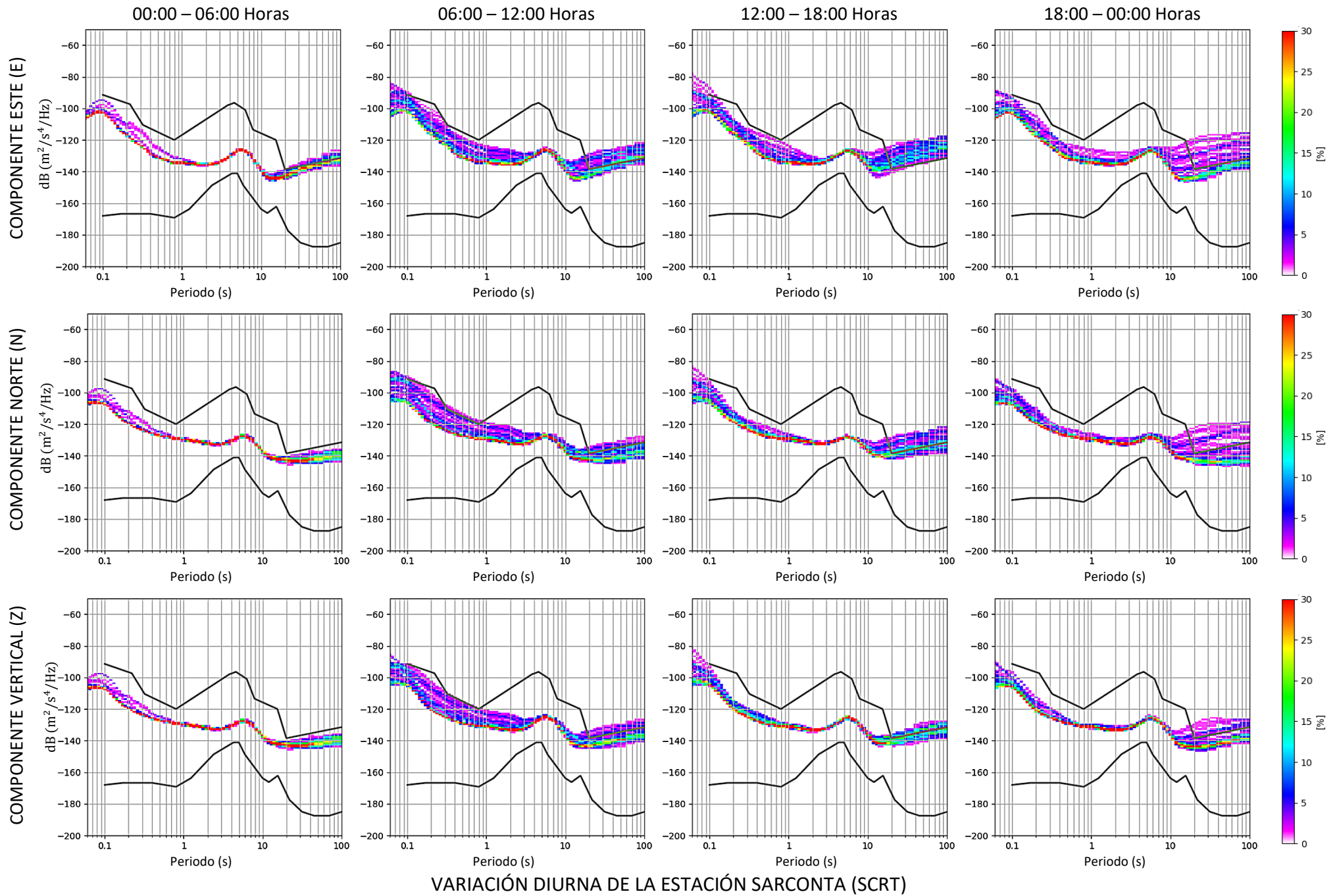




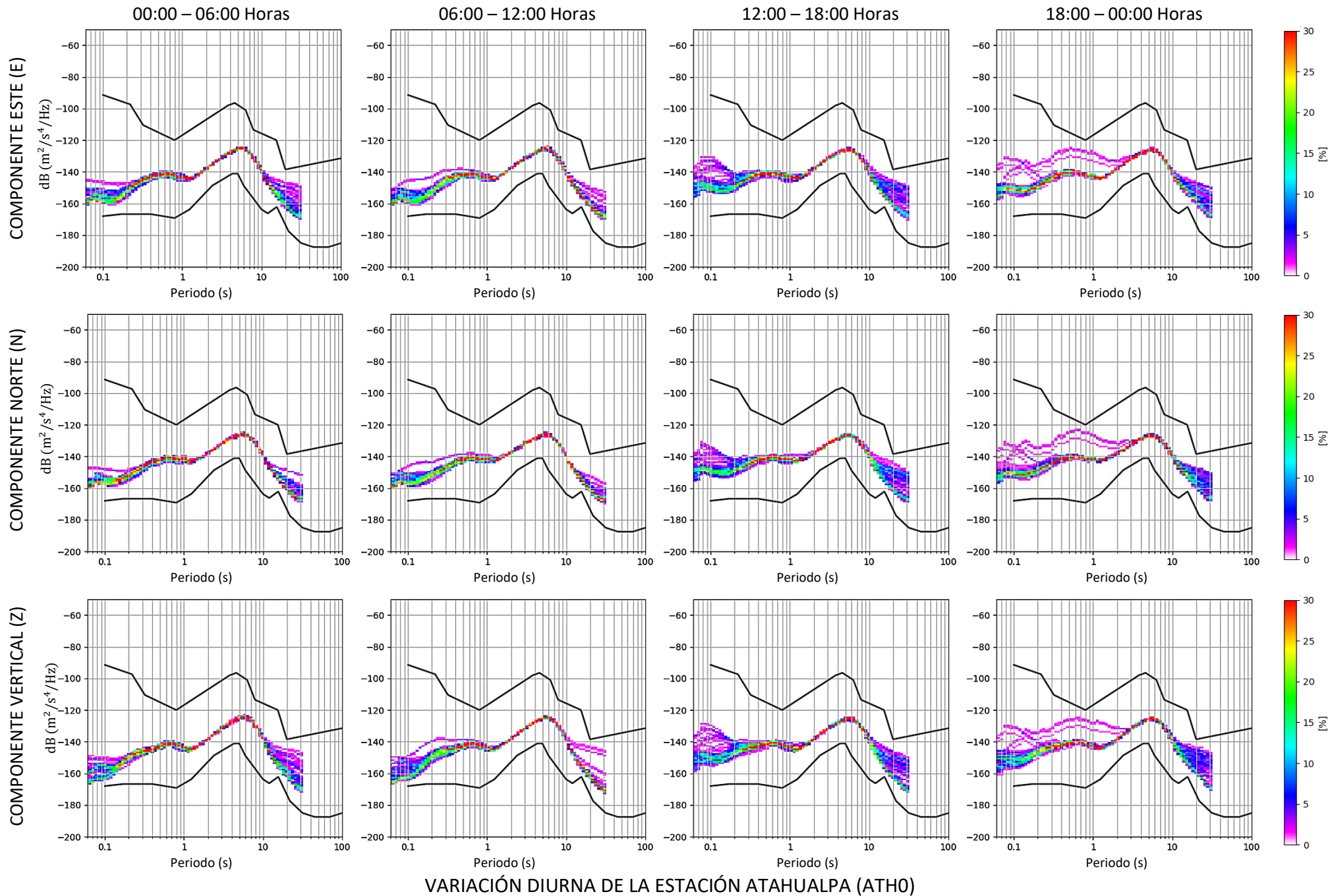


VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN PUERTO BERMÚDEZ (PBER)

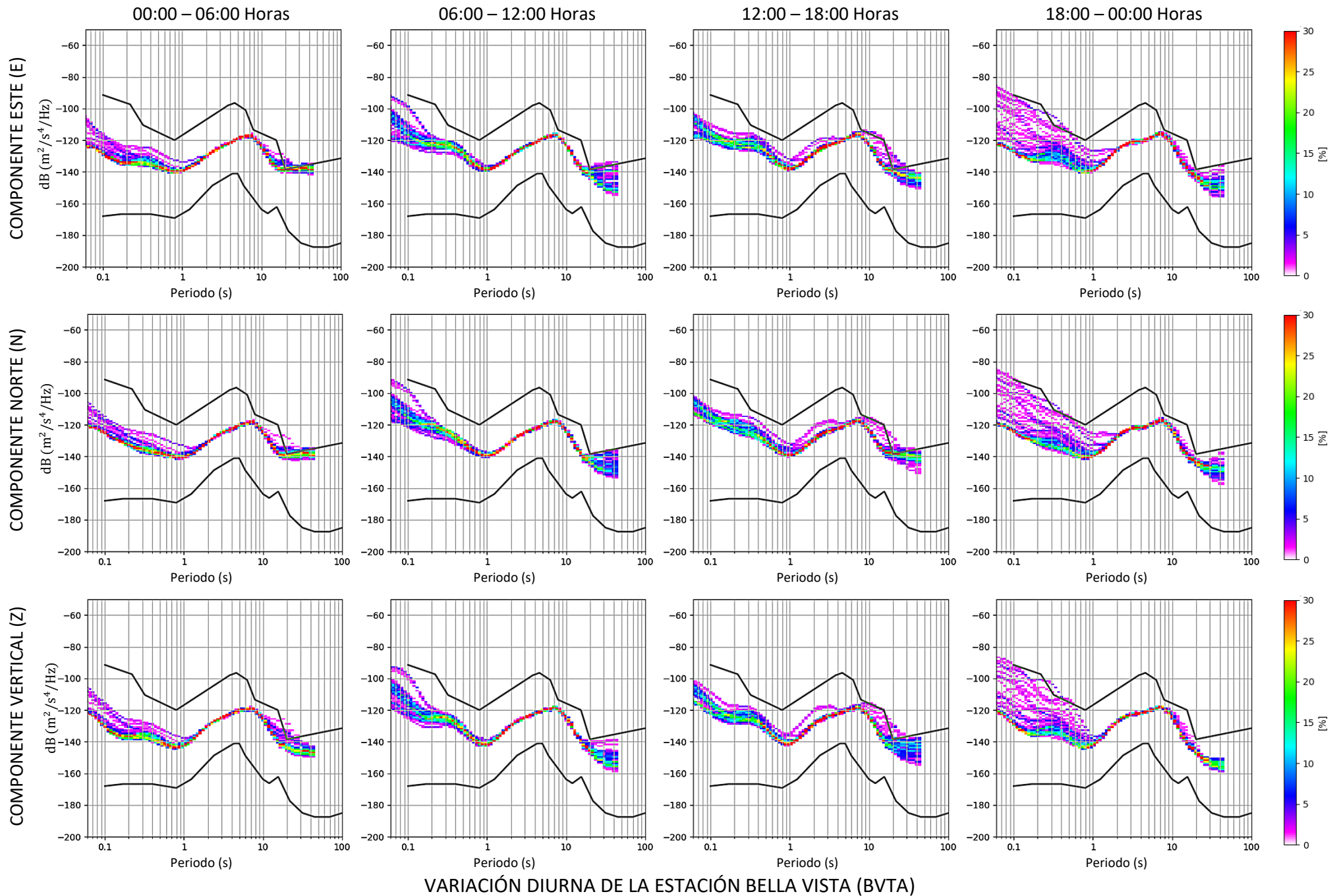


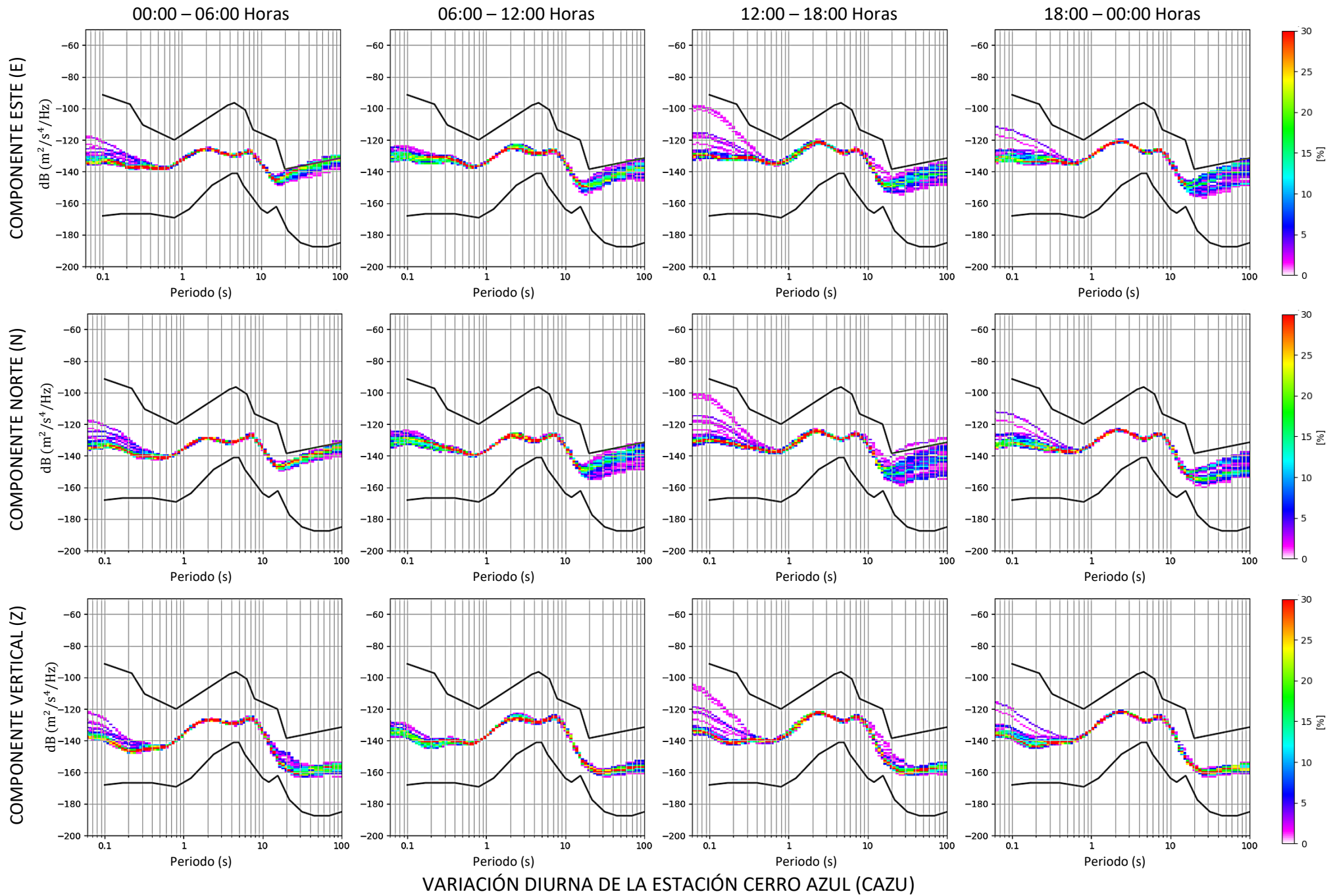


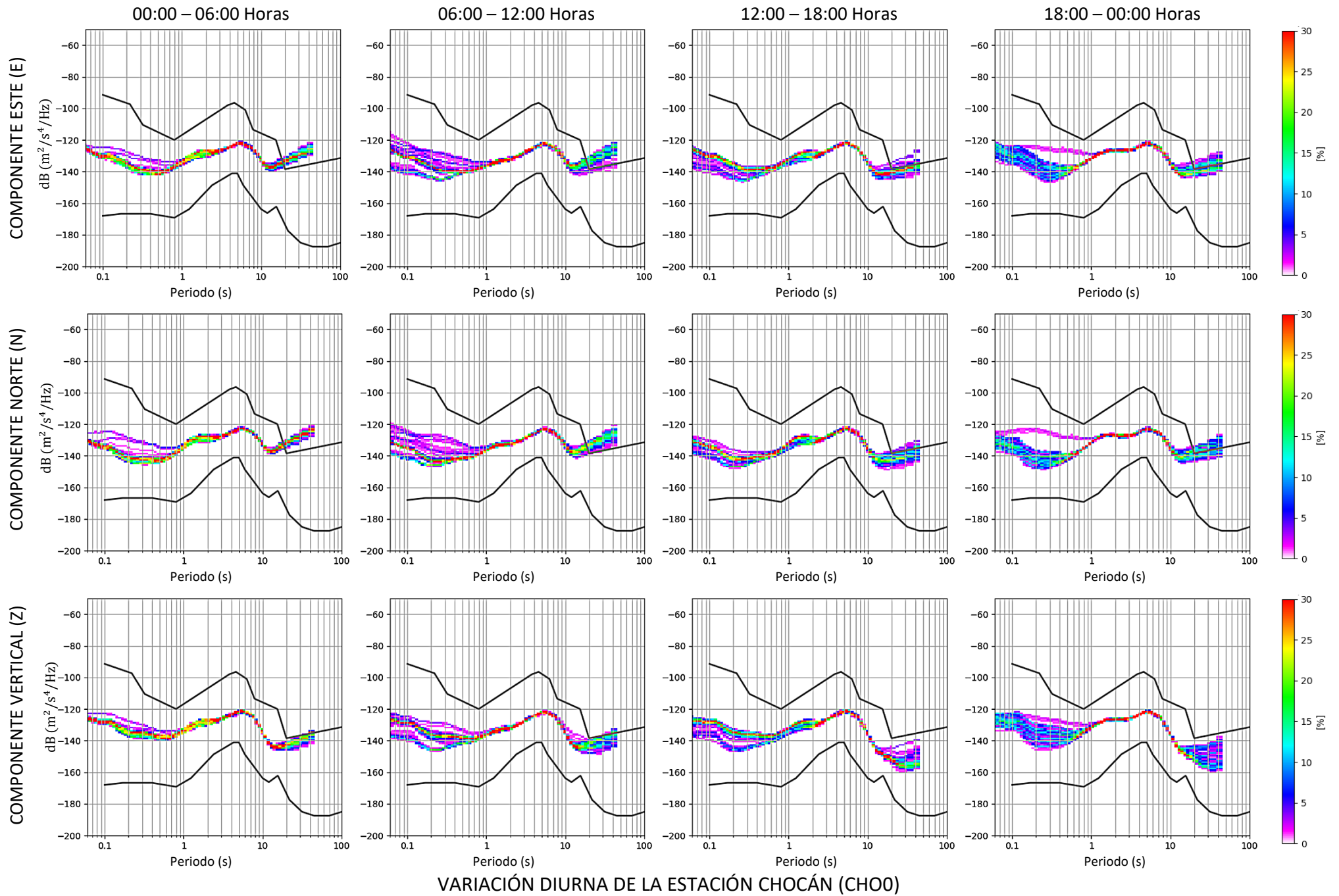


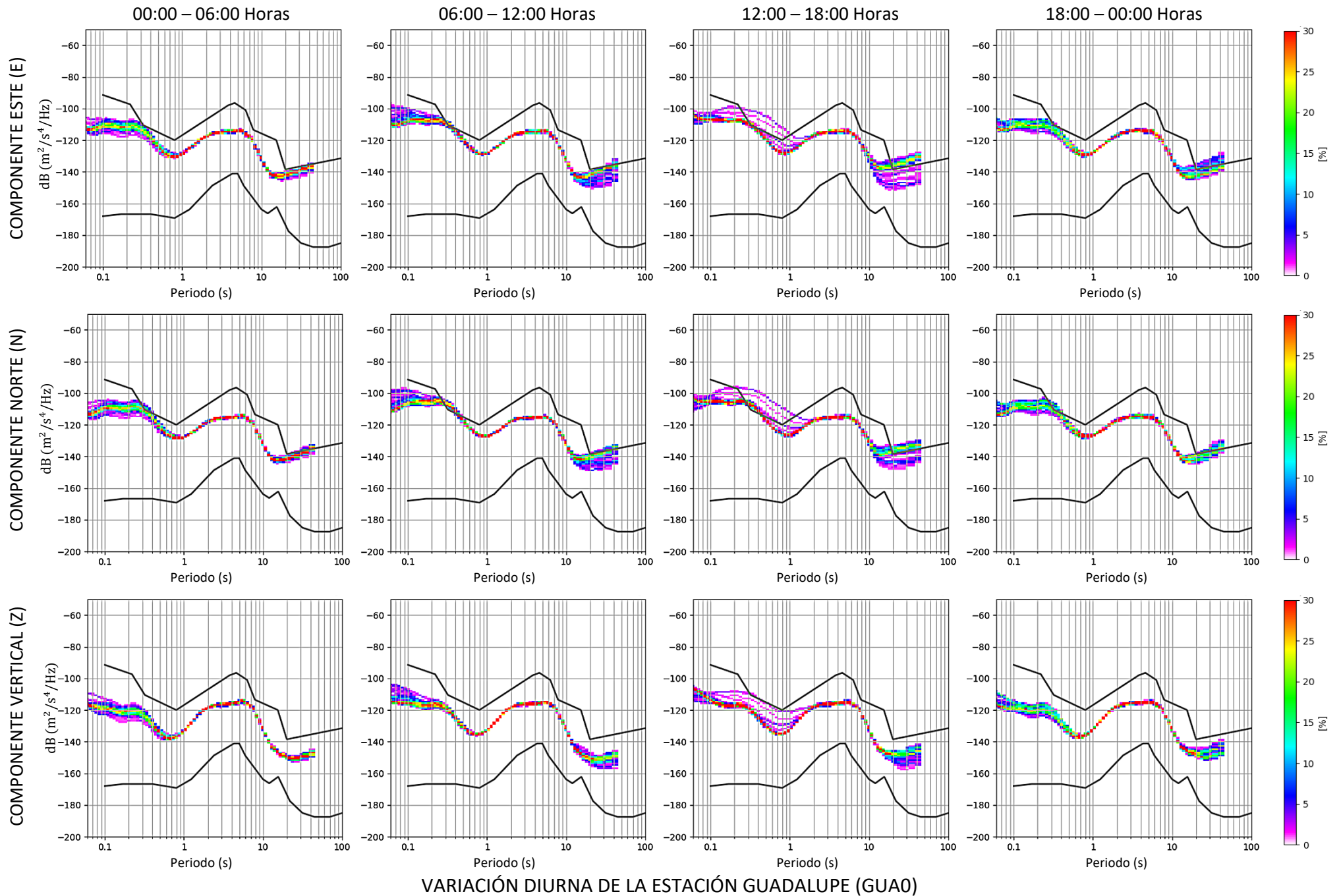


VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN ATAHUALPA (ATHO)

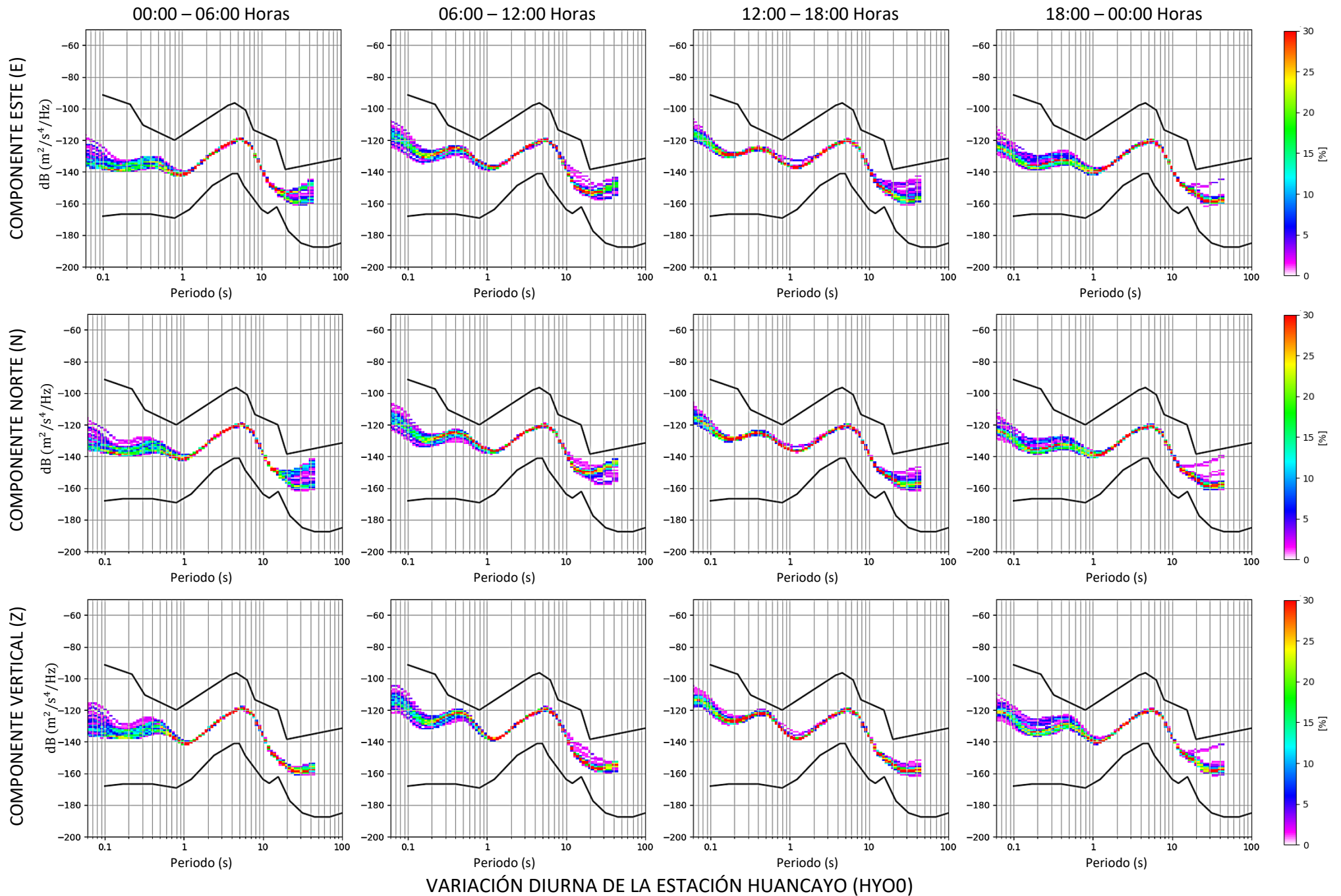


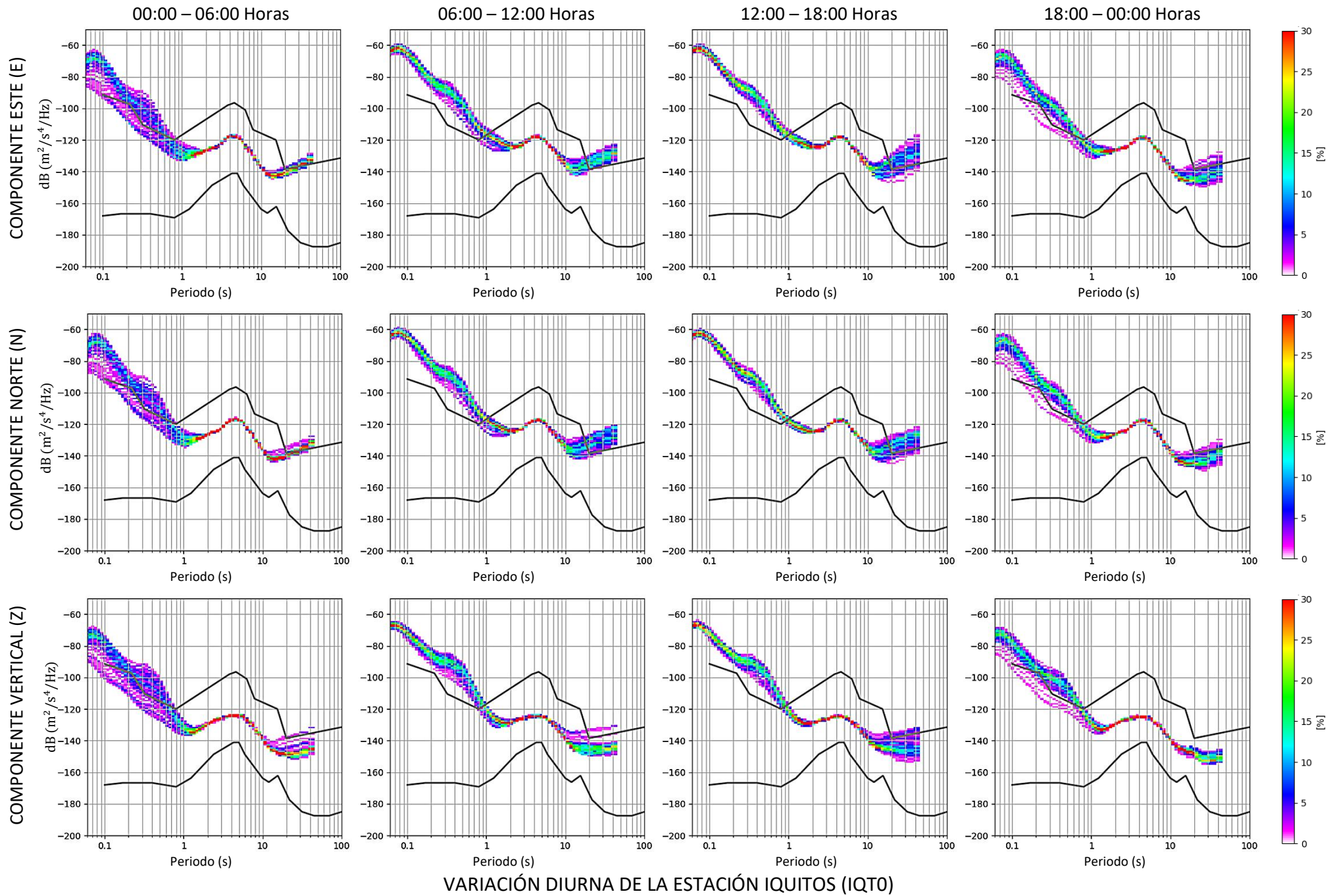


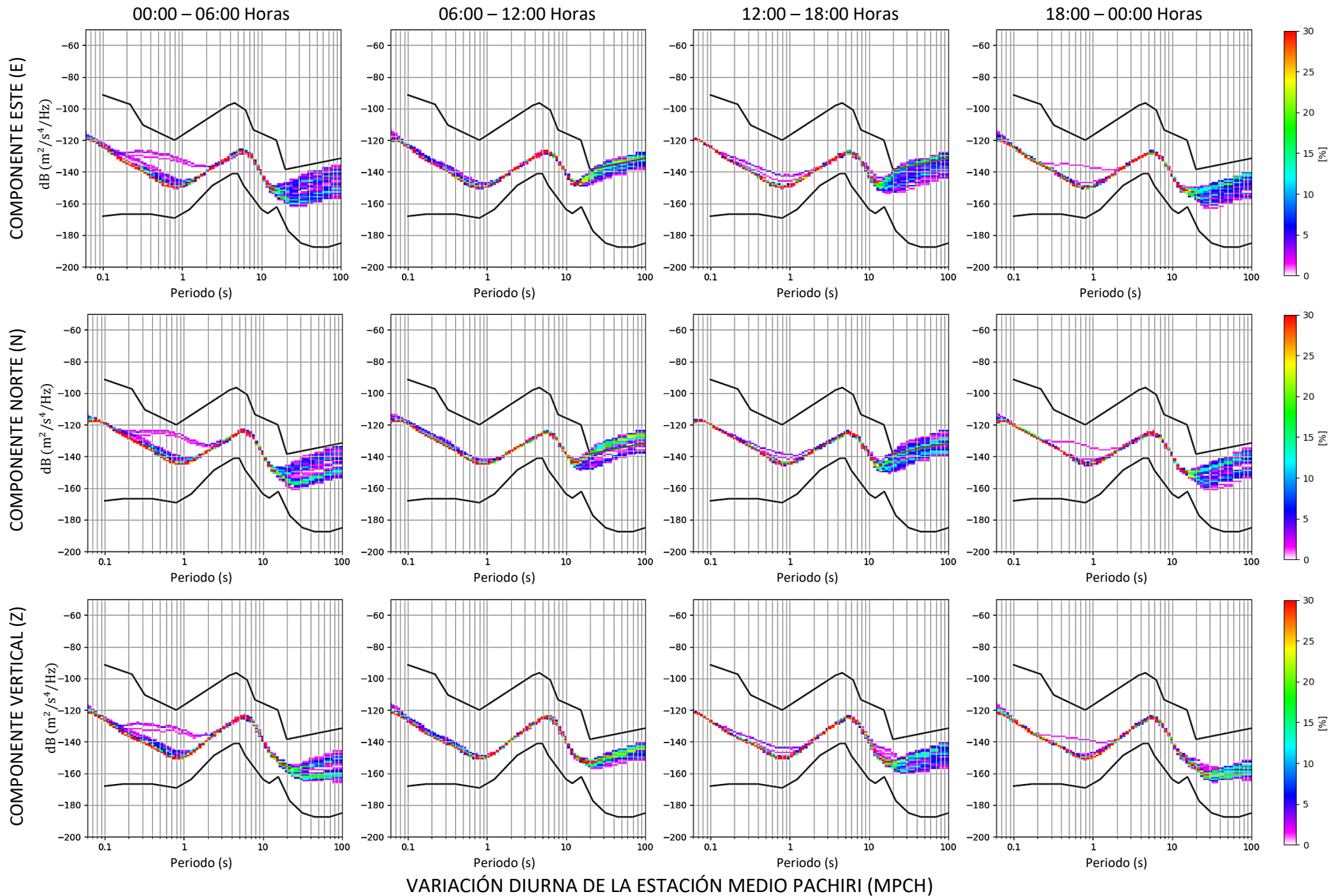


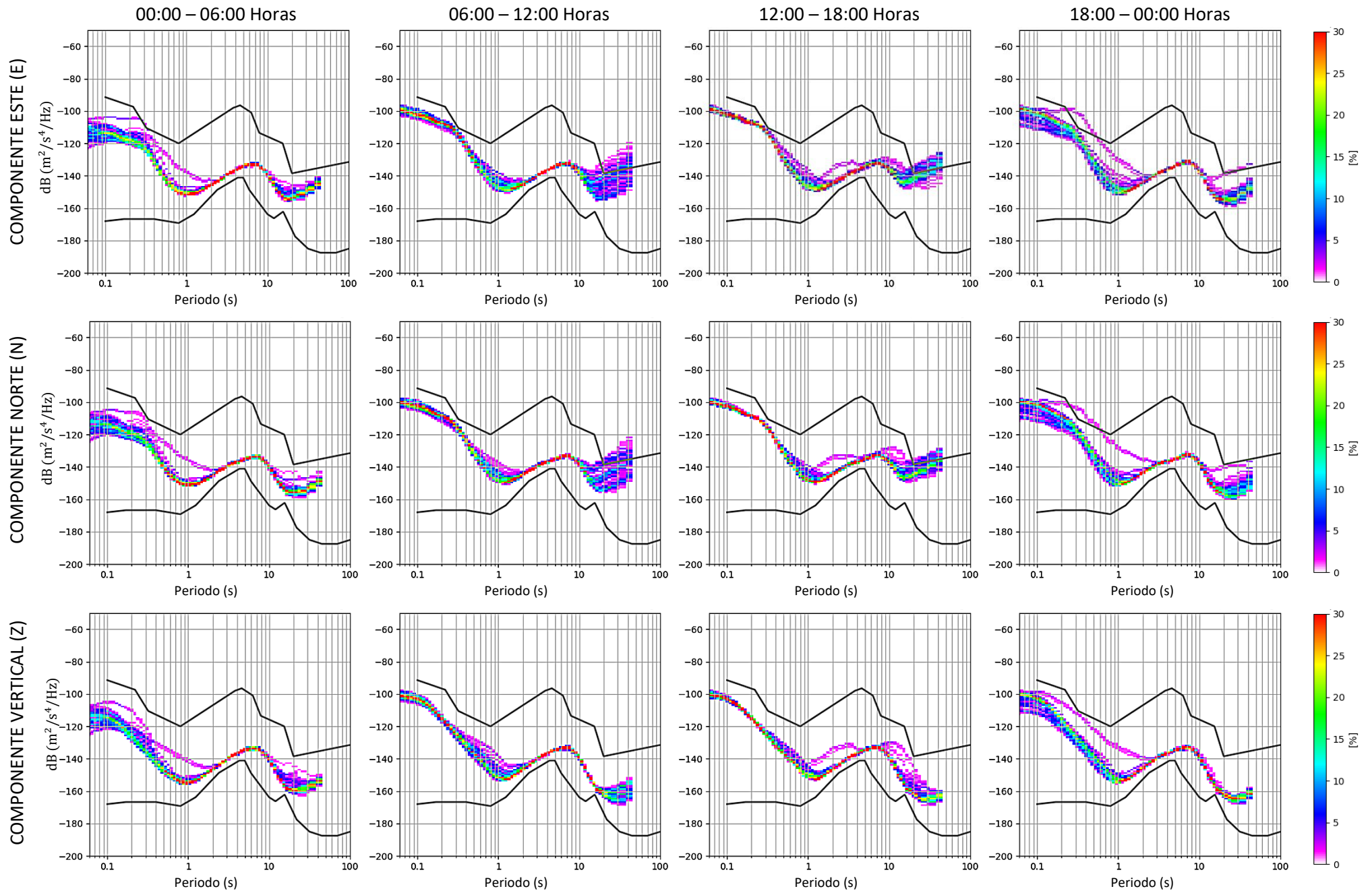




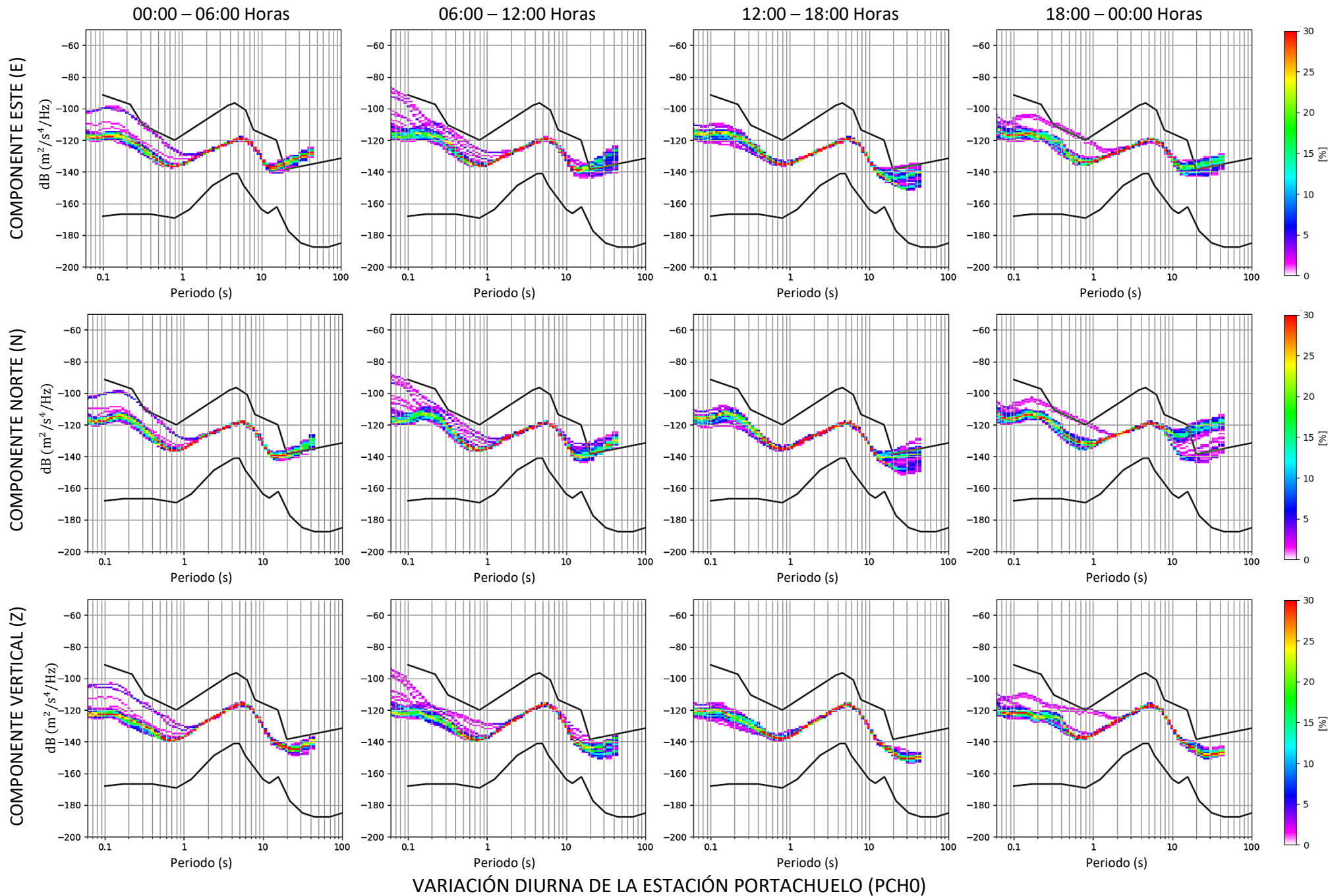






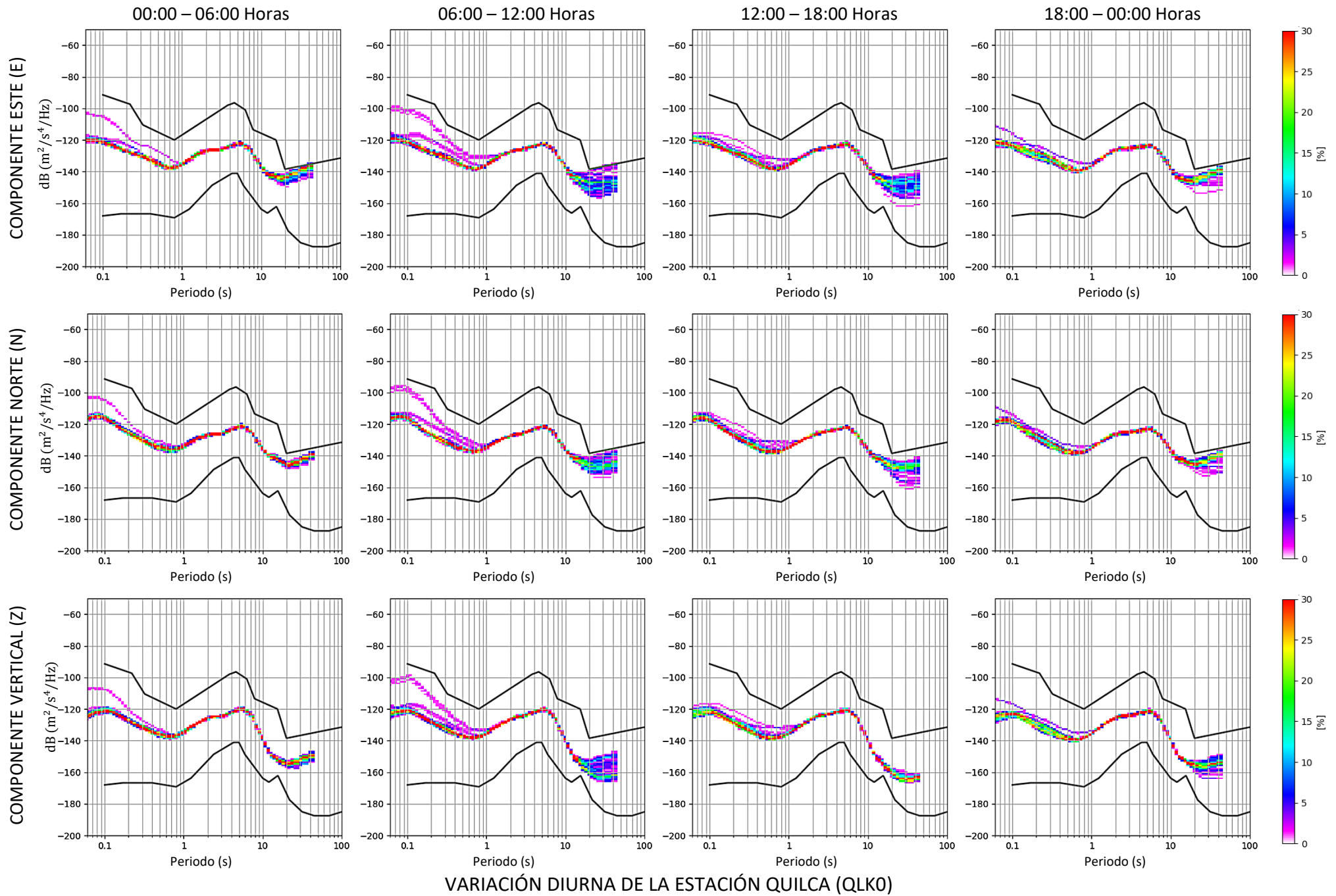


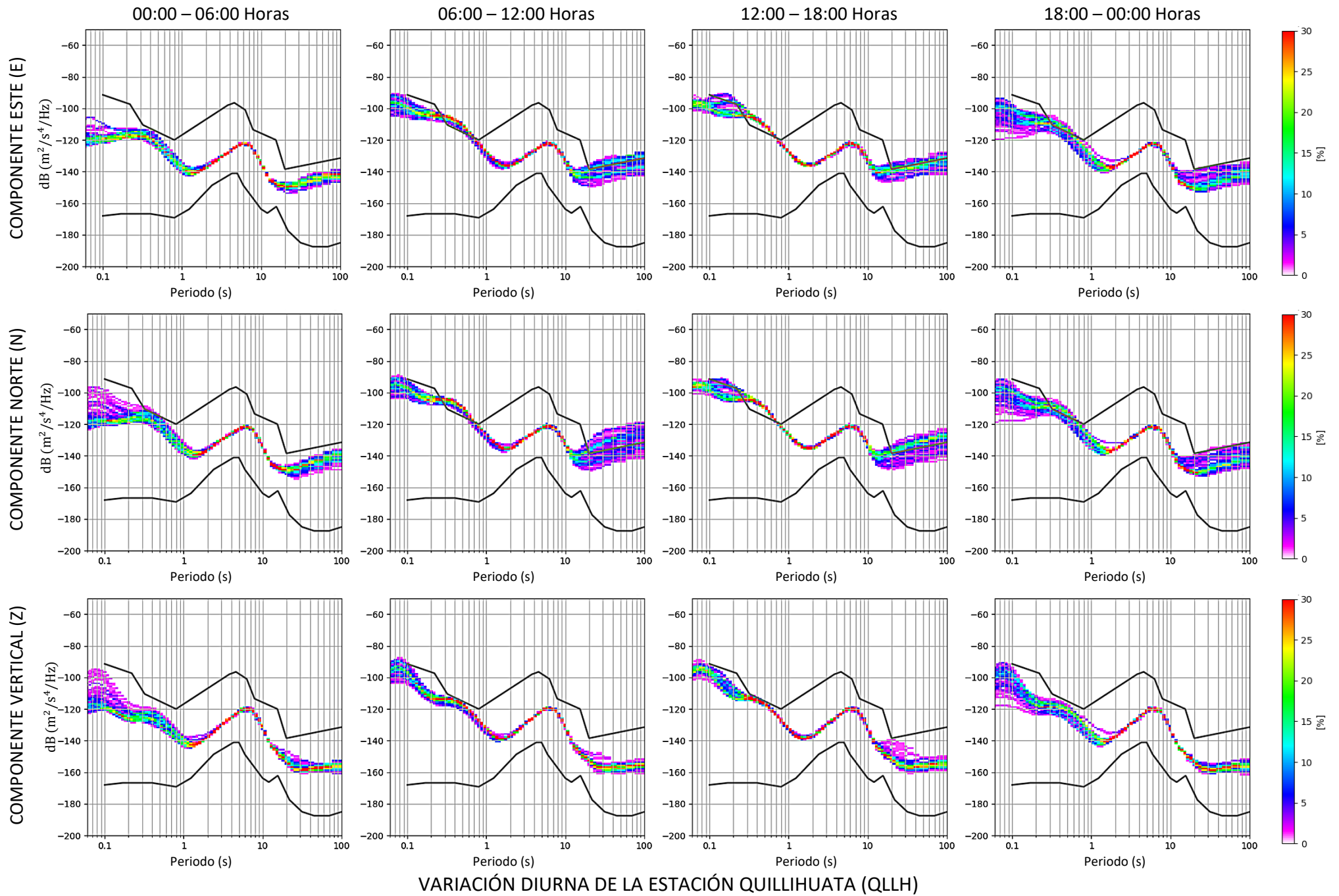
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN SANTA MARÍA DE NIEVA (NIEV)



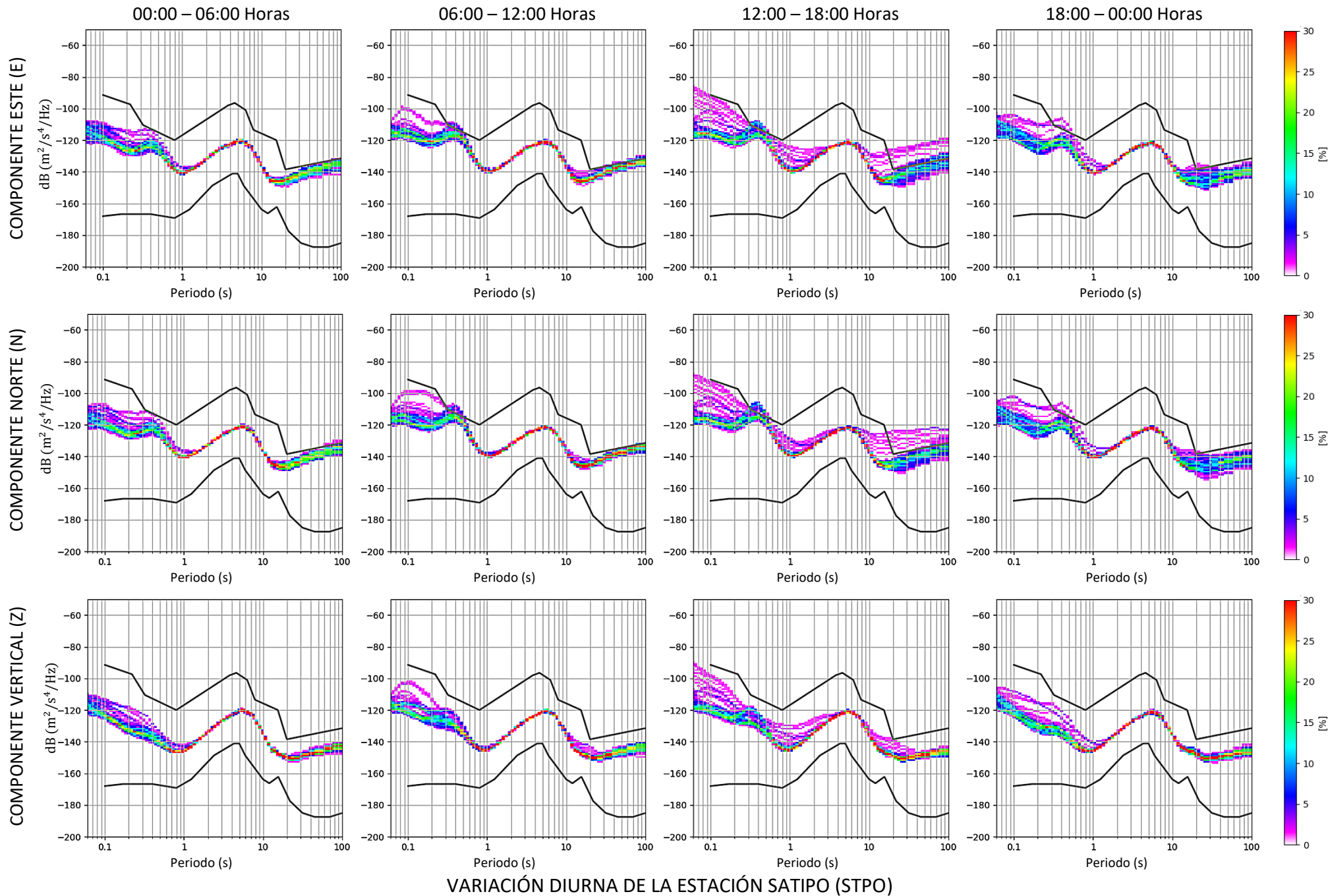


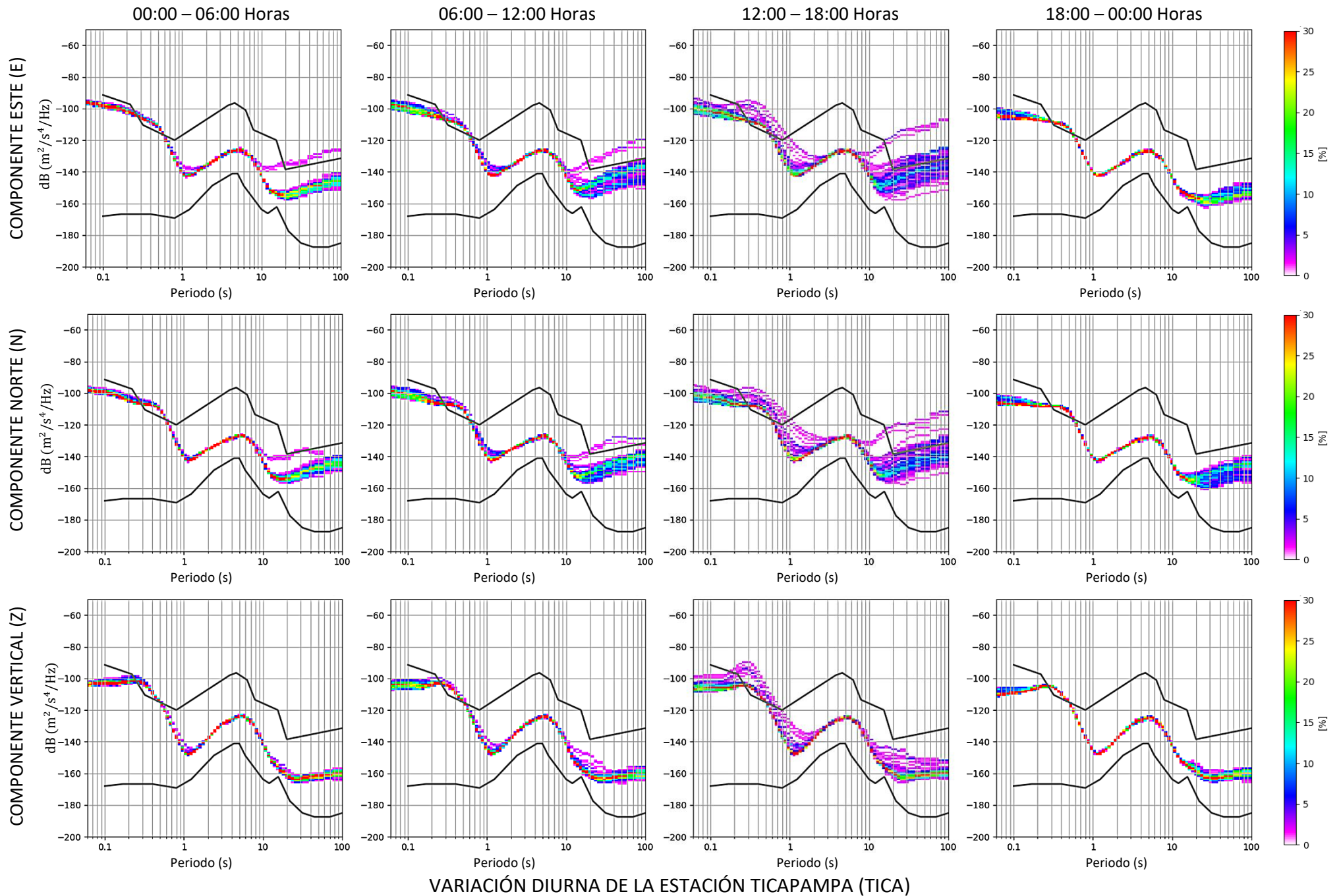


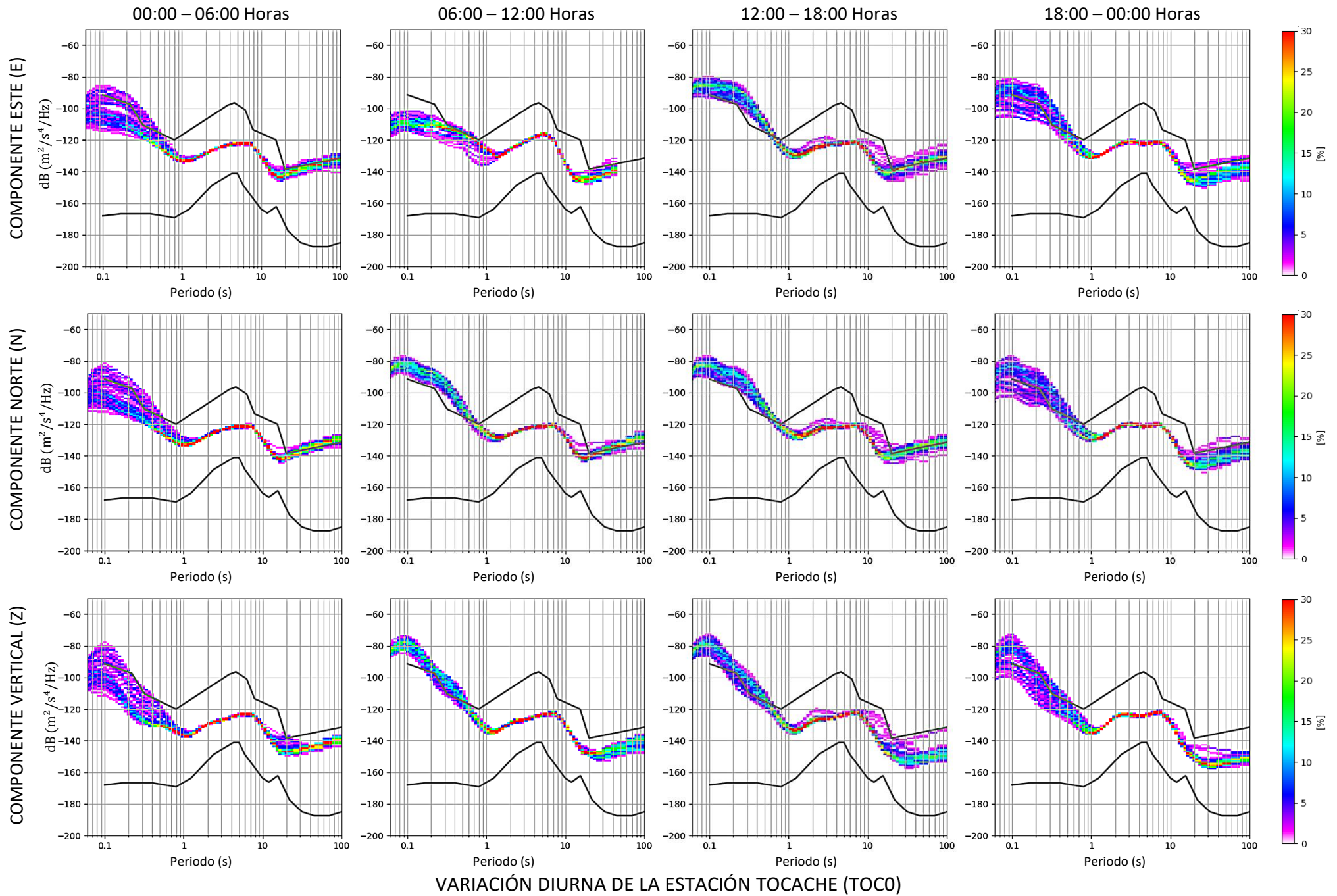


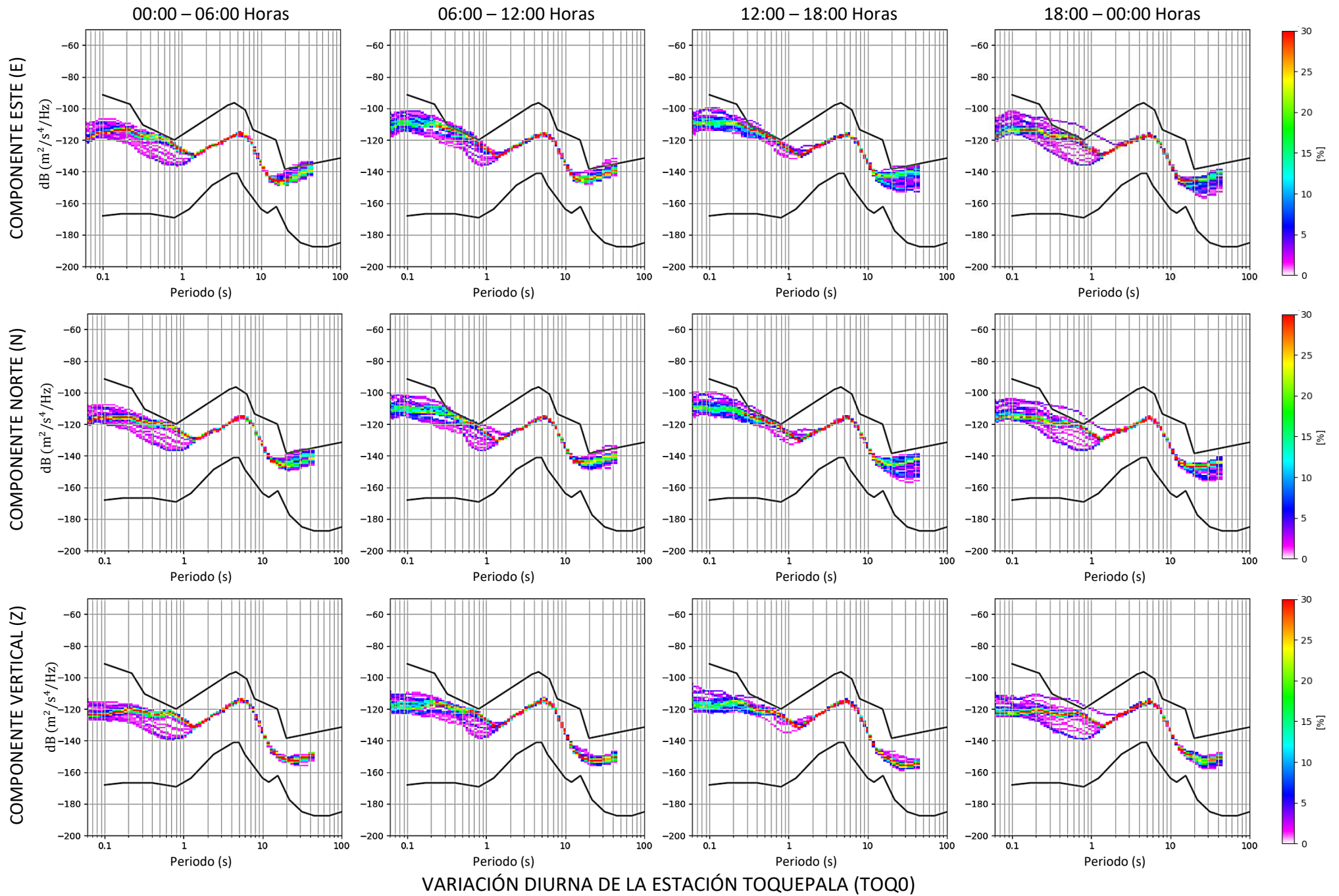


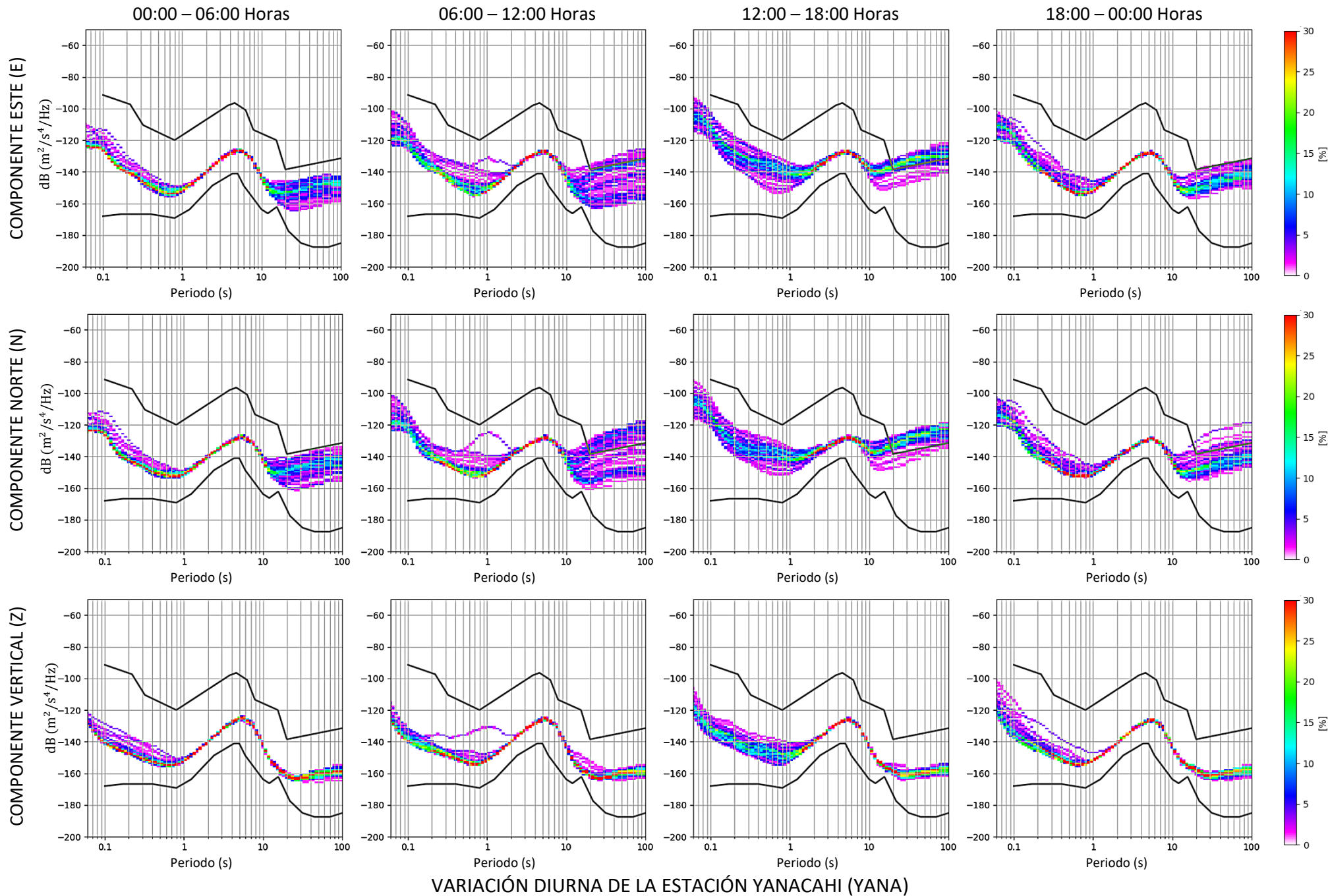




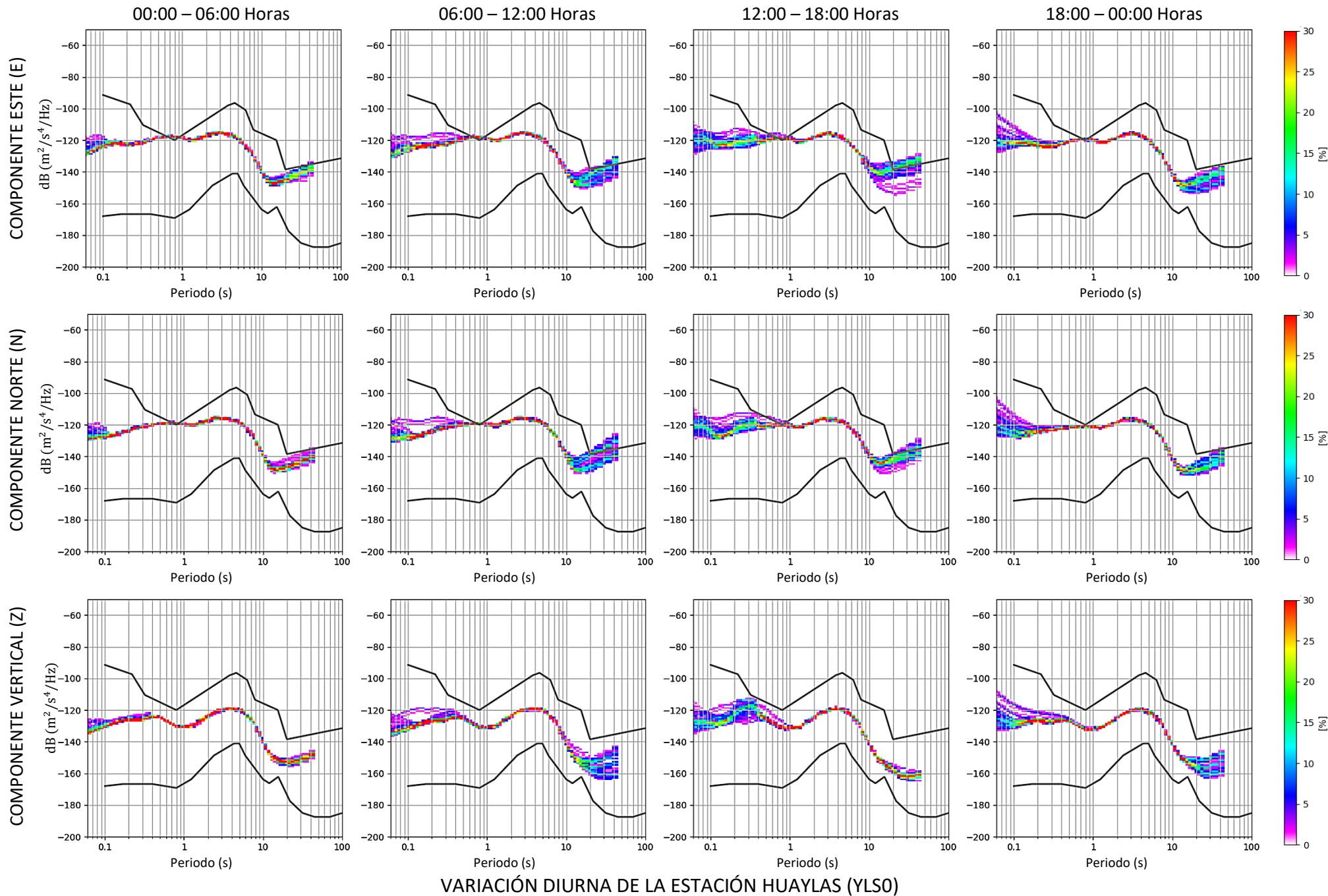


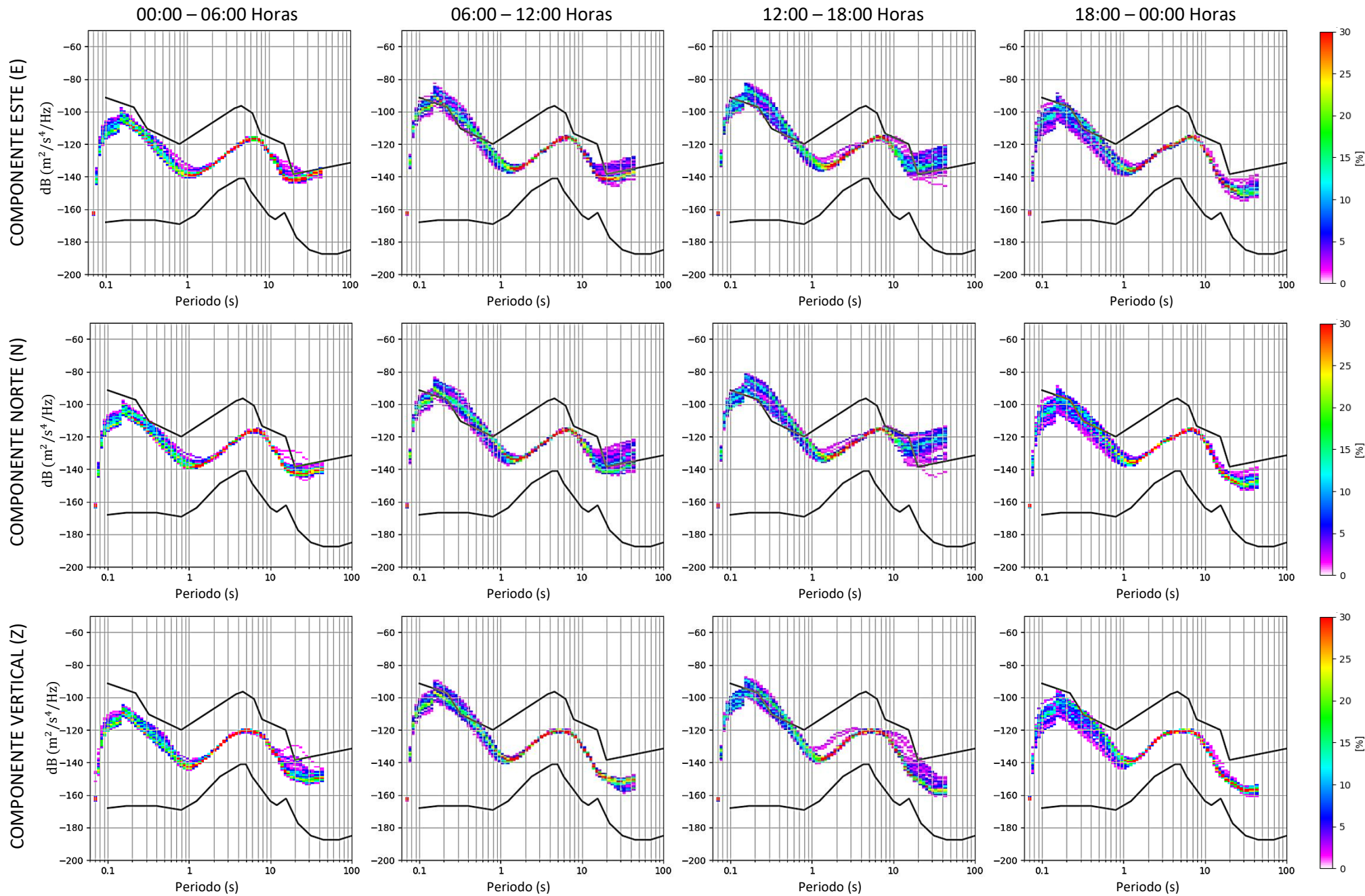




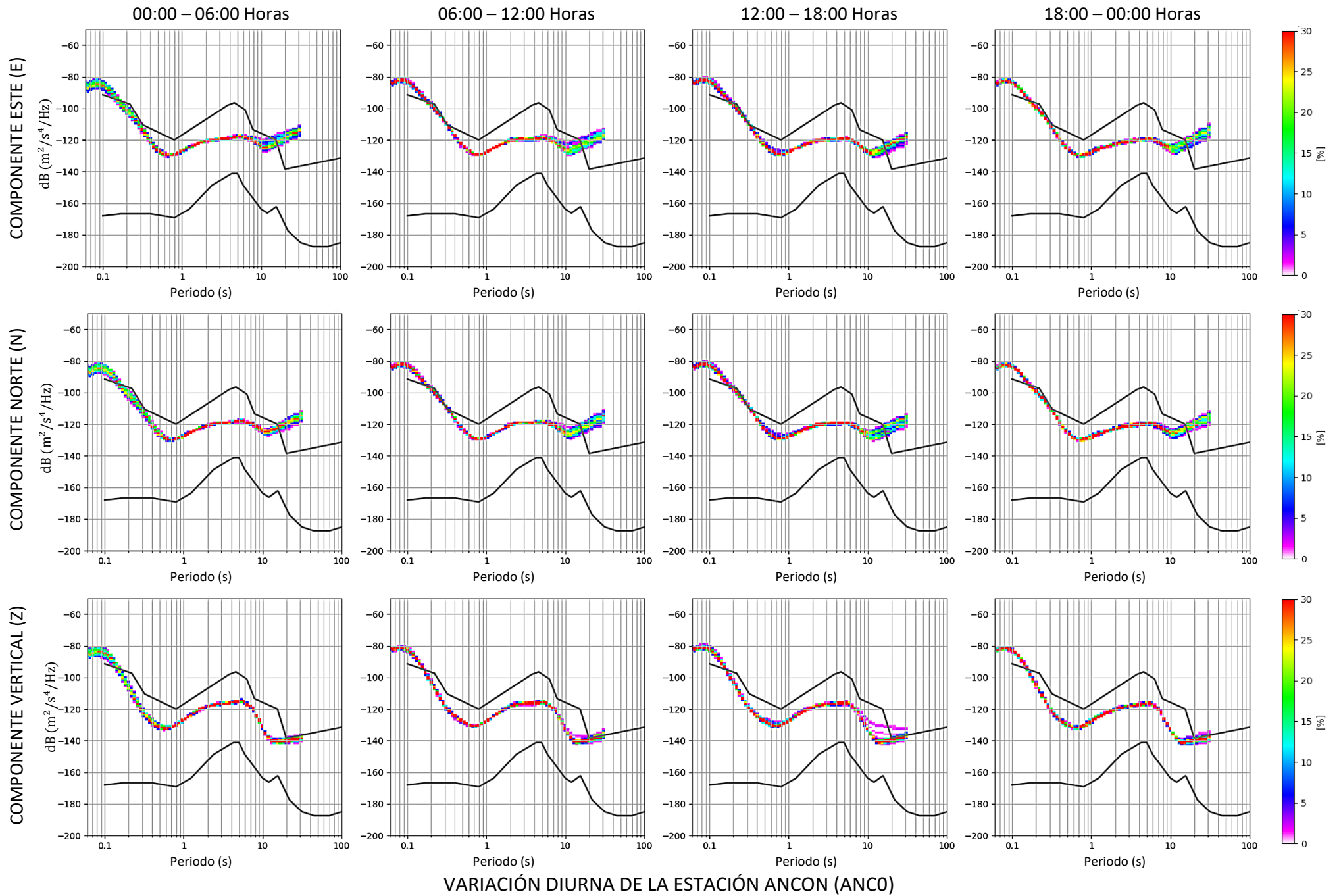




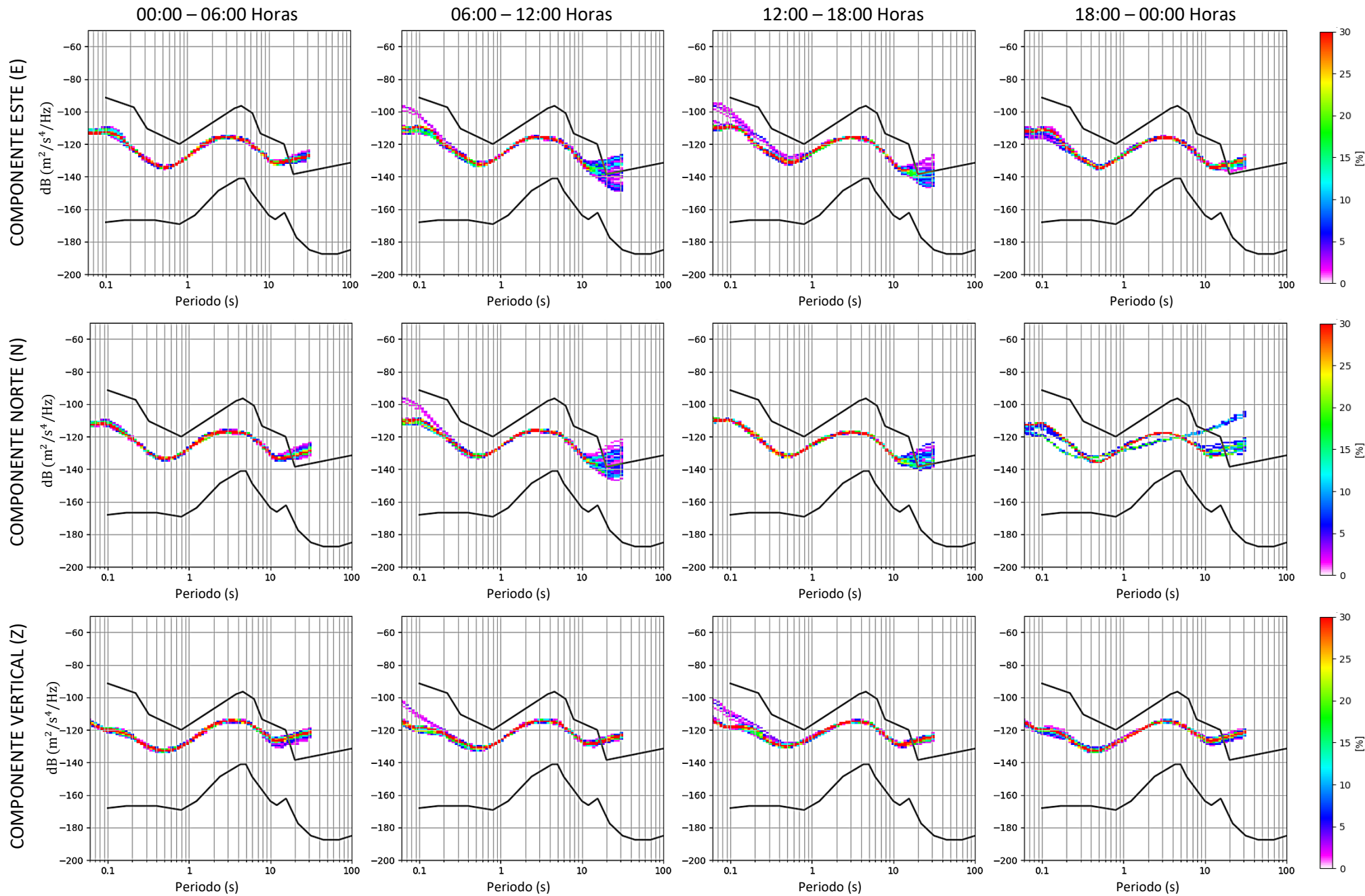




VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN YURIMAGUAS (YRM0)



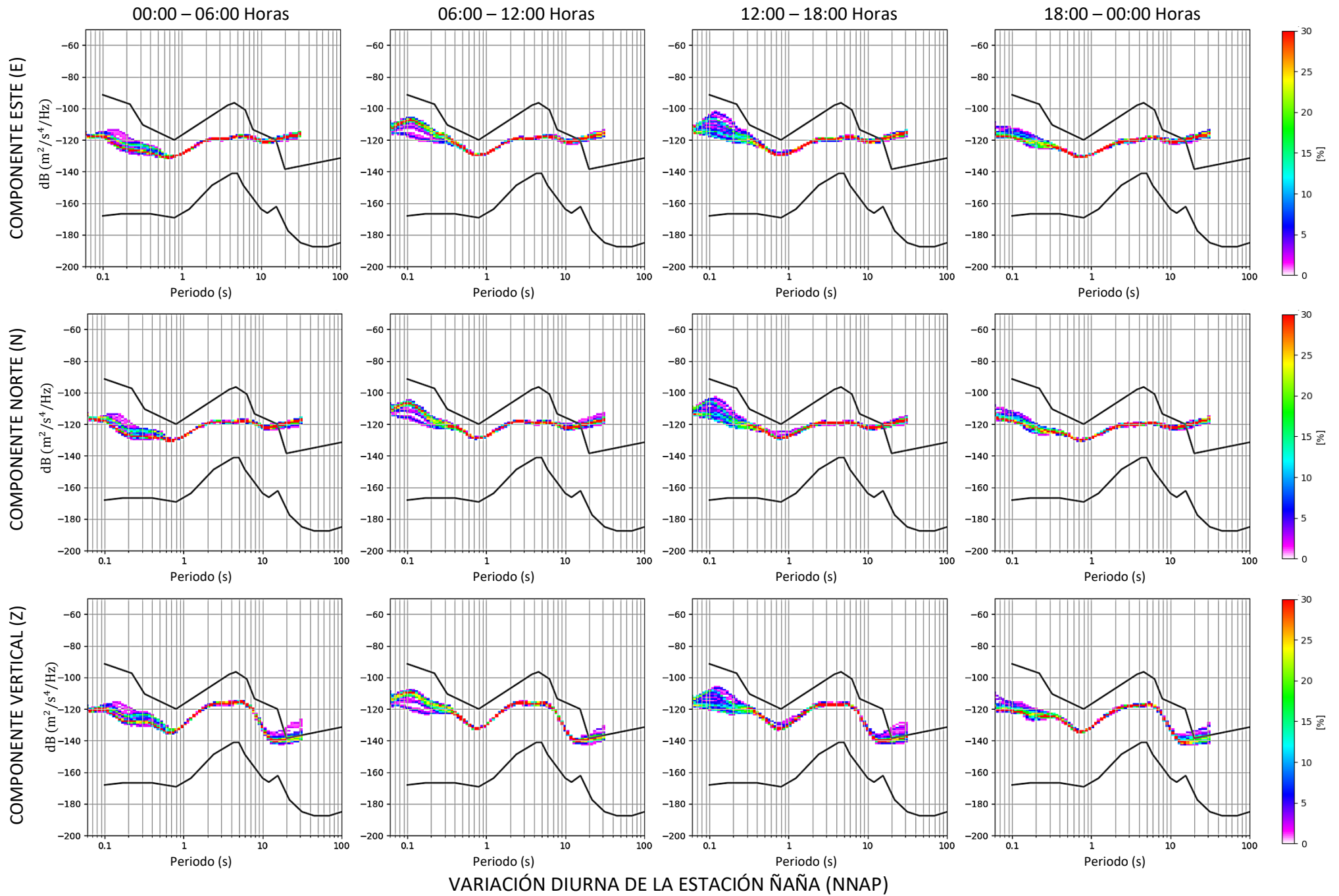


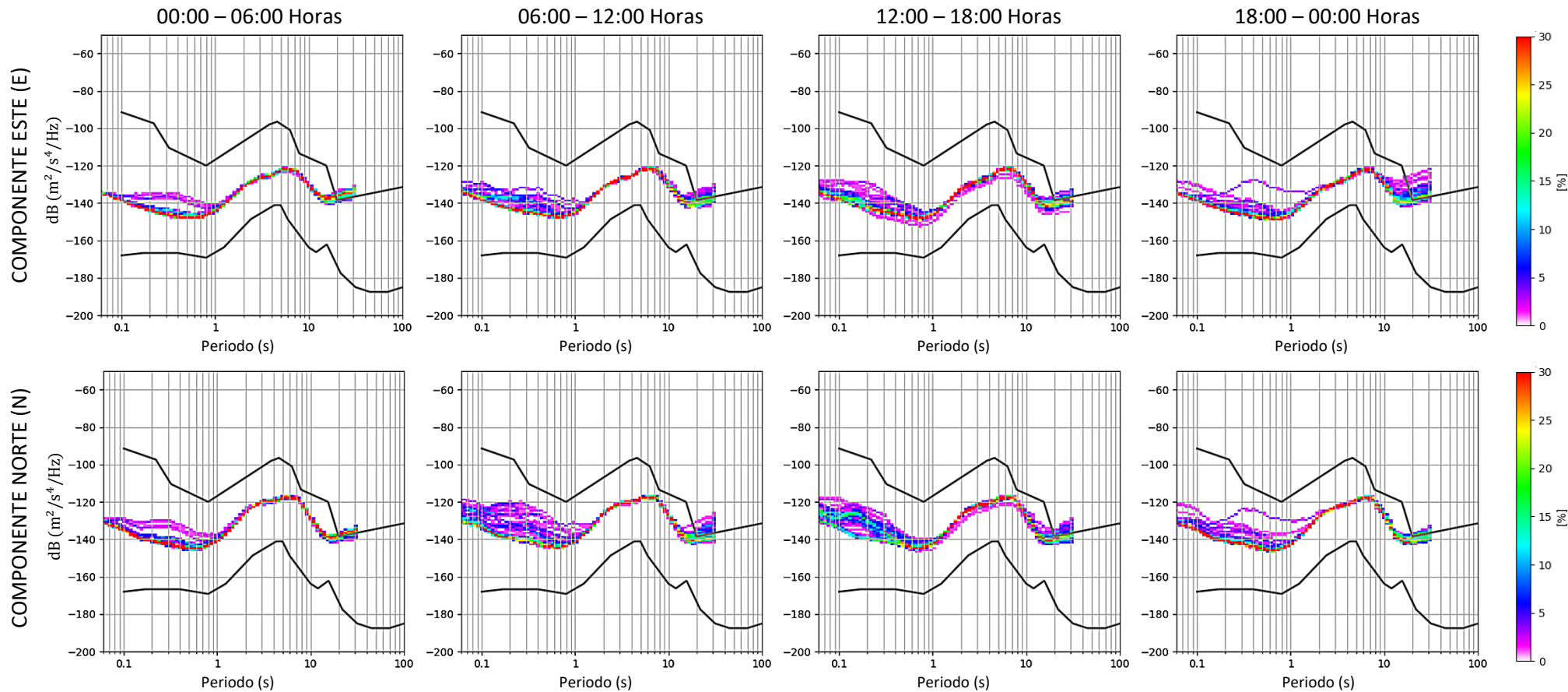


VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN NUEVO CHIMBOTE (CBT2)









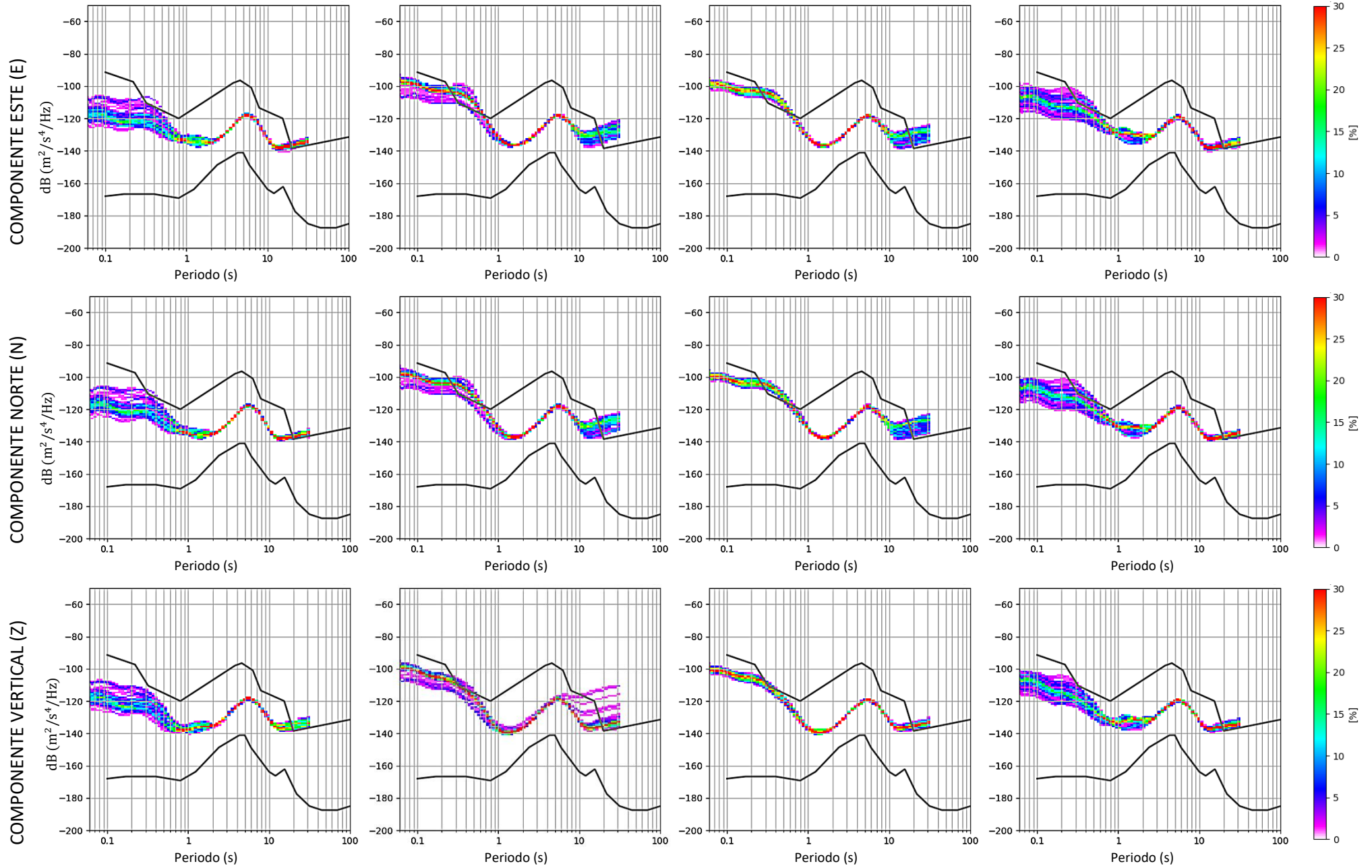
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN UBINAS (UB10)

00:00 – 06:00 Horas

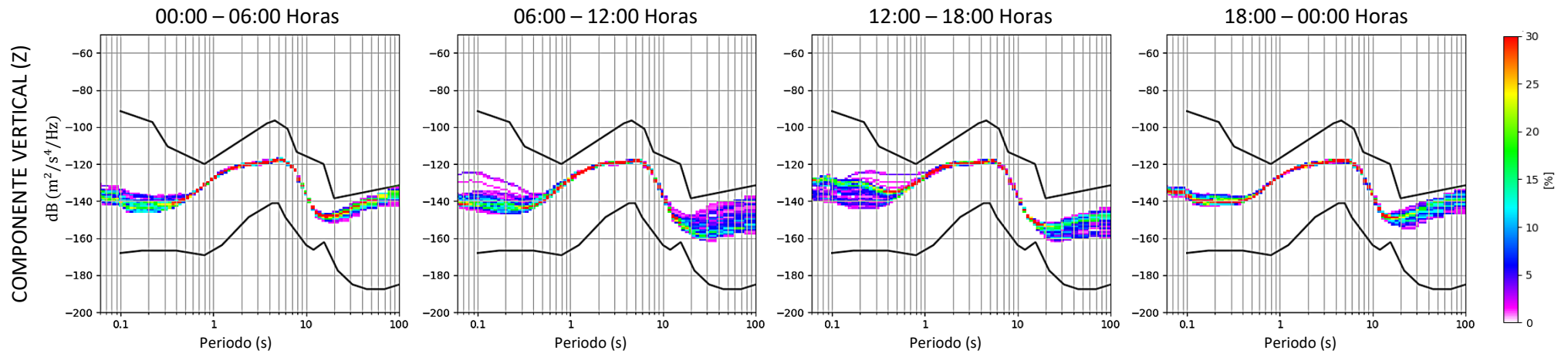
06:00 – 12:00 Horas

12:00 – 18:00 Horas

18:00 – 00:00 Horas



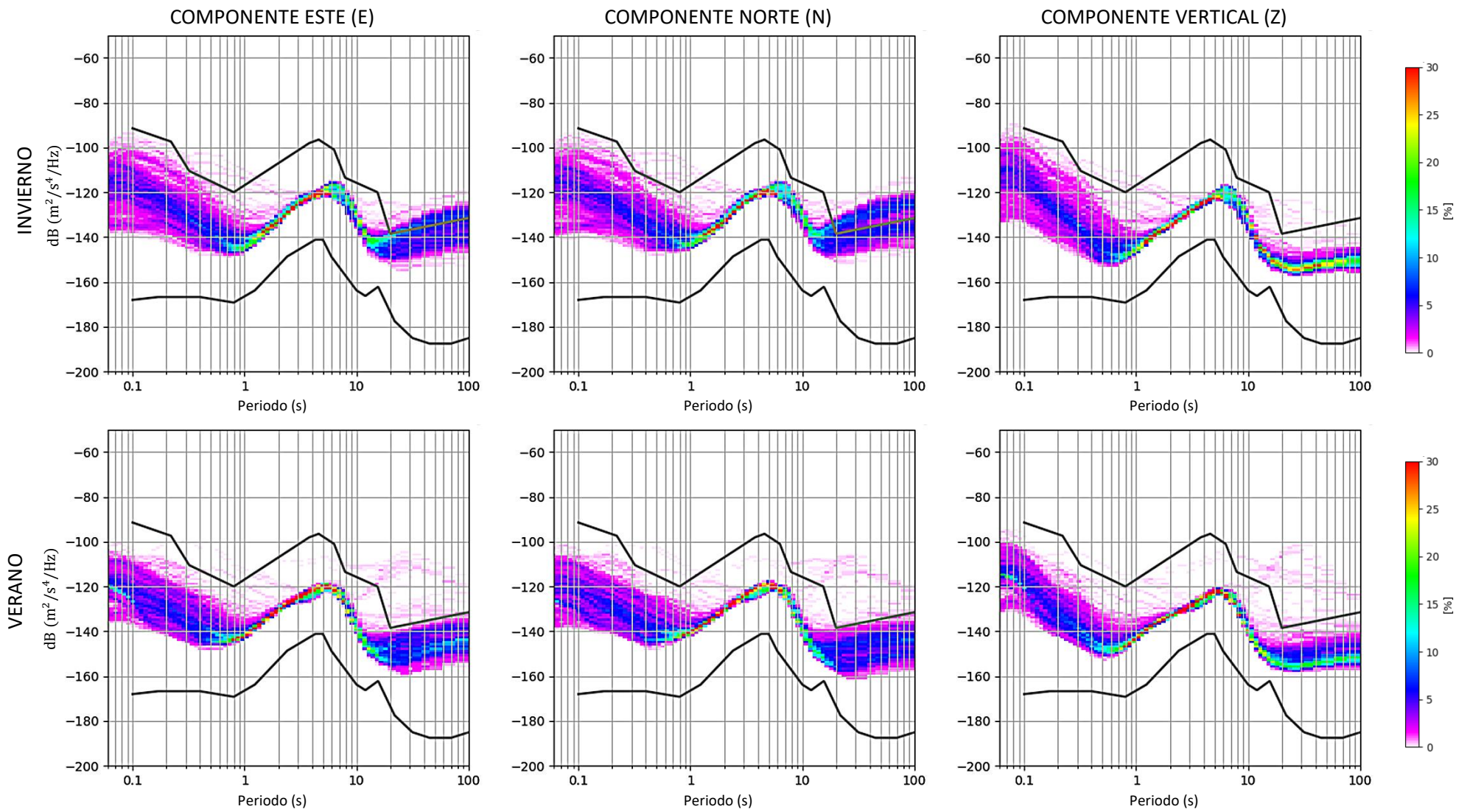
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN UNIV. DEL ALTIPLANO (UNAP)



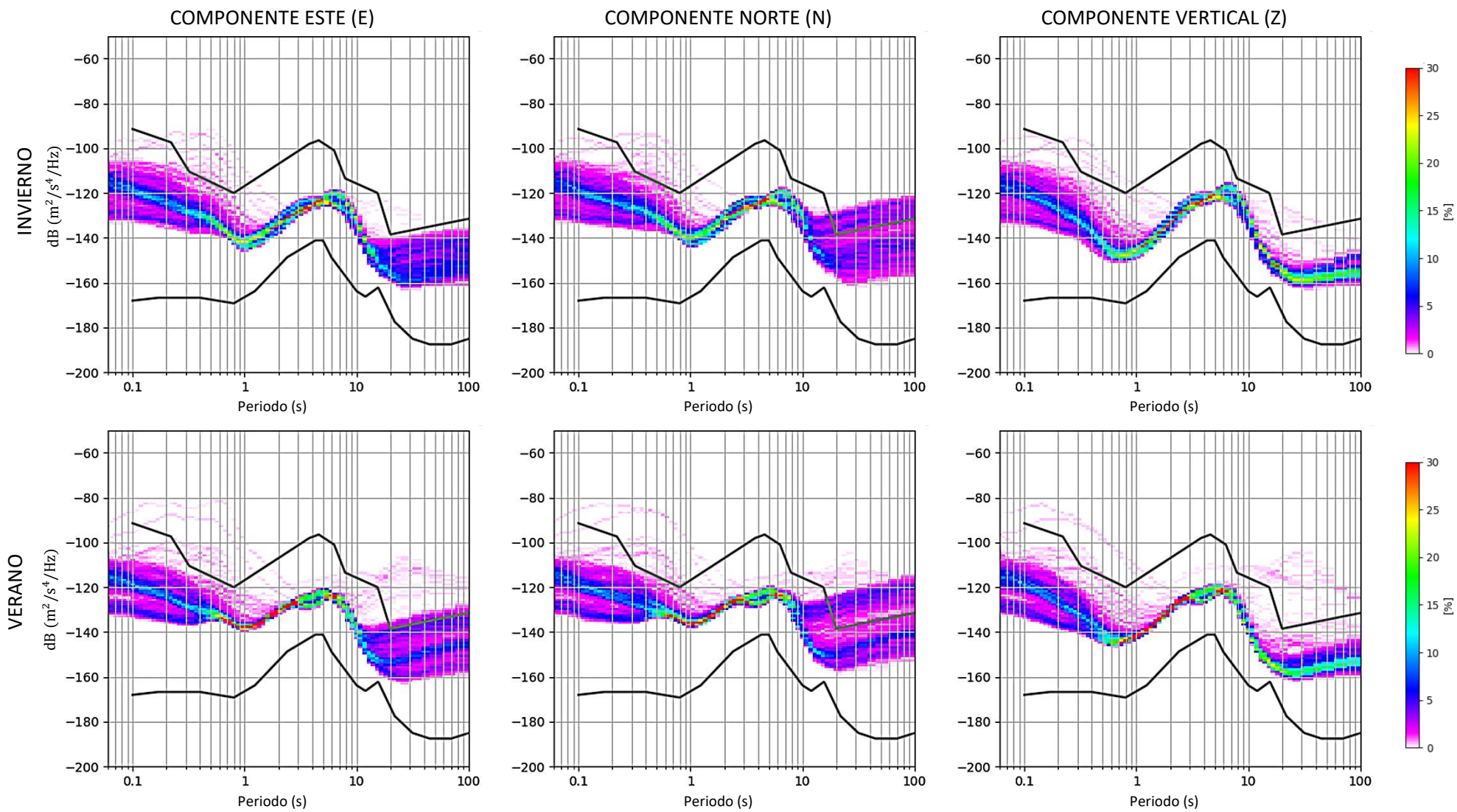
VARIACIÓN DIURNA DE LA ESTACIÓN PARACAS (PARO)

# **ANEXO B**

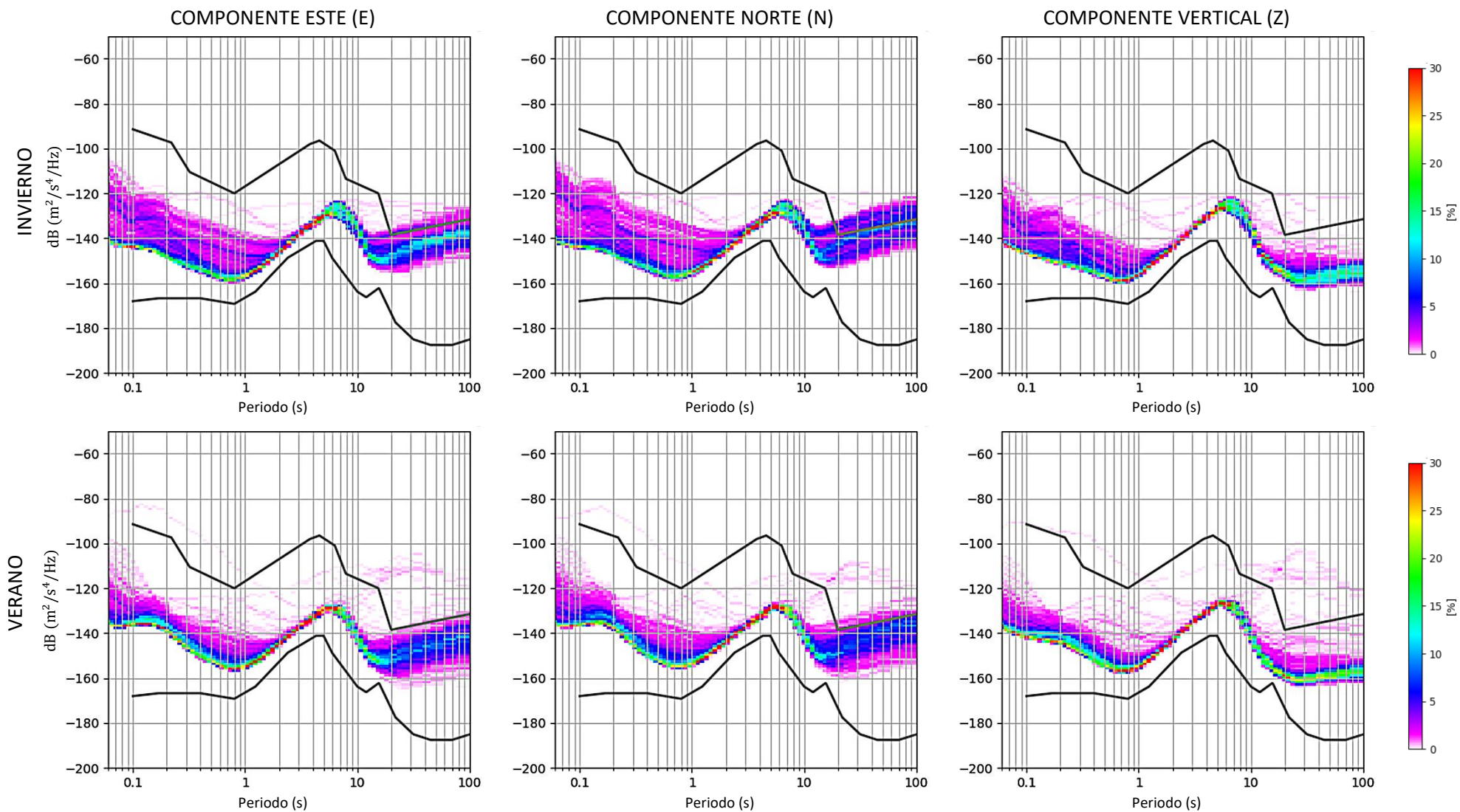
Variación Estacional de las estaciones de la  
Red Sísmica Nacional del Perú.



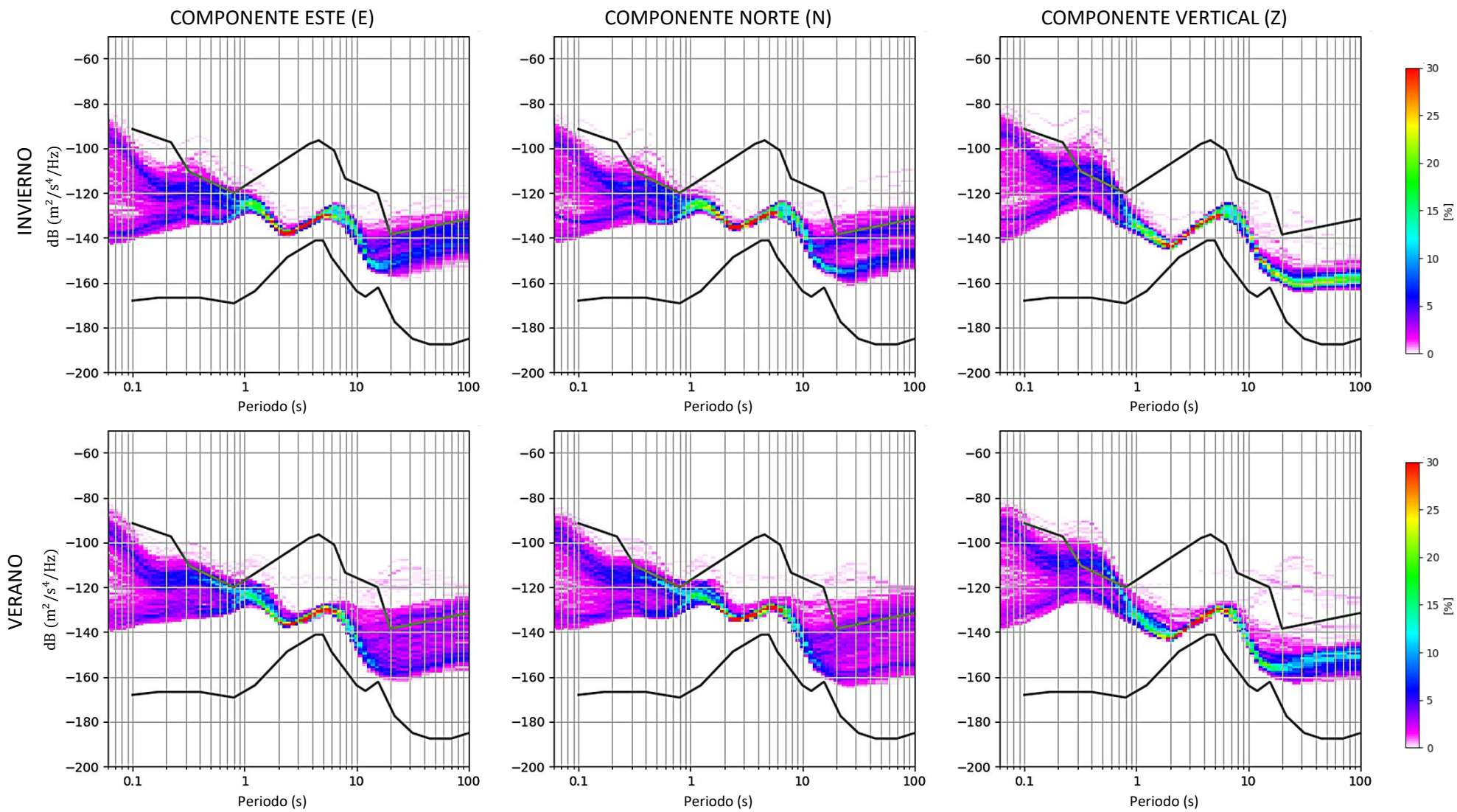
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA ALTO PERÚ (ALTO)



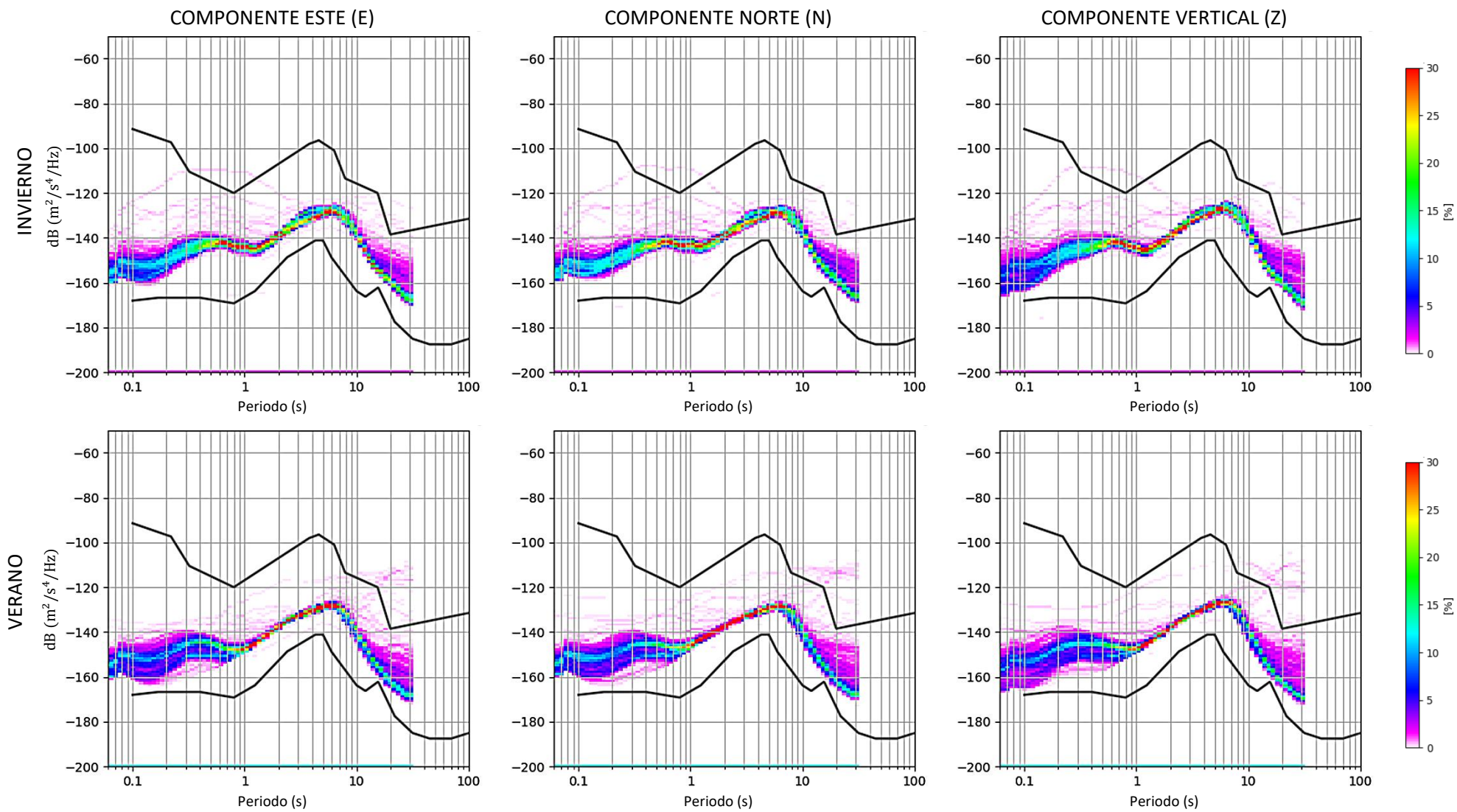
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA ANDARAY (ANDY)



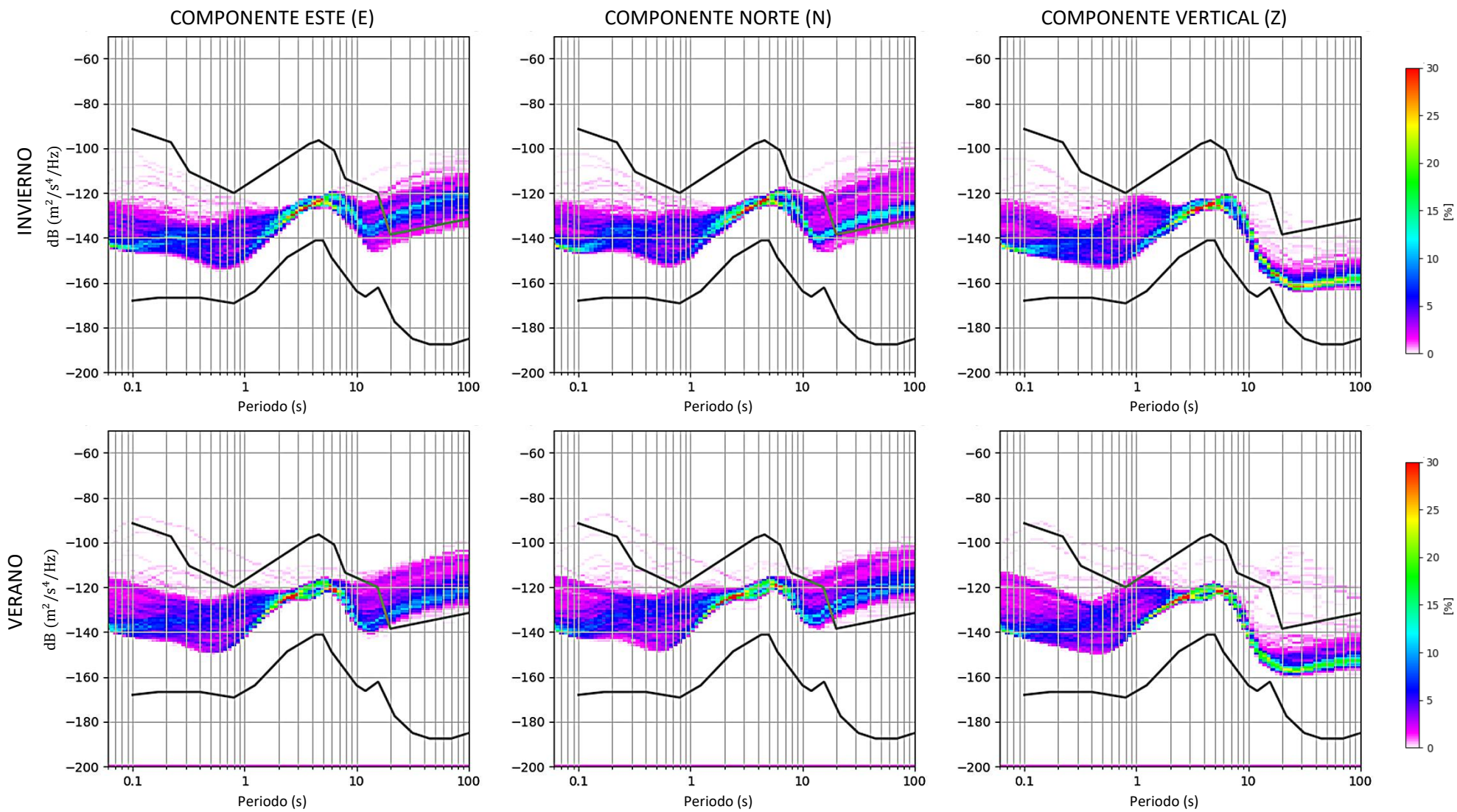
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA ABRA PATAHUASI (APAT)



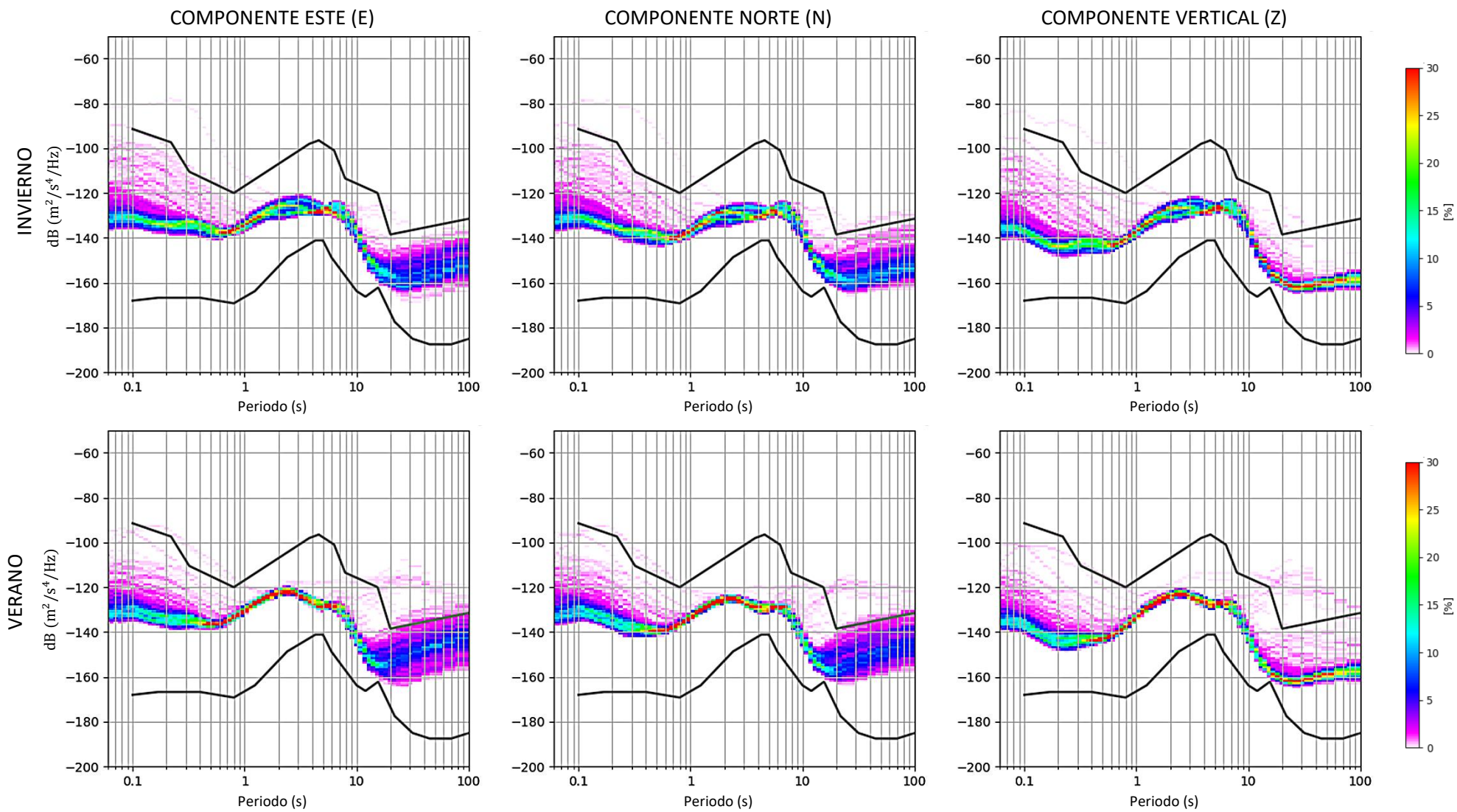
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA AYRAMPUNI (AYRA)



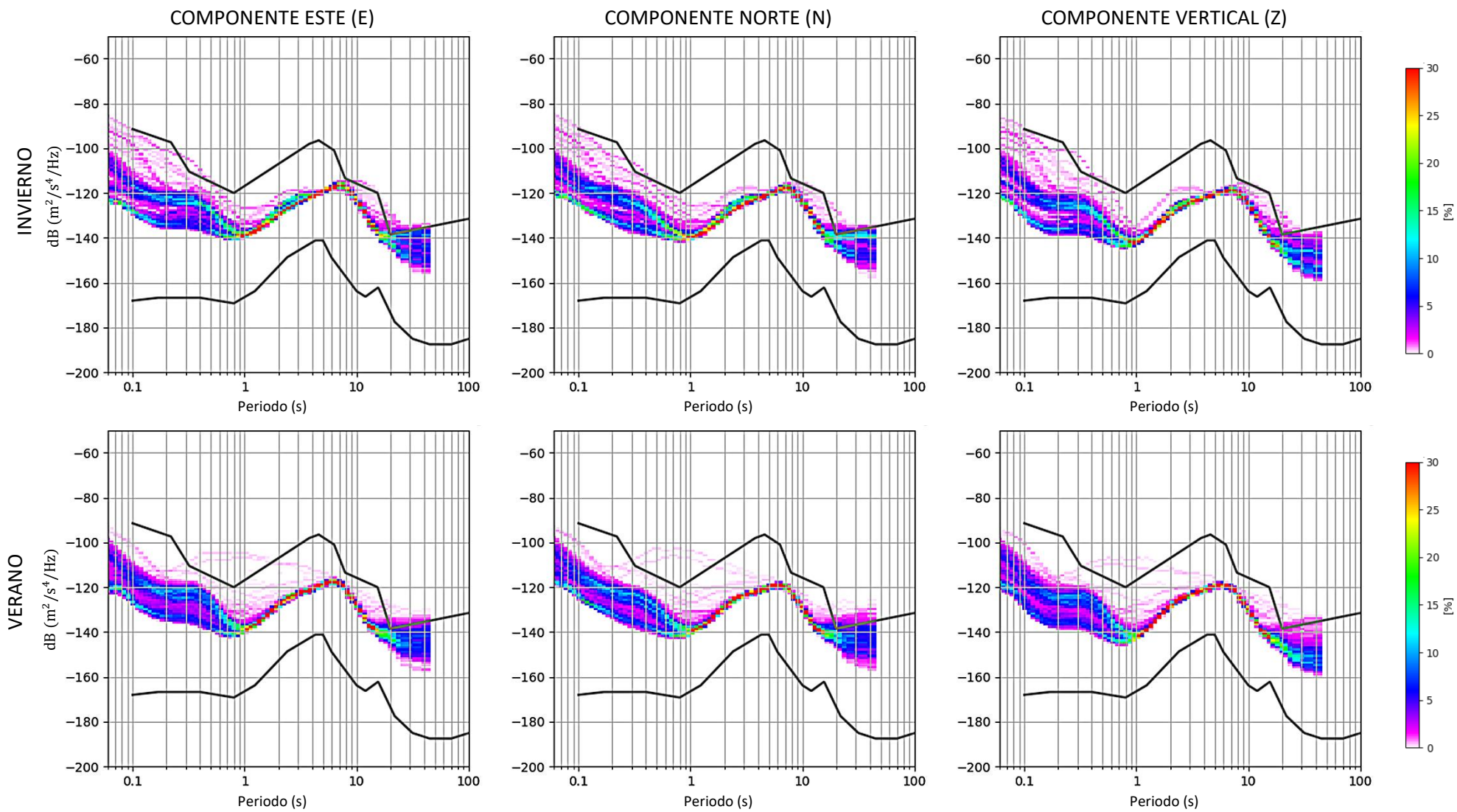
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA ATAHUALPA (ATHO)



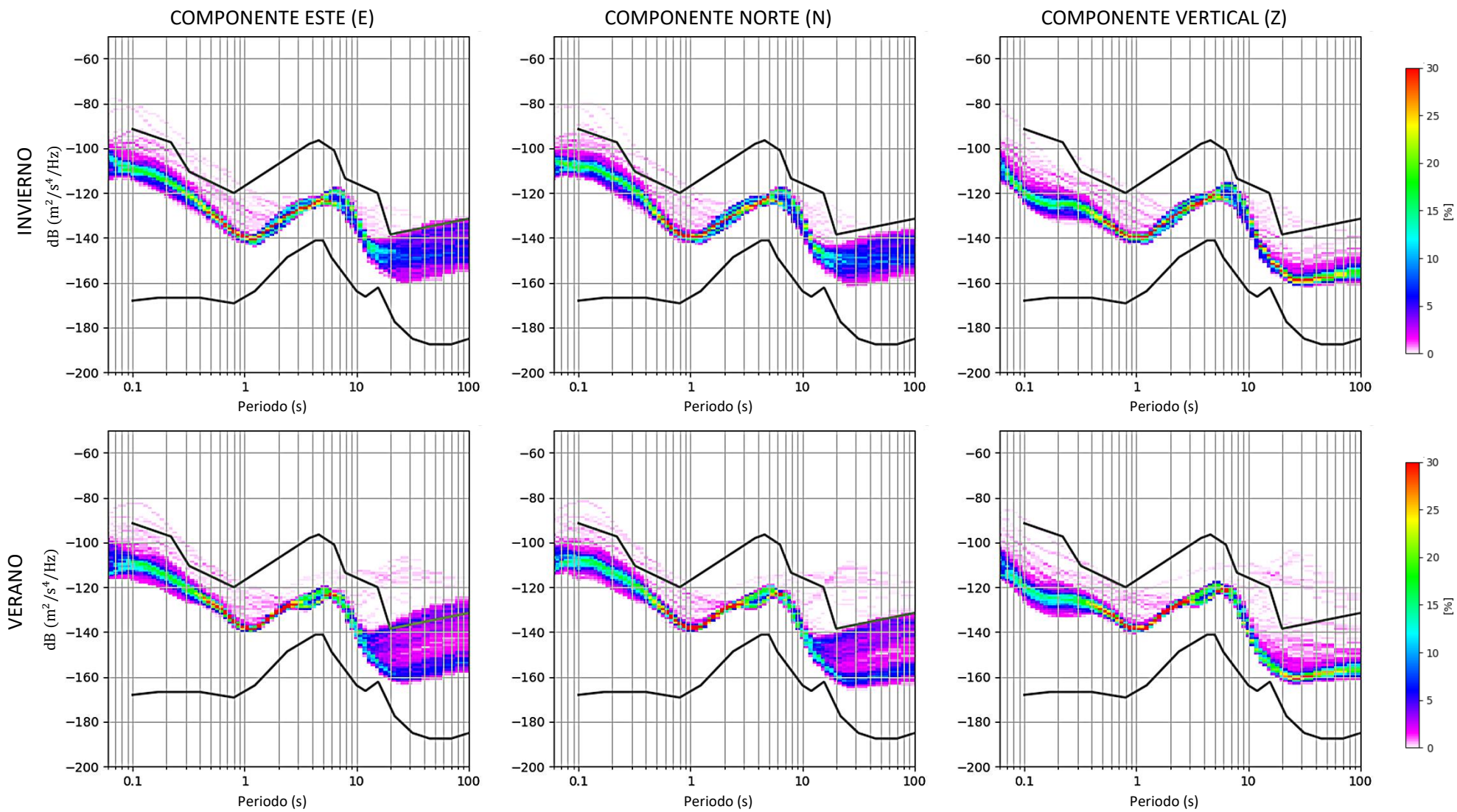
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CAJAMARCANA (CAJO)



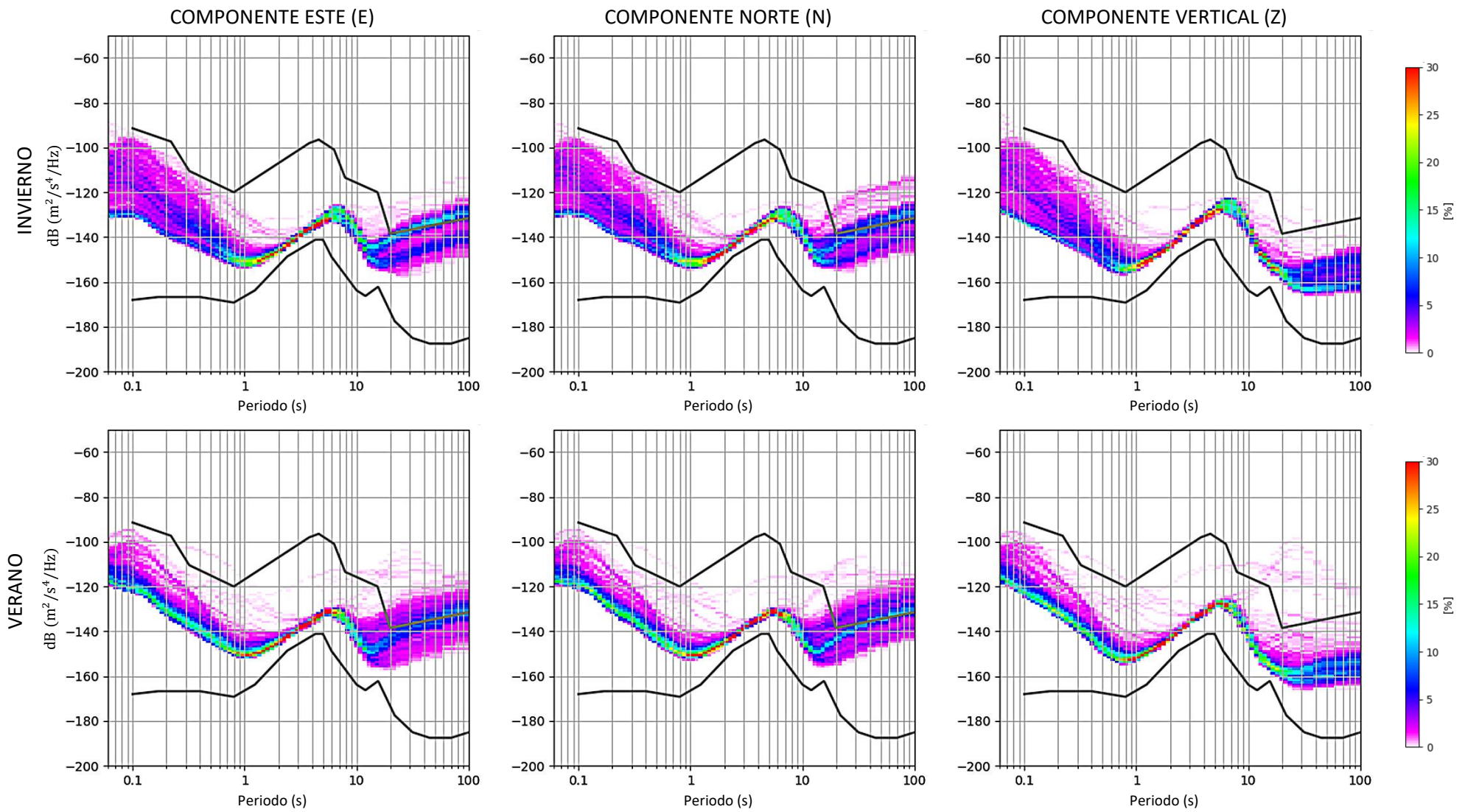
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CERRO AZUL (CAZU)



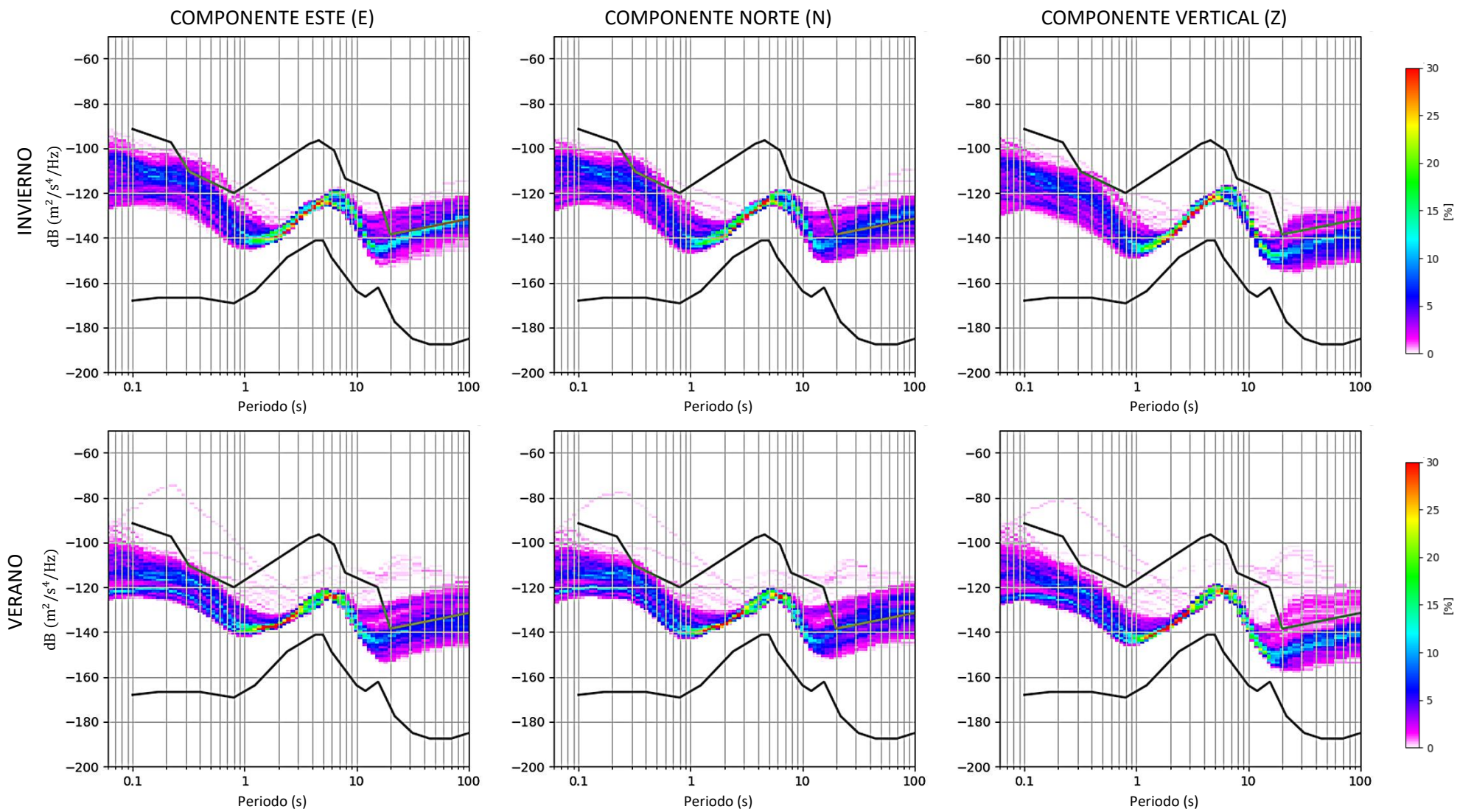
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA BELLAVISTA (BVTA)



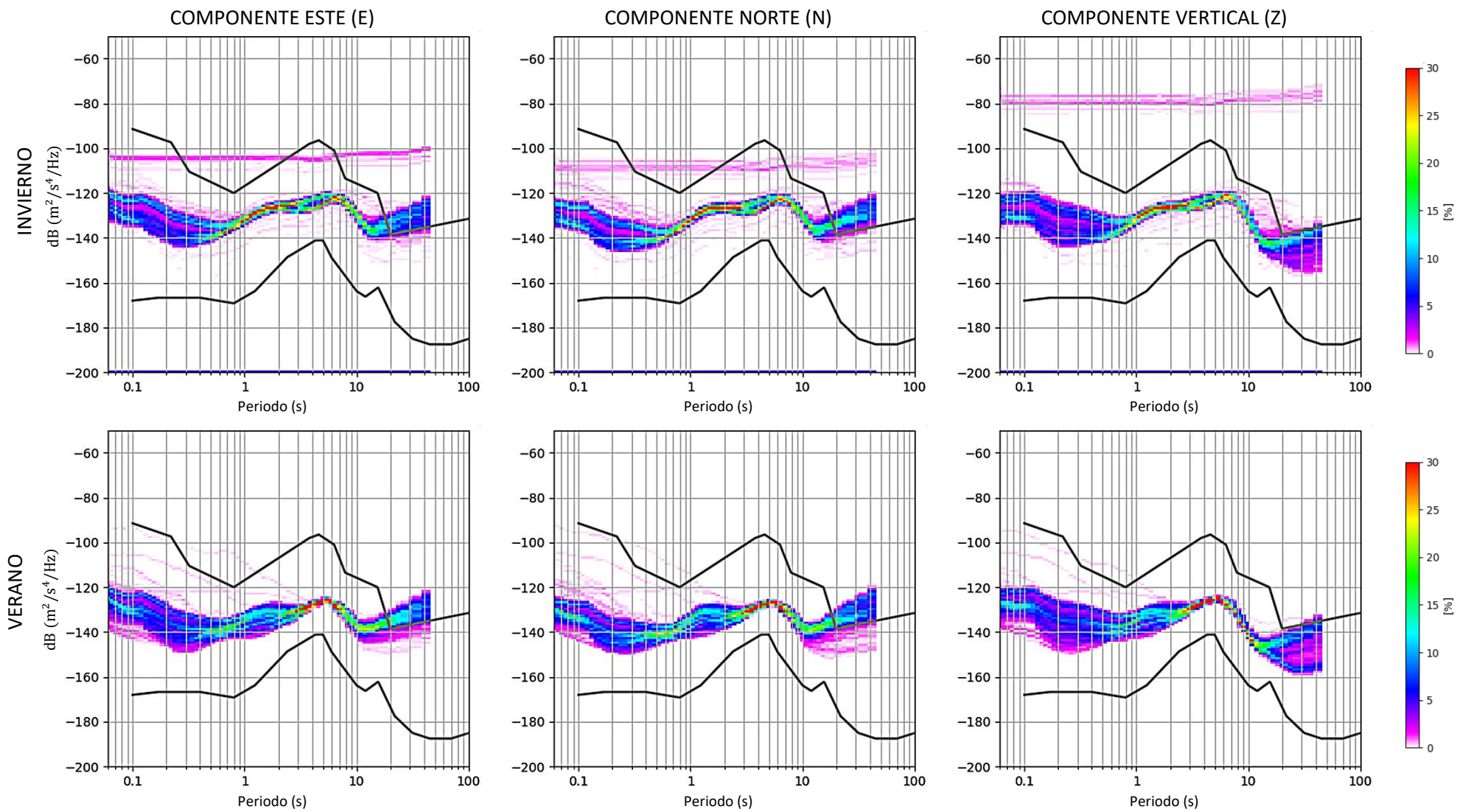
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CERRO GLORIA (CGLO)



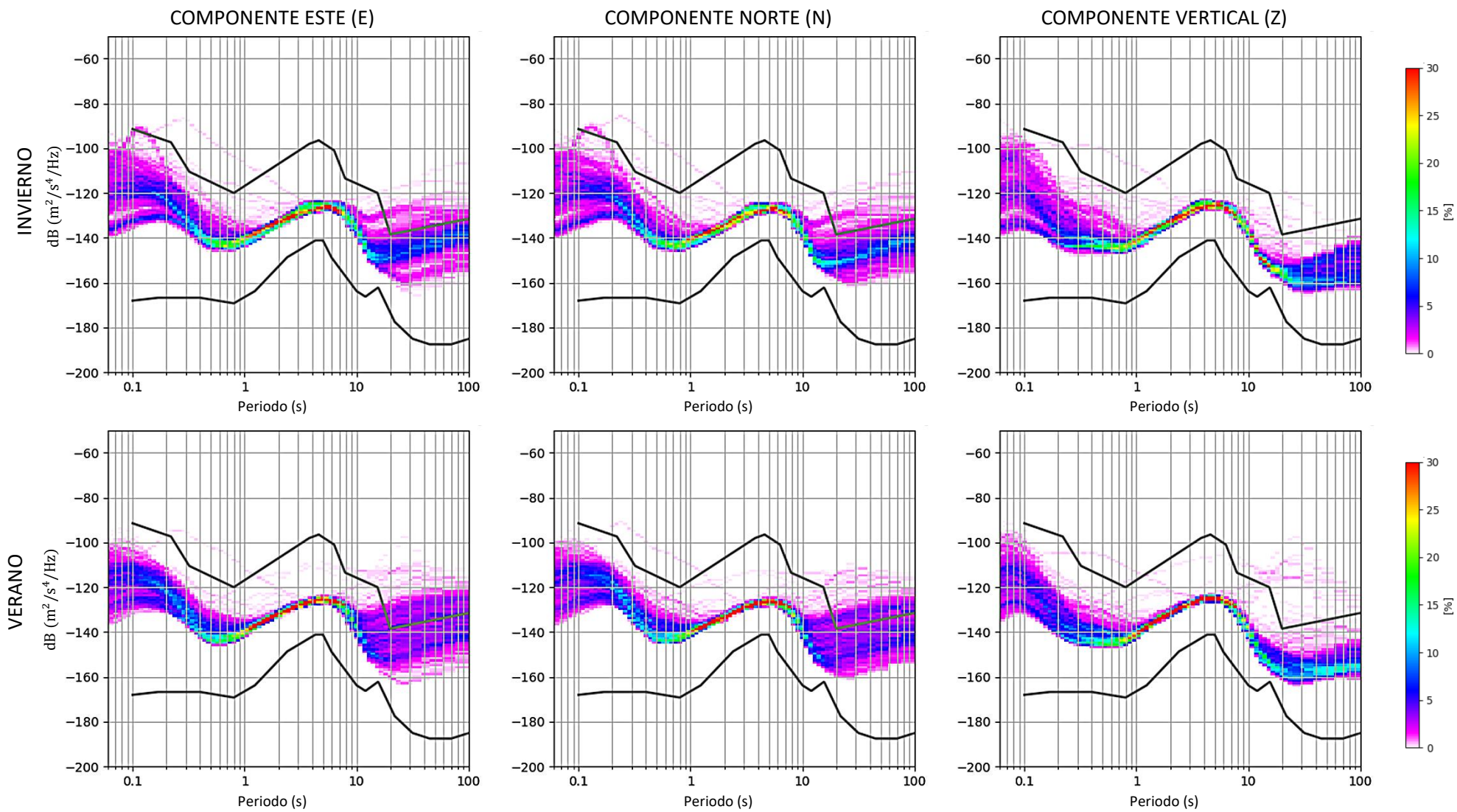
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CHAUPI AYLLU (CHAY)



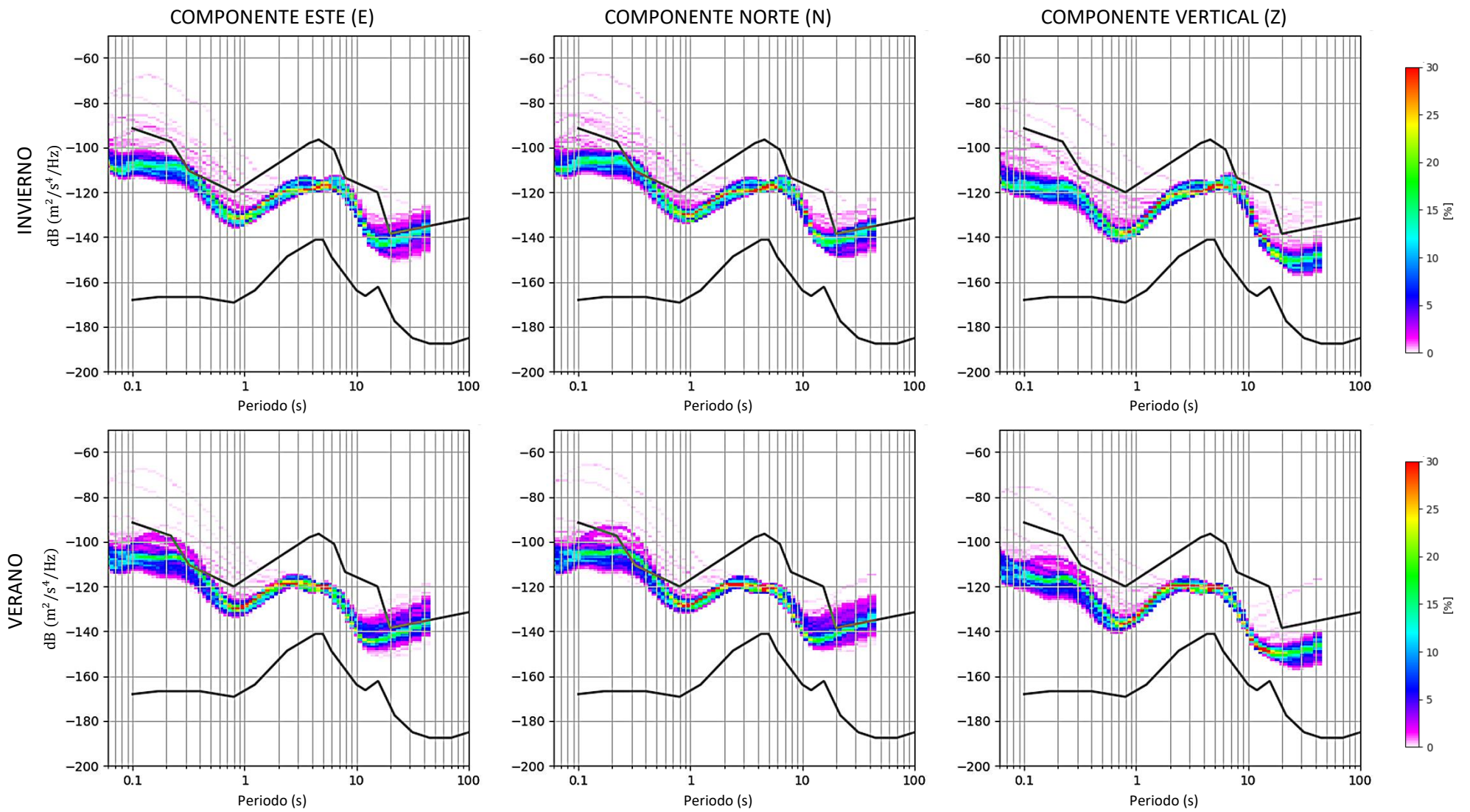
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CHVAY (CHVY)



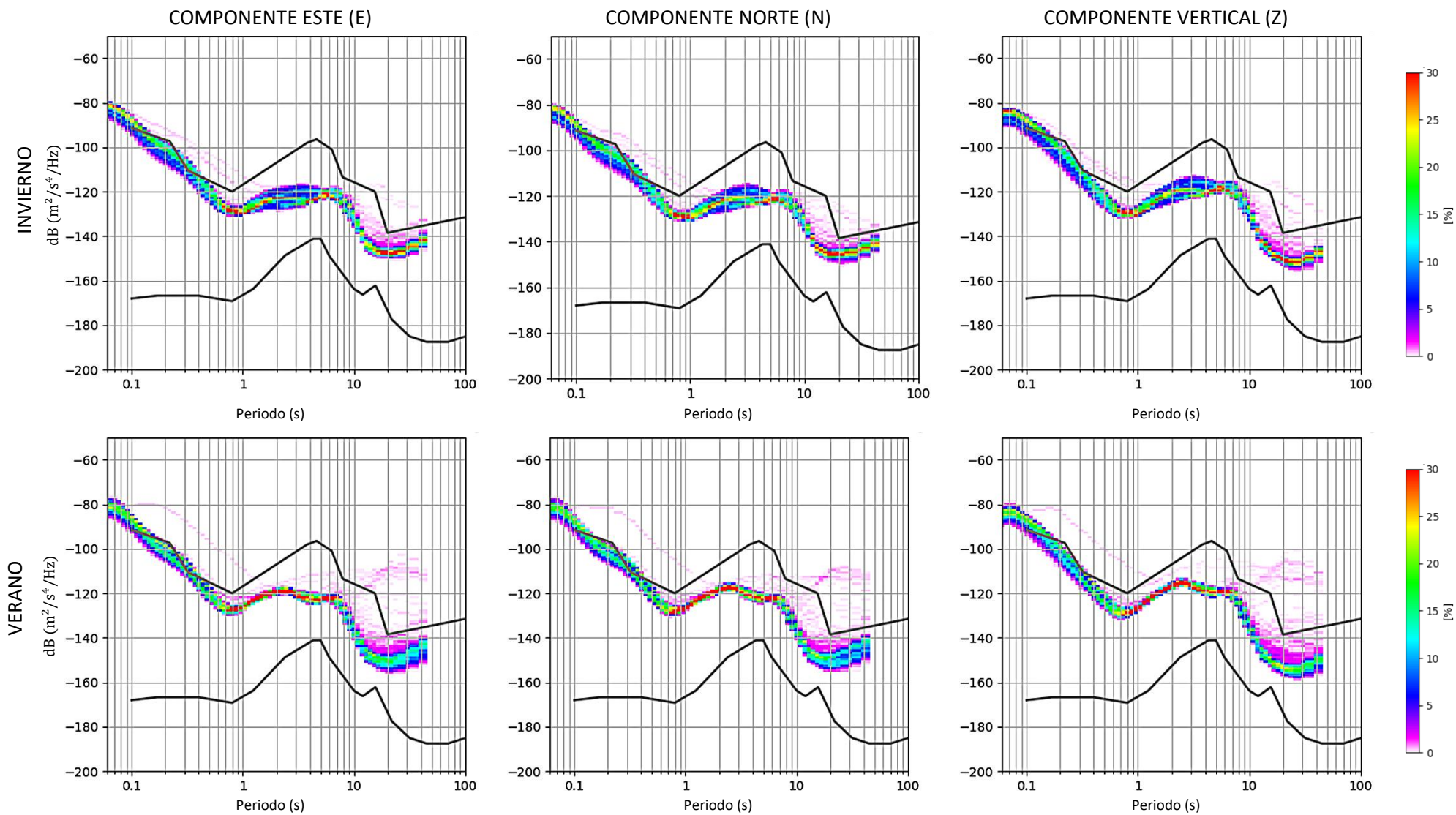
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA CHOCÁN (CHO0)



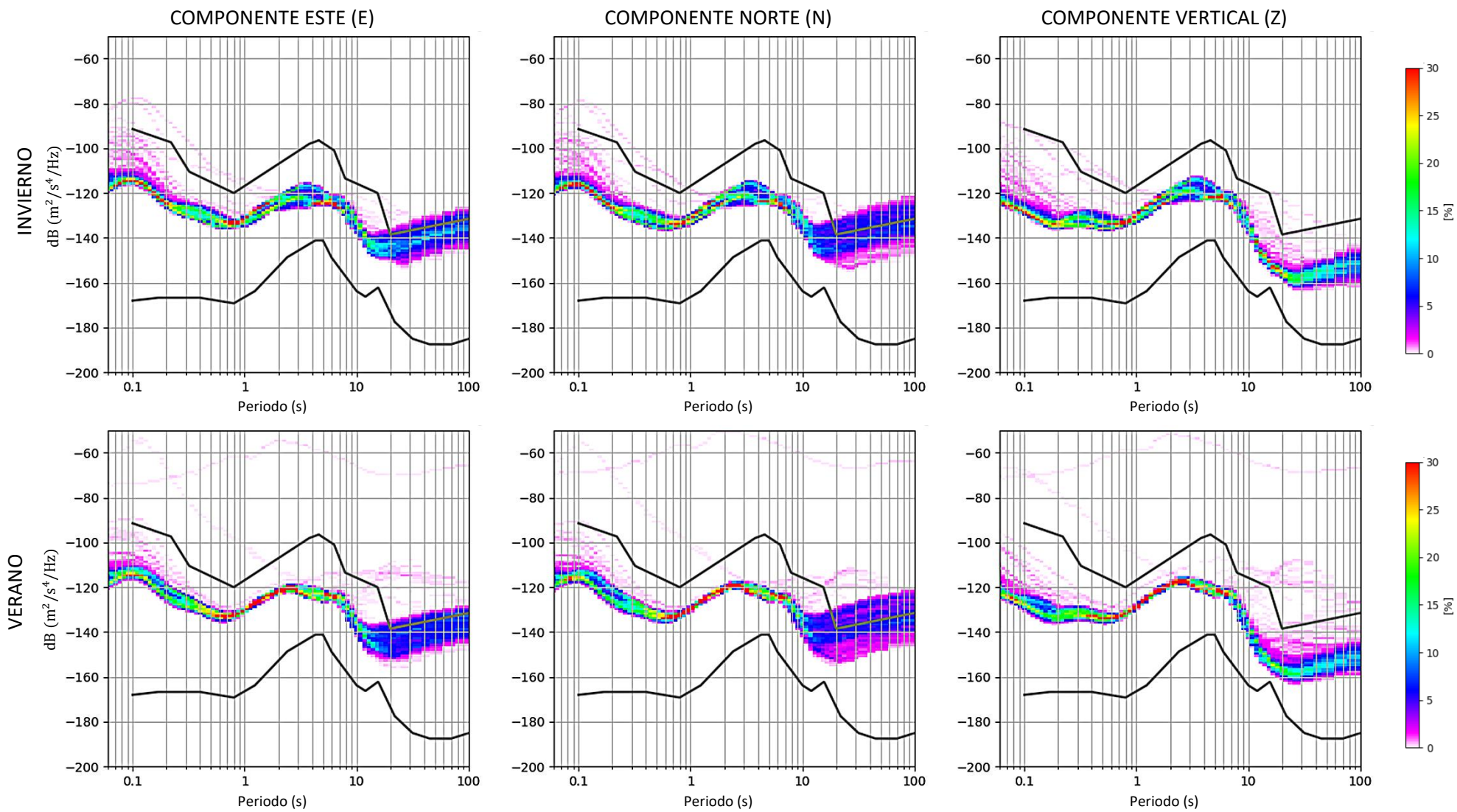
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA EL GUAYAO (GYAO)



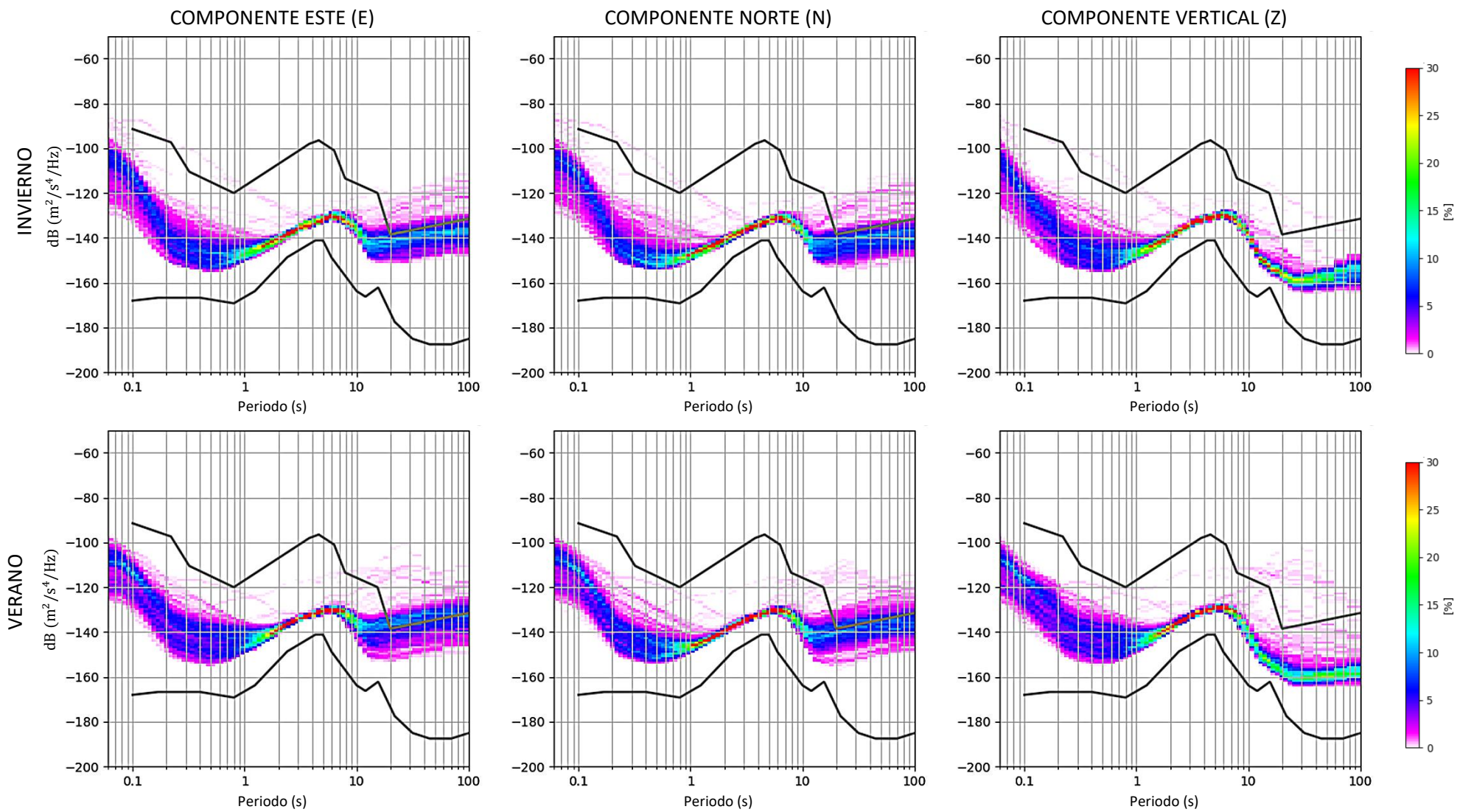
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA GUADALUPE (GUA0)



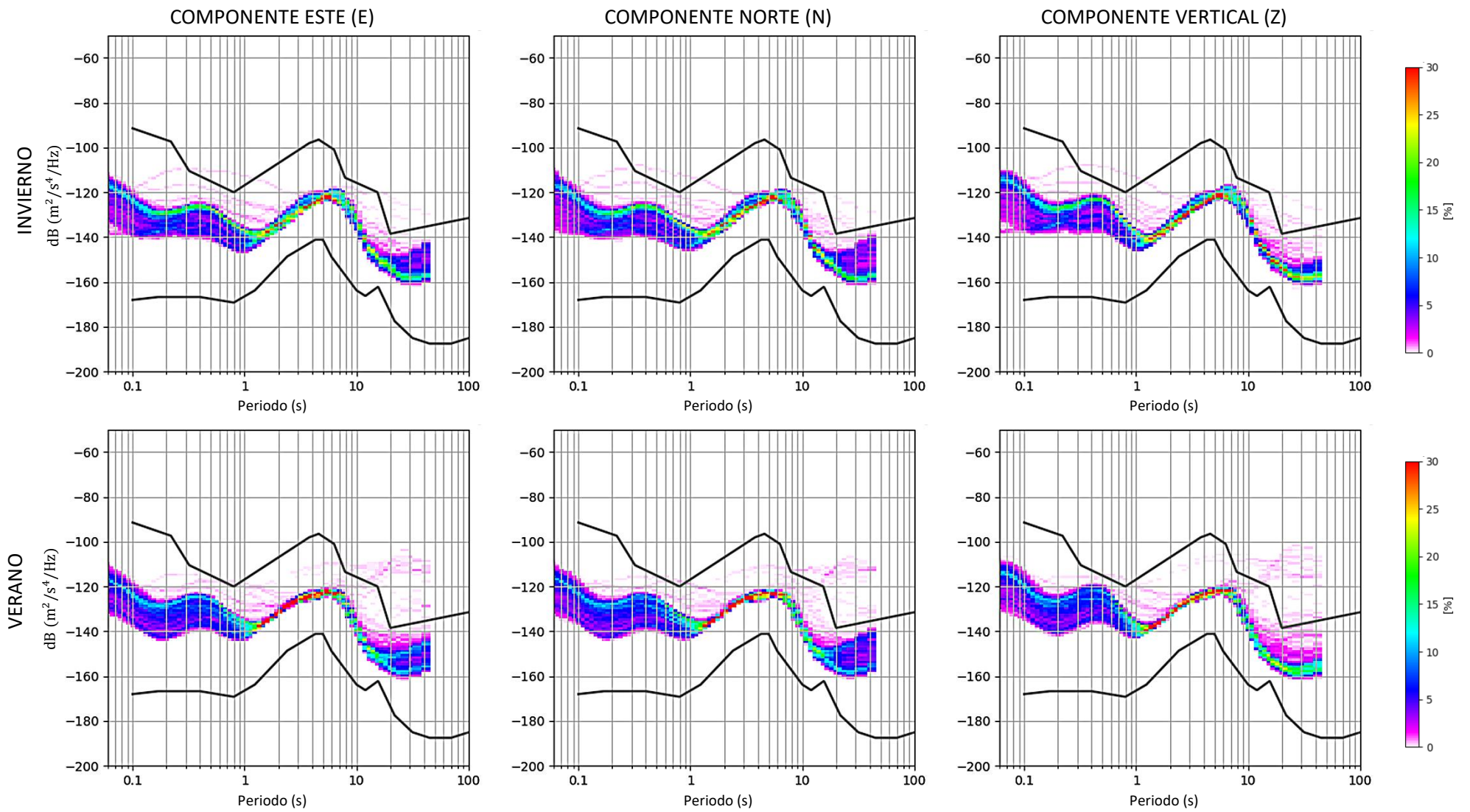
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA MAYORAZGO (HUB0)



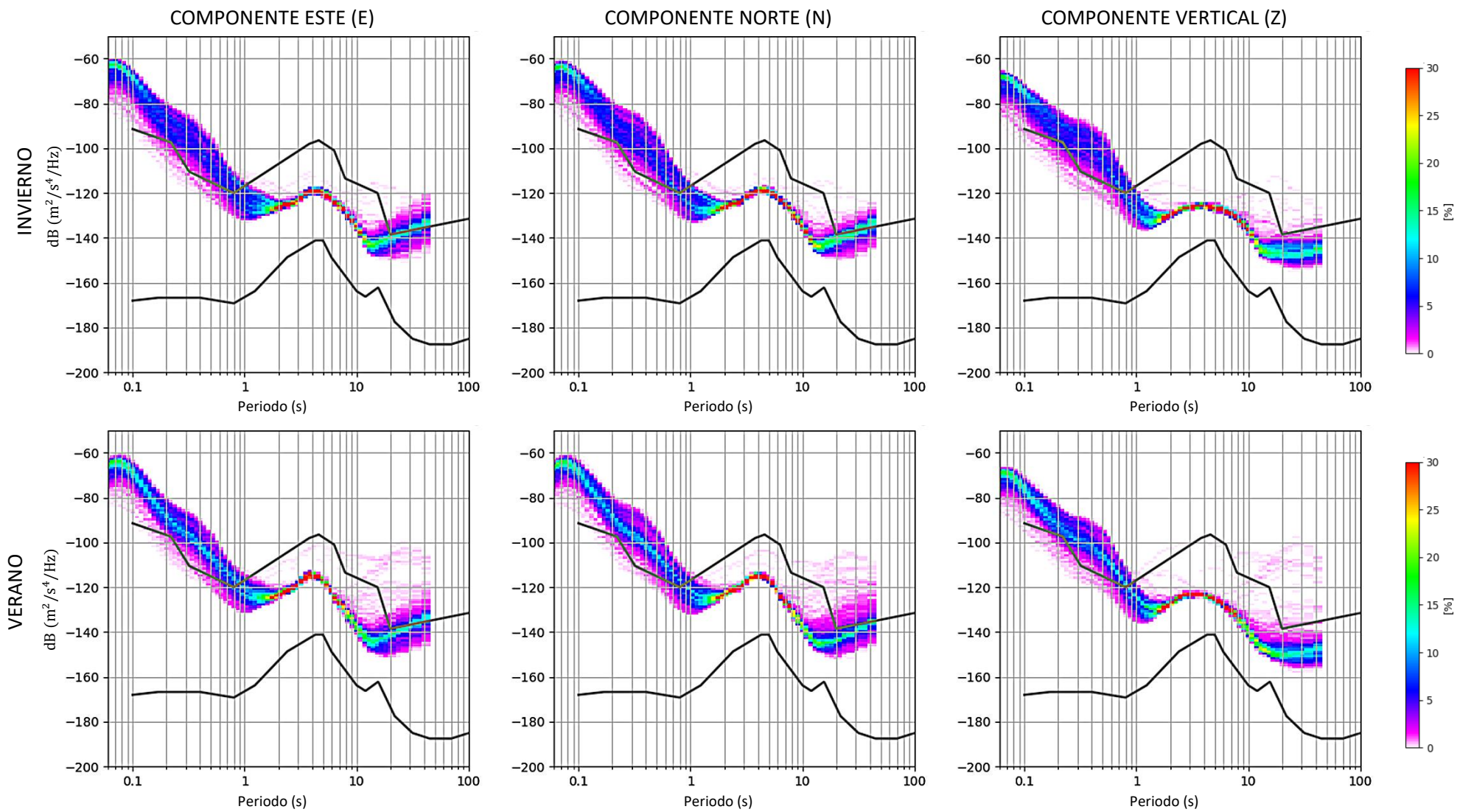
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA HUARMAY (HMEY)



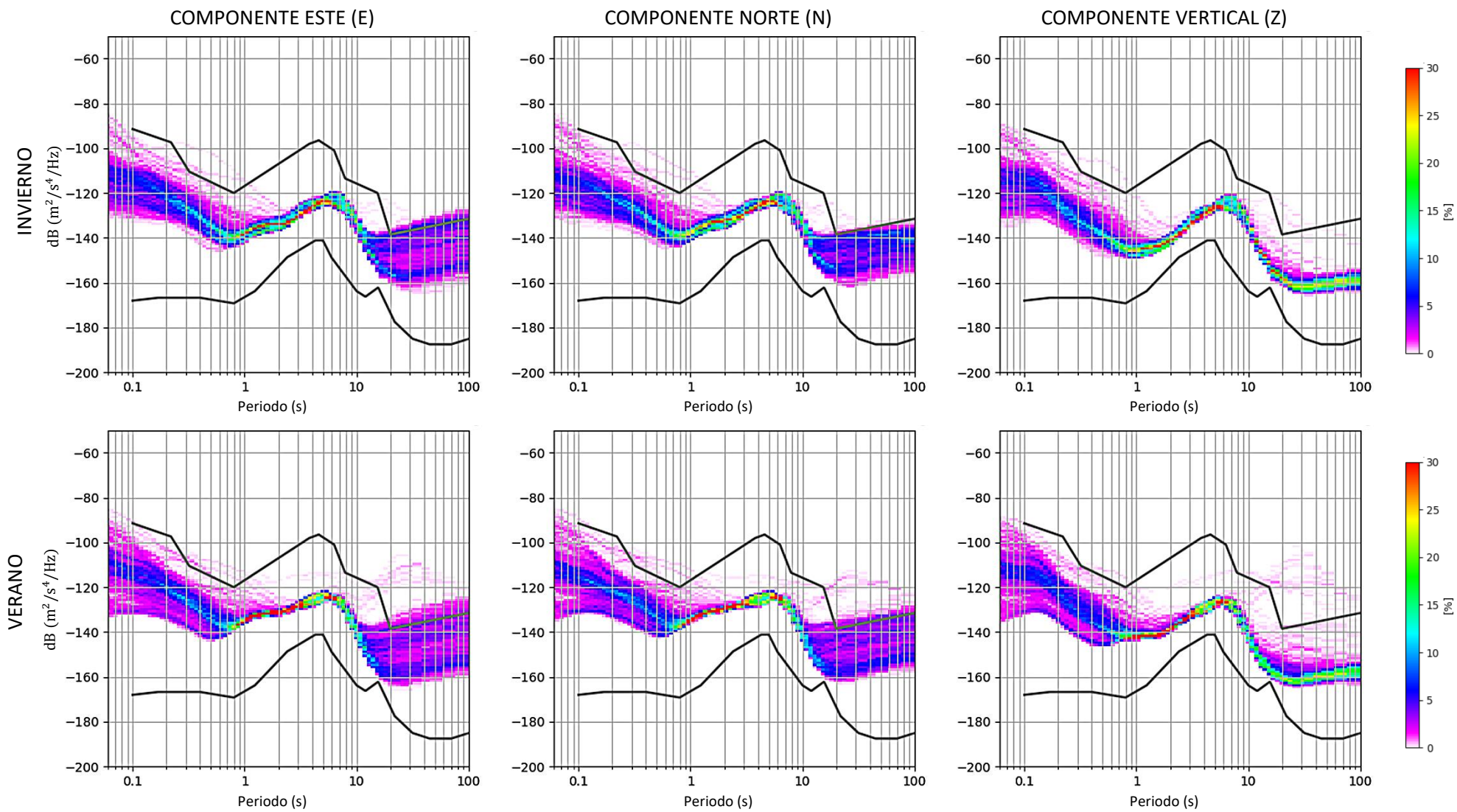
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA HUANCAS ALTO (HNAL)



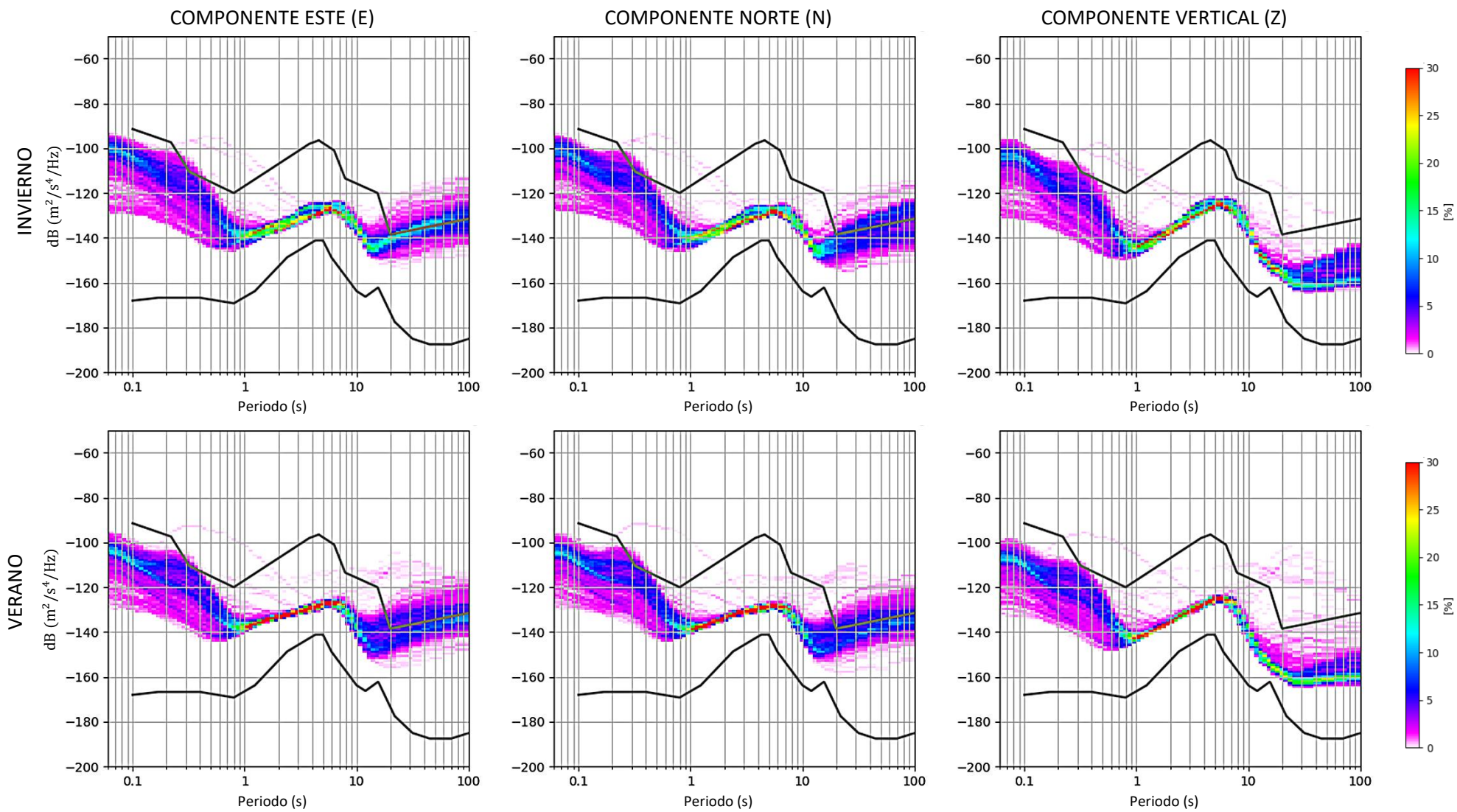
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA HUANCAYO (HY00)



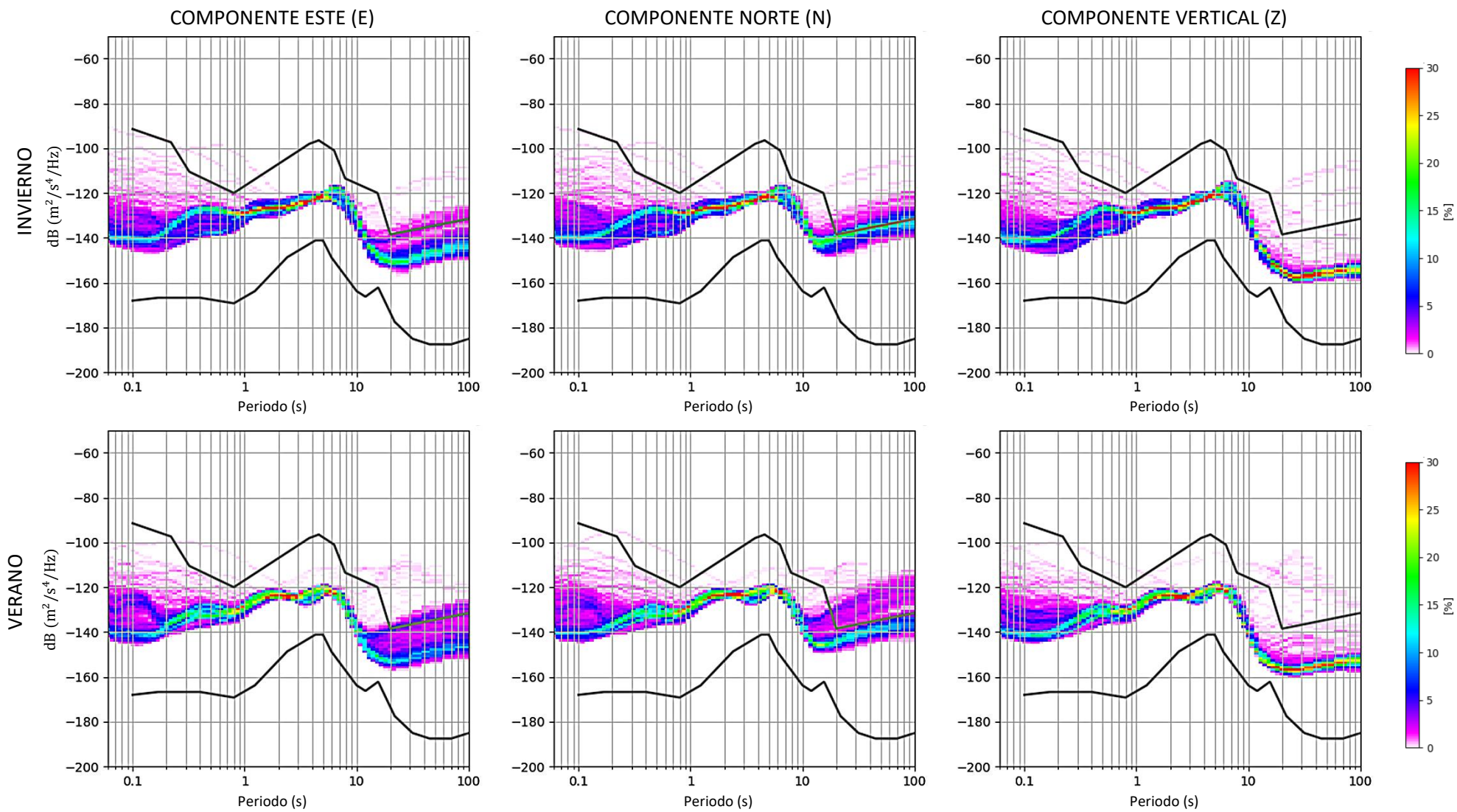
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA IQUITO (IQTO)



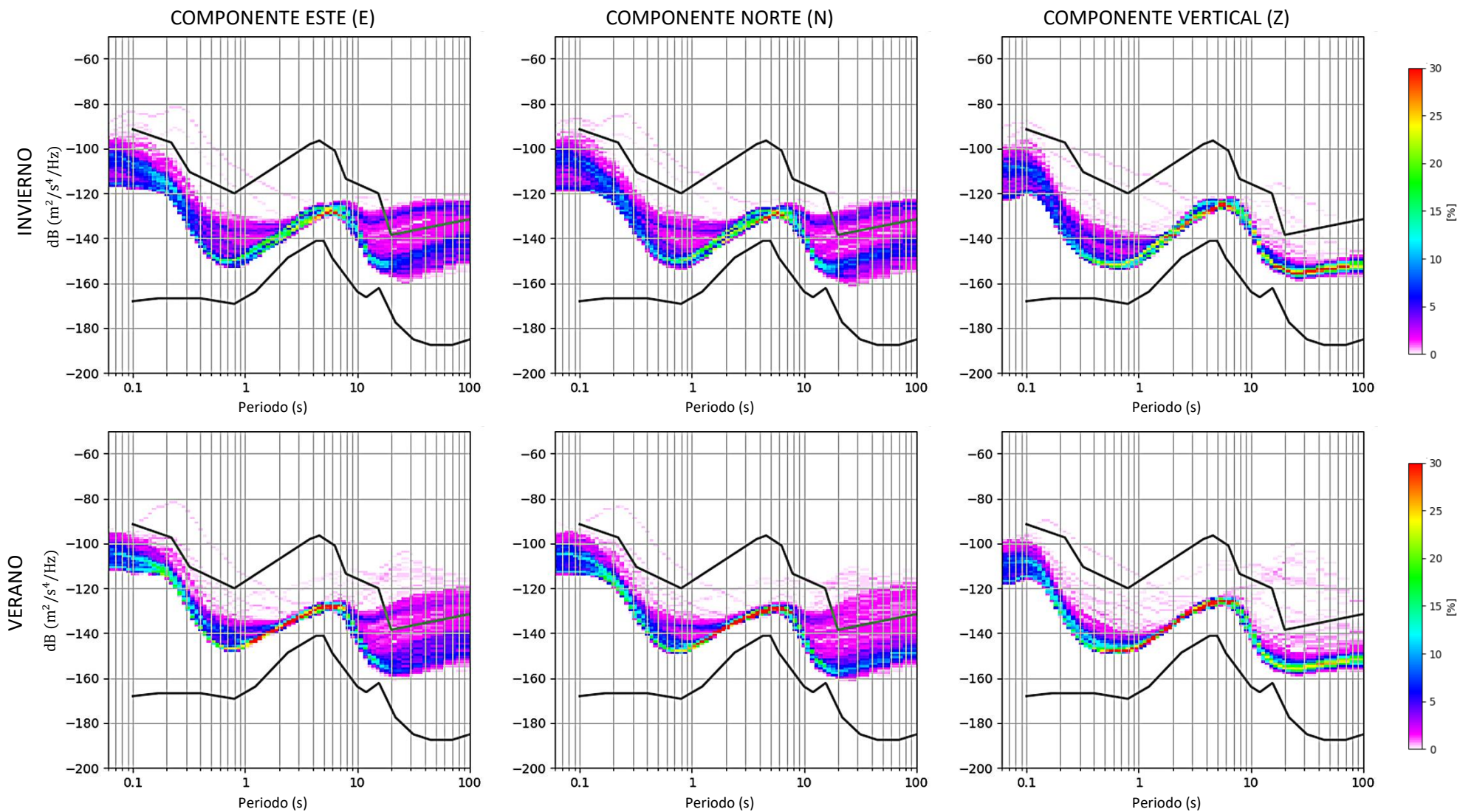
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA SANTA ISABEL DE CHAPA (ISAB)



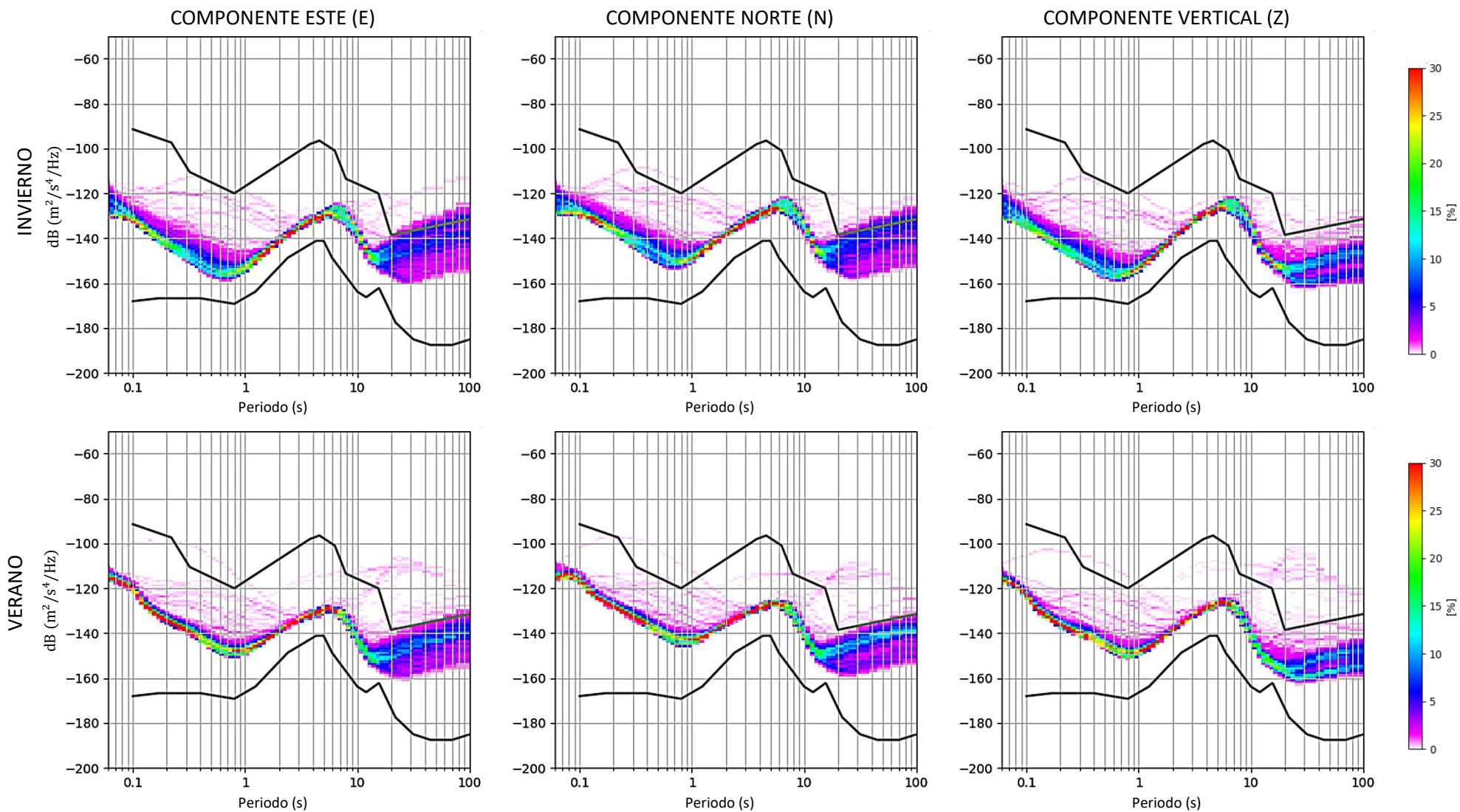
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA LA VICTORIA (LVIC)



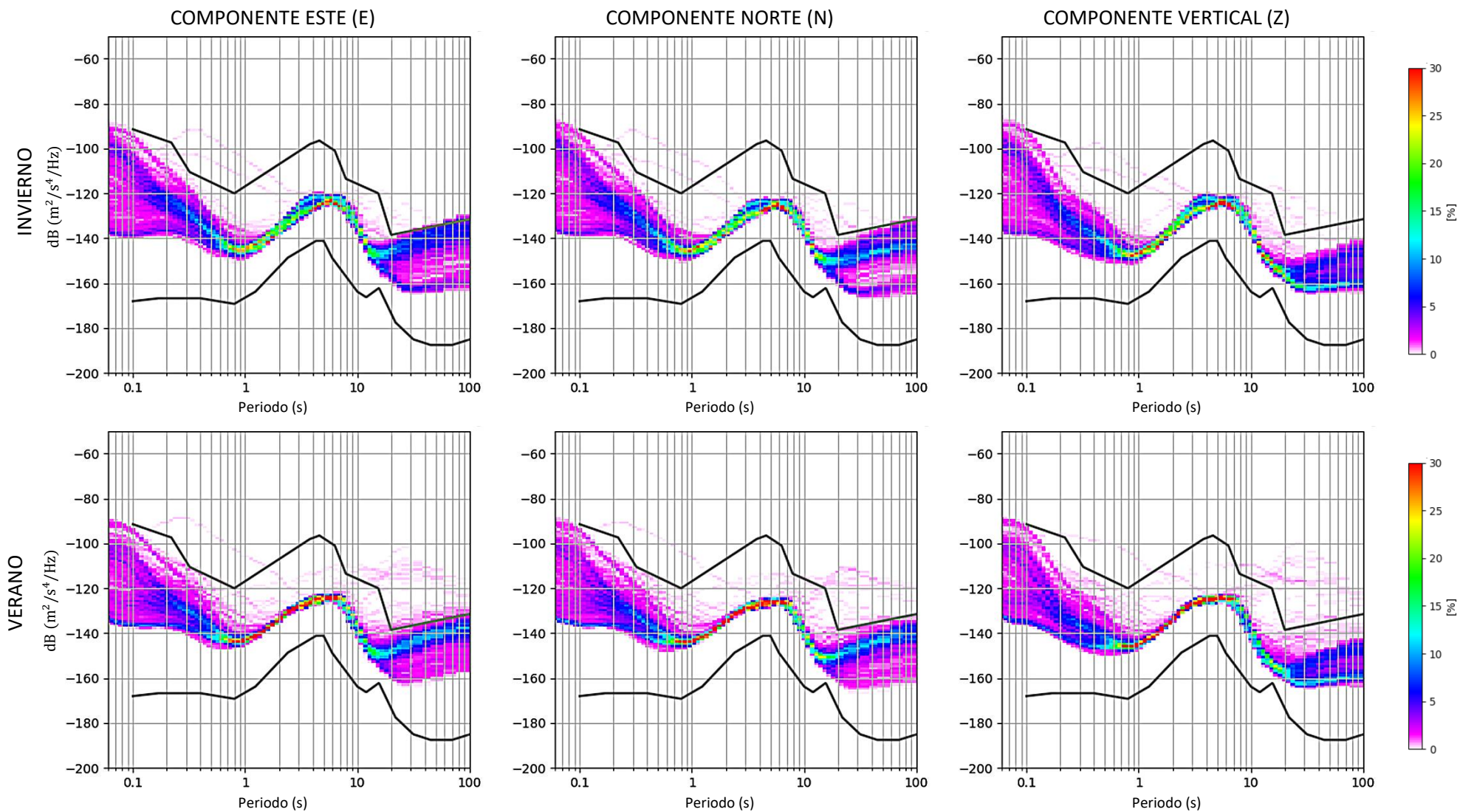
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA LA YARADA (LYAR)



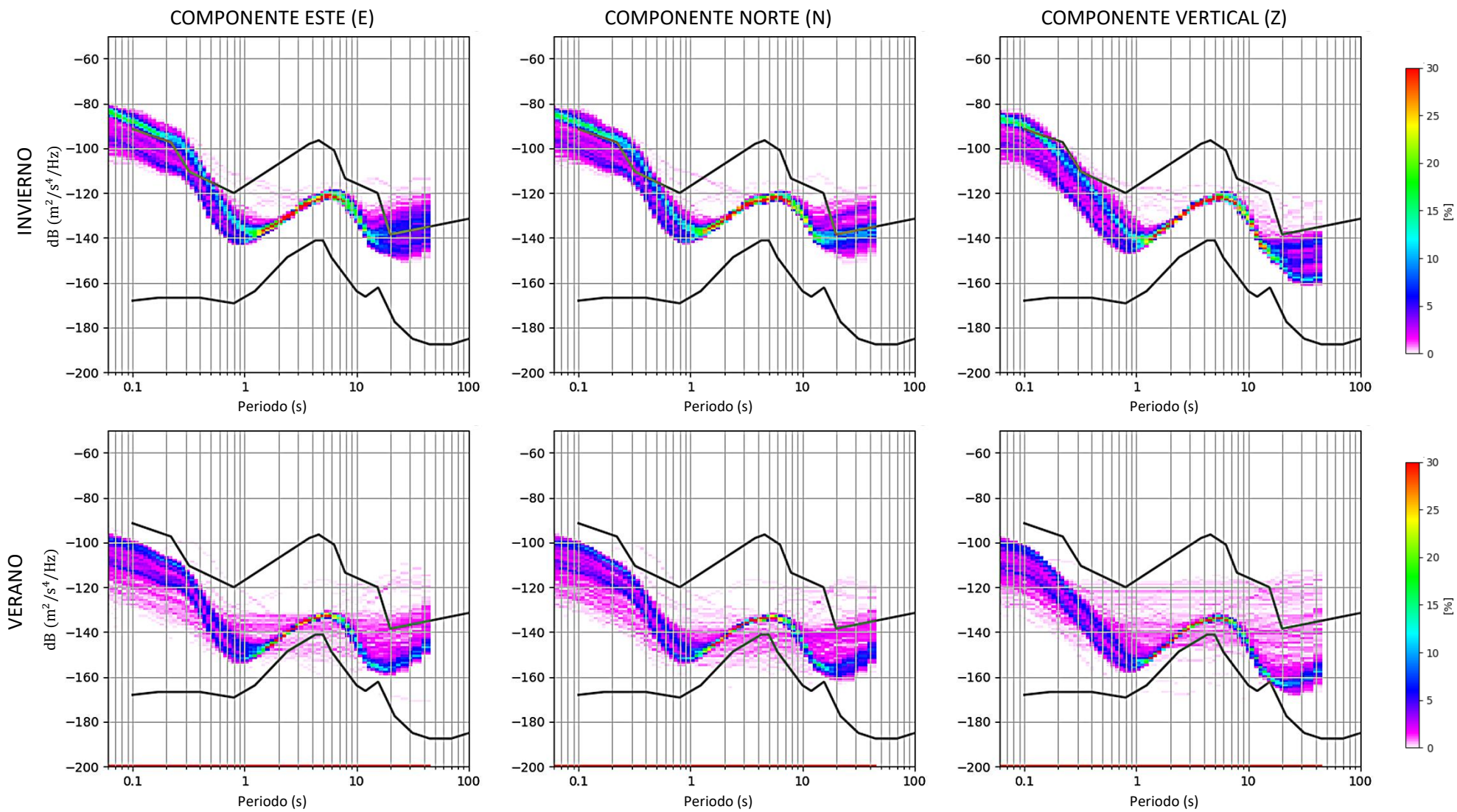
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA MONZÓN (MNZN)



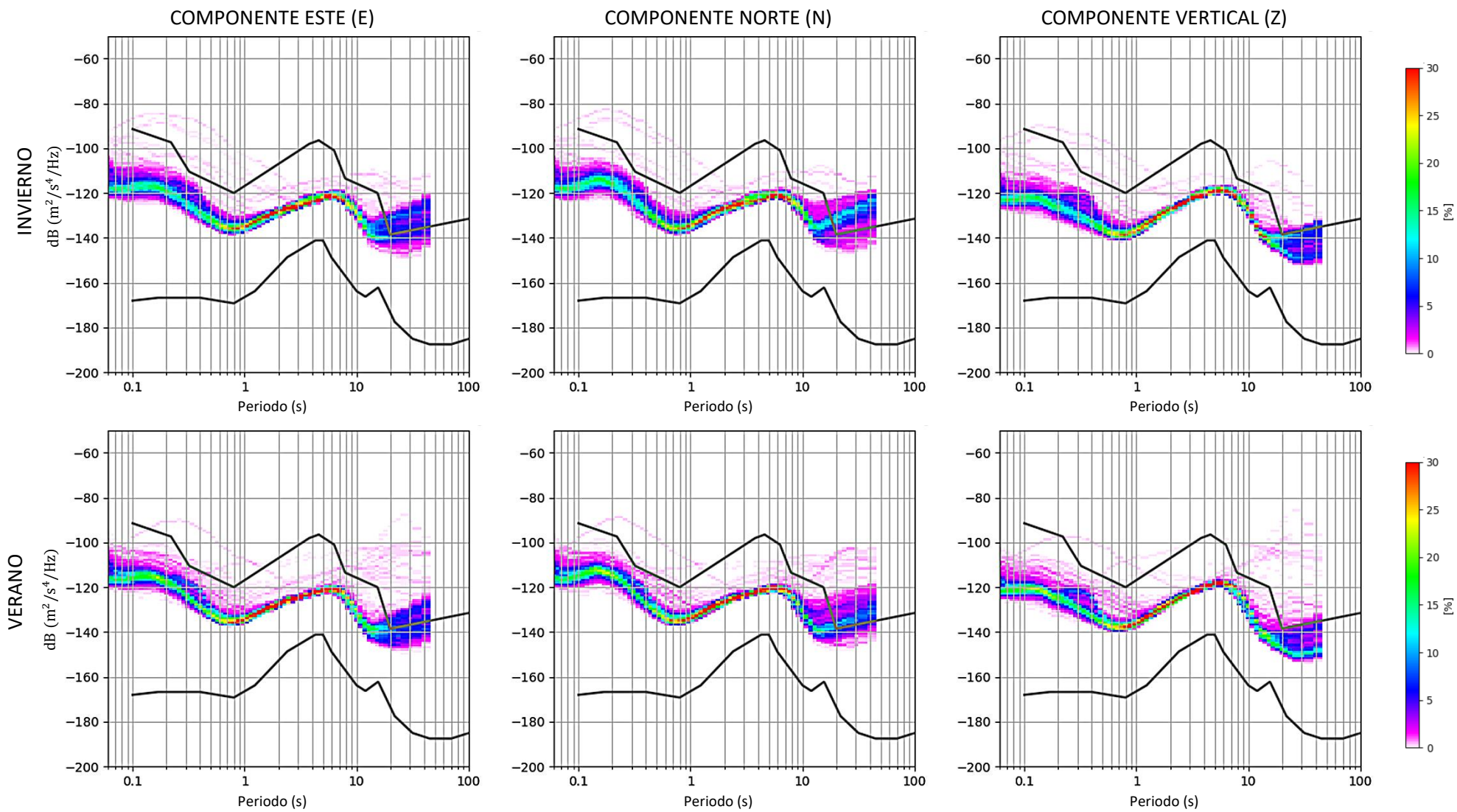
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA MEDIO PACHIRI (MPCH)



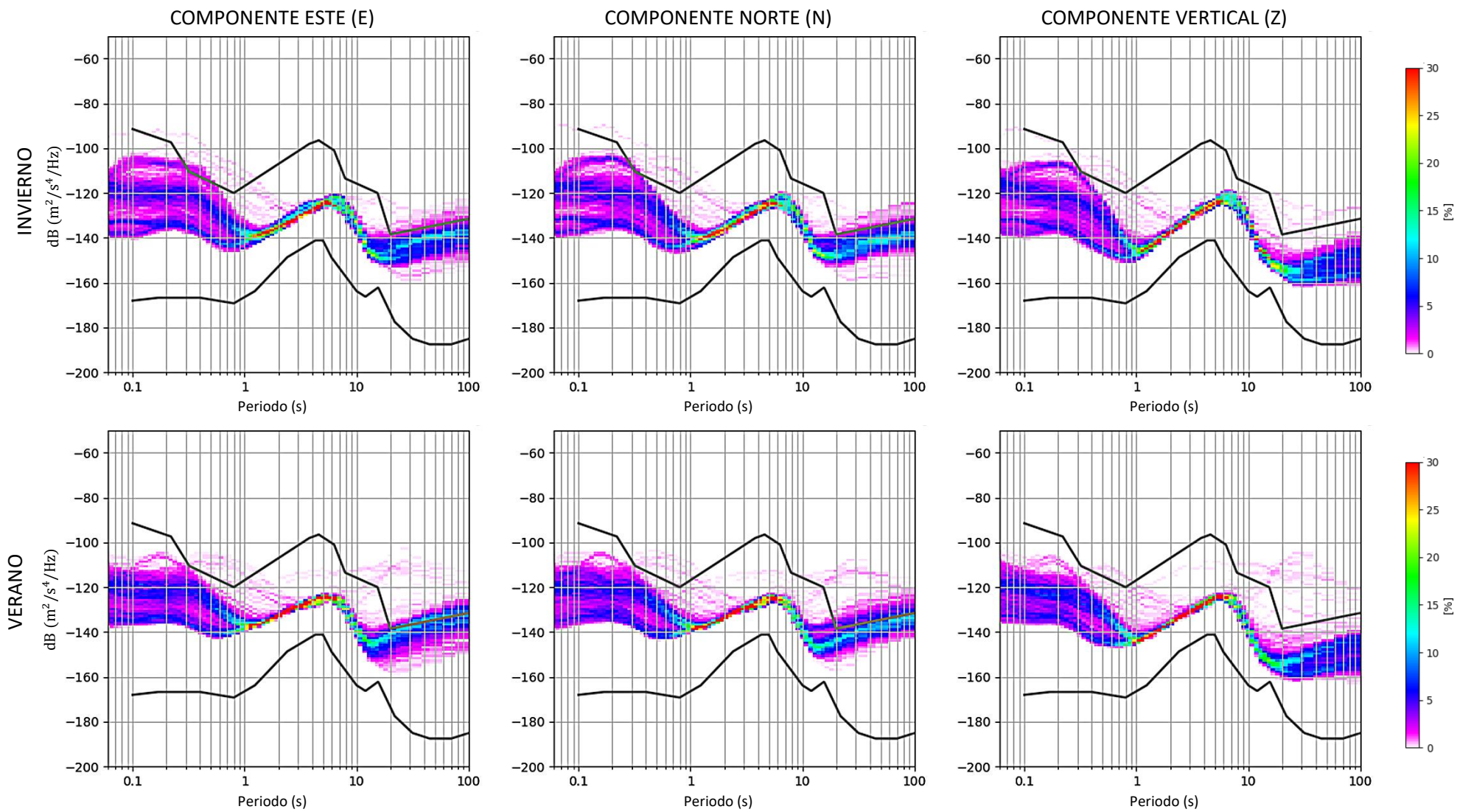
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA NUEVO MILÁN (NVM1)



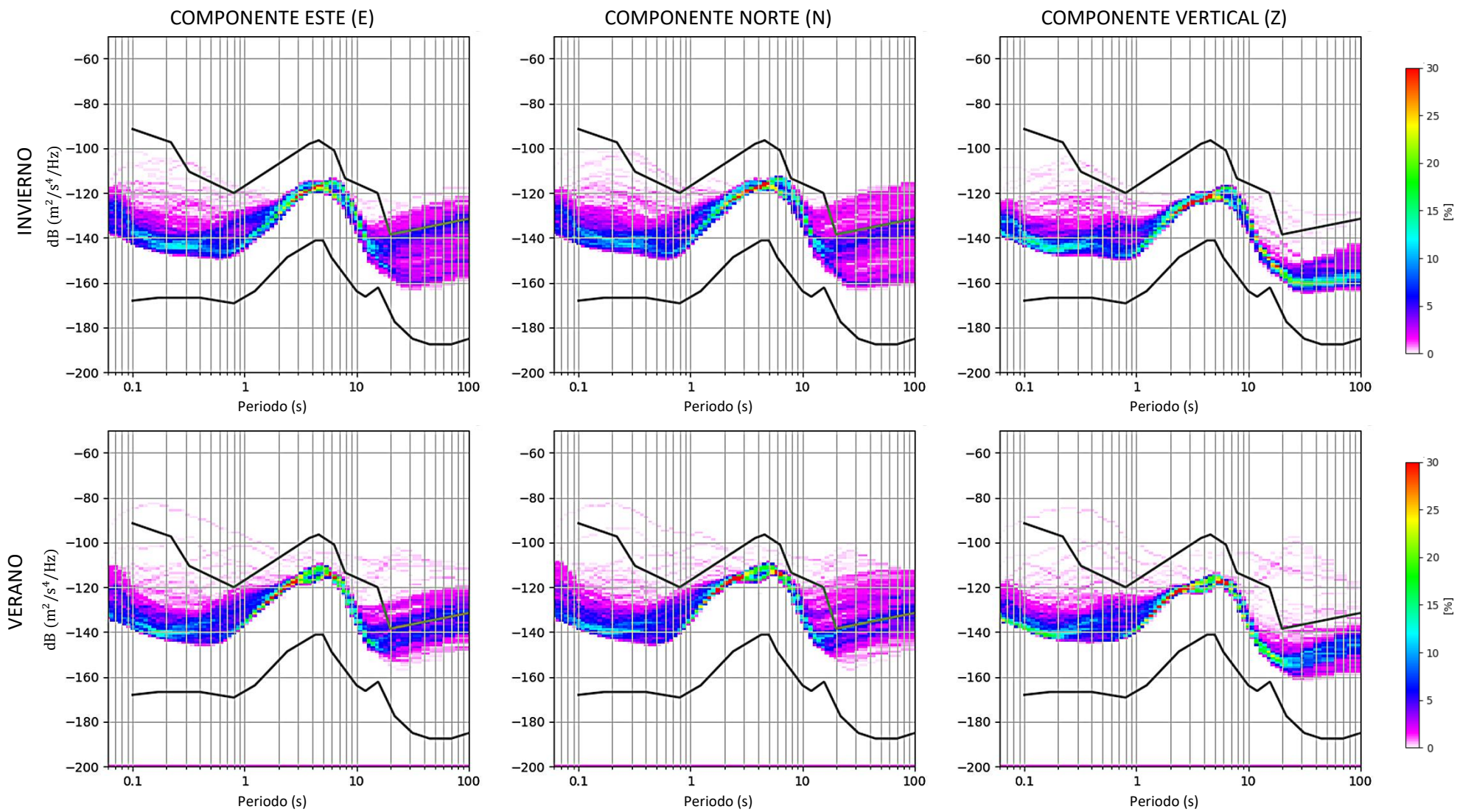
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA SANTA MARÍA DE NIEVA (NIEV)



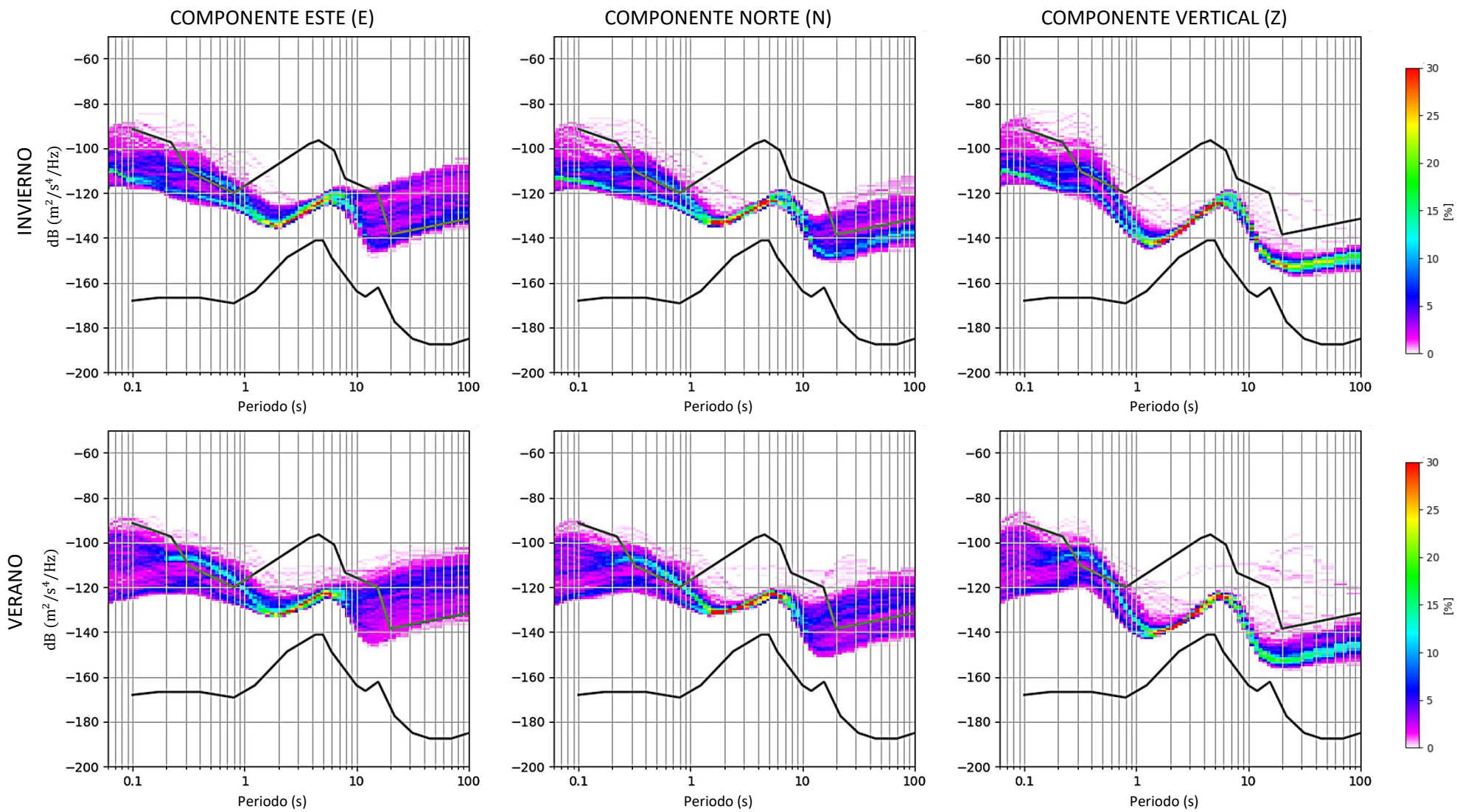
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PORTACHUELO (PCH0)



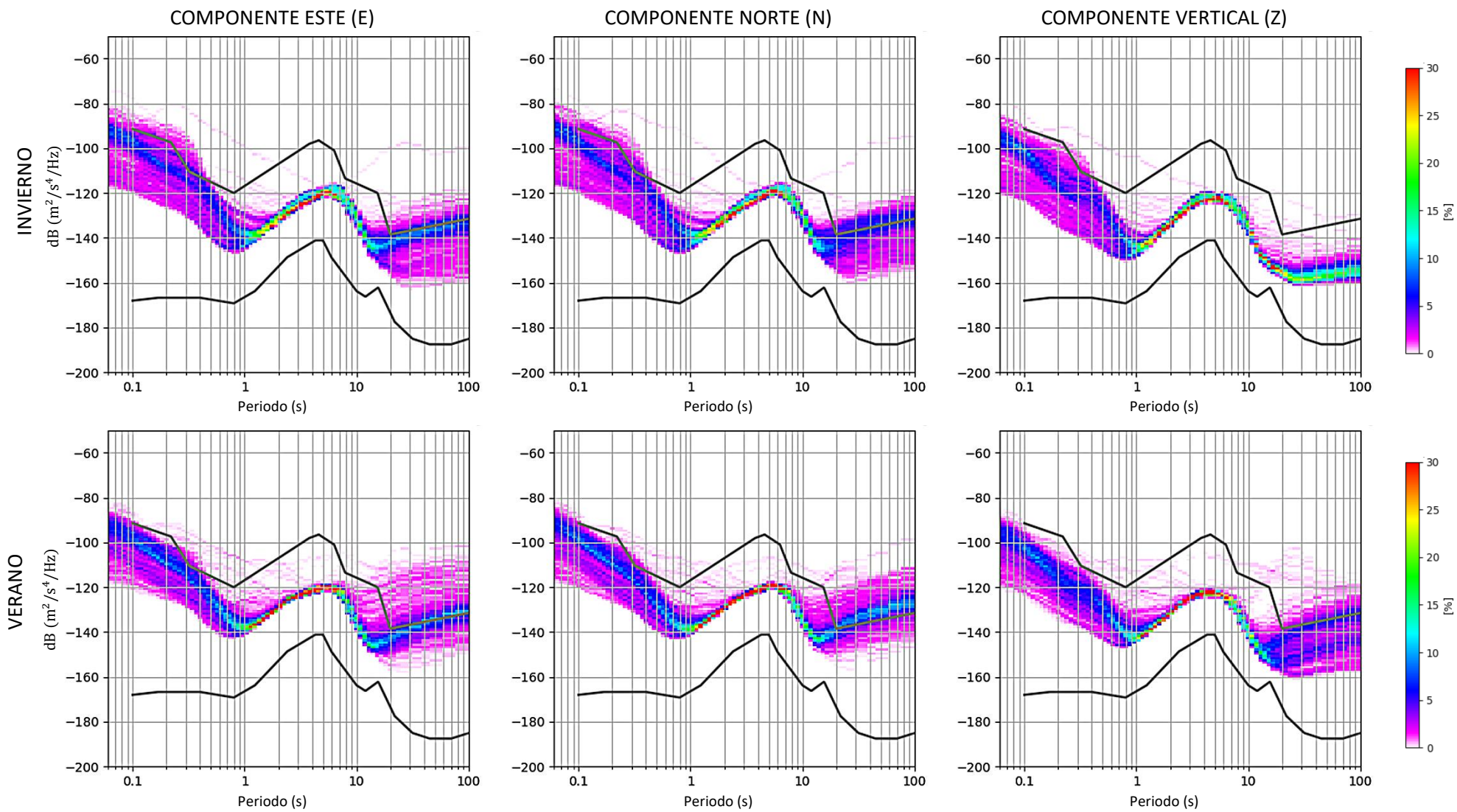
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PACCO LOMA (PACL)



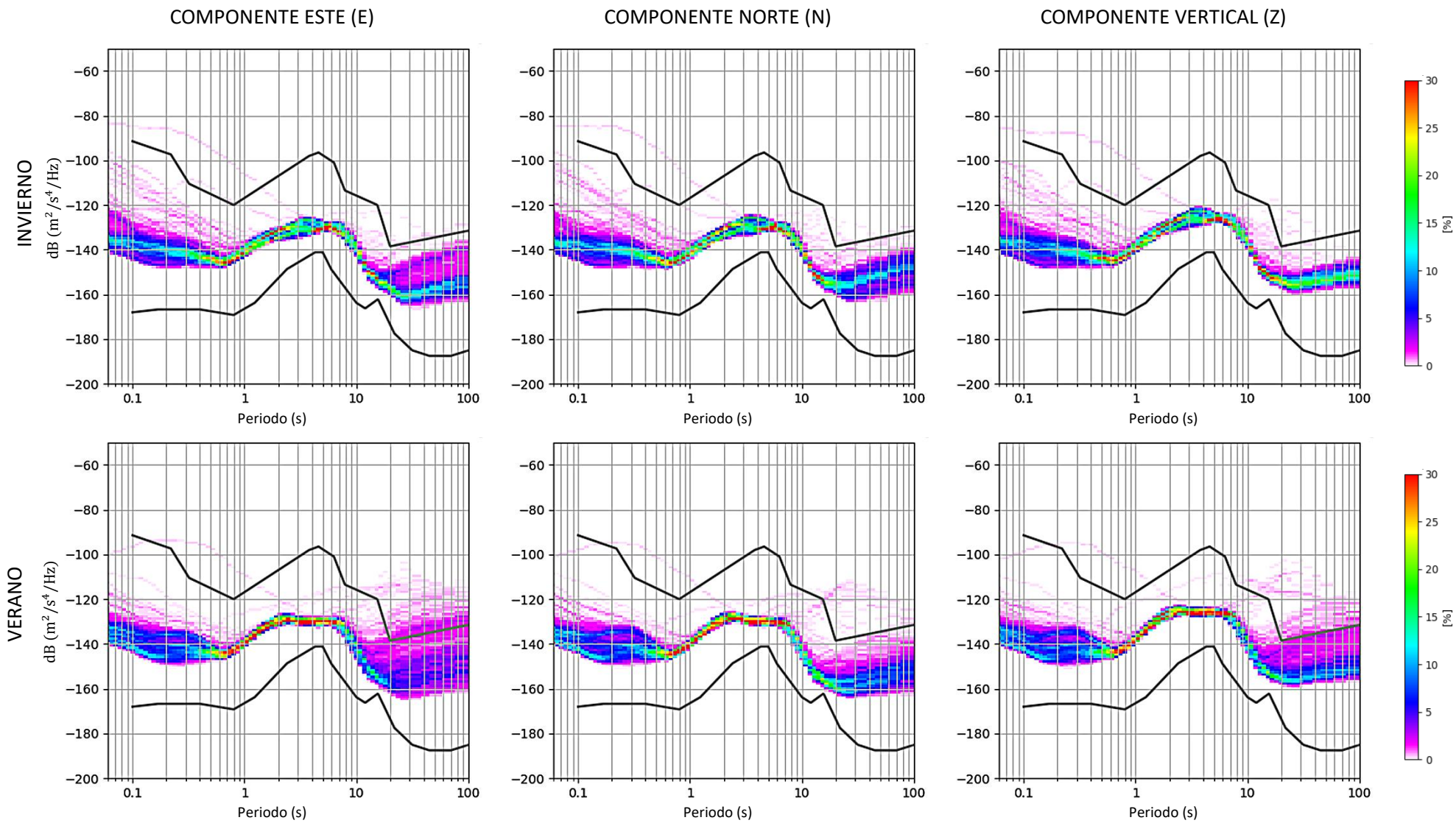
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PATAPAMPA (PATO)



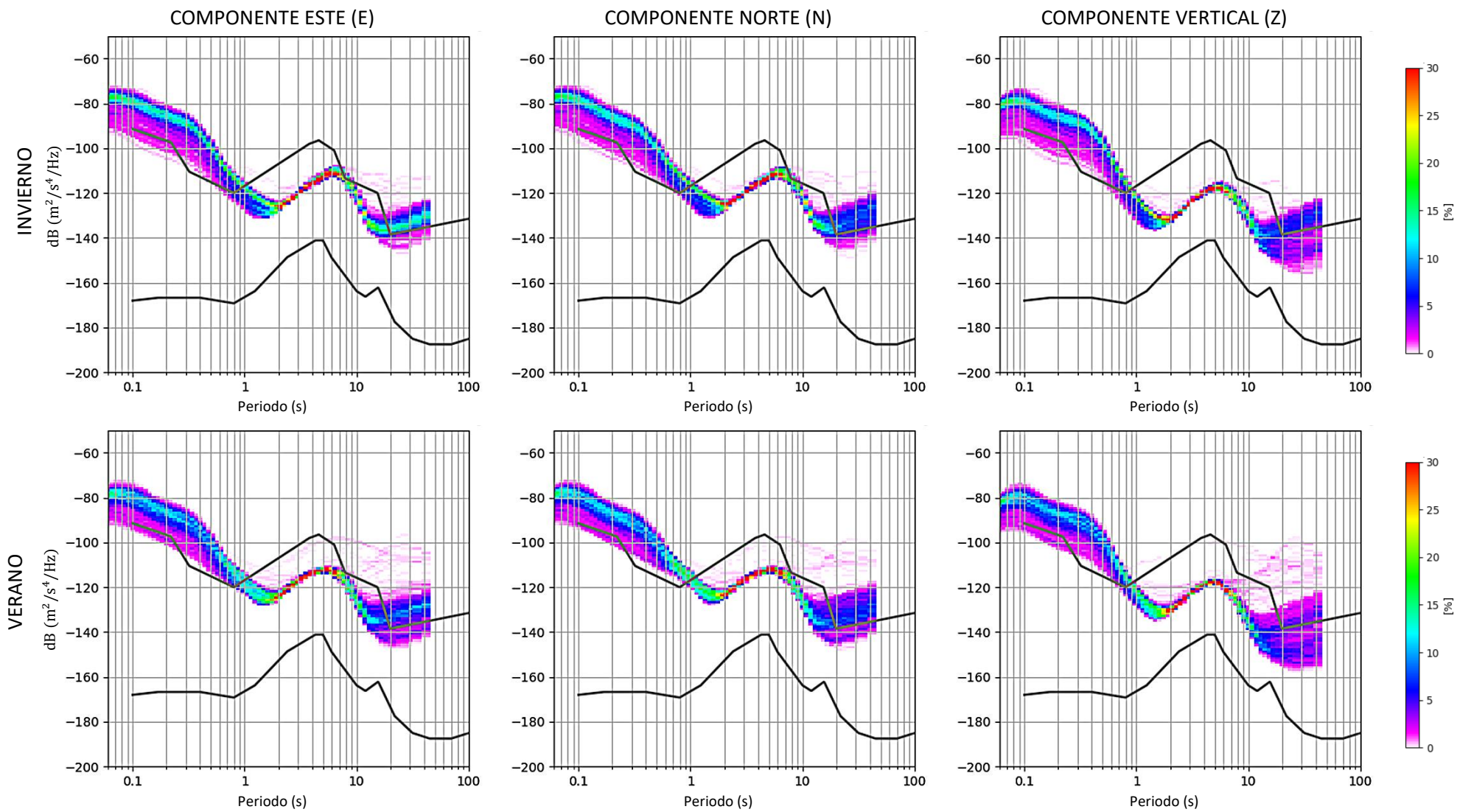
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PAYAPUNKU (PAYA)



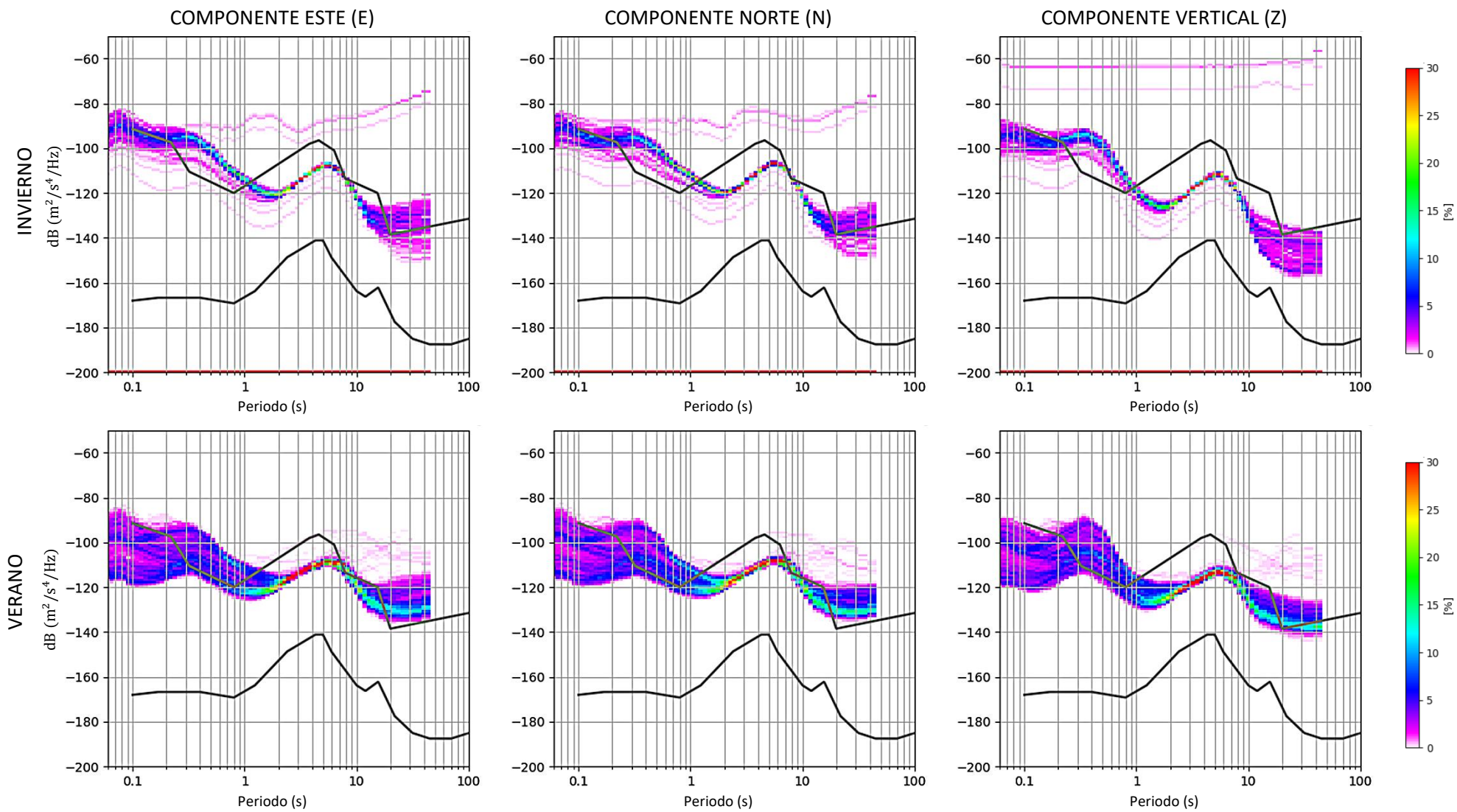
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PUERTO BERMÚDEZ (PBER)



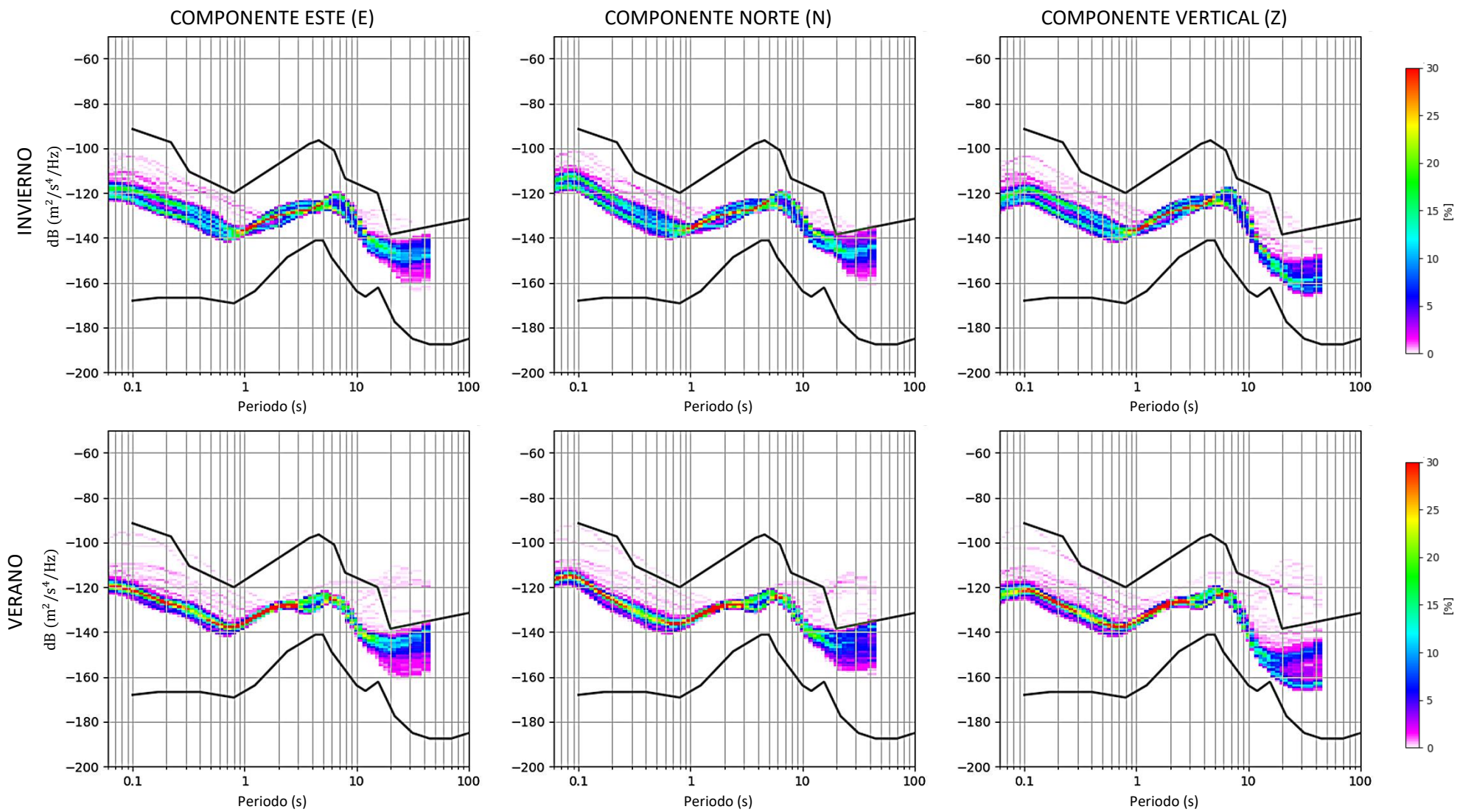
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA QUIRIHUAC (QRHC)



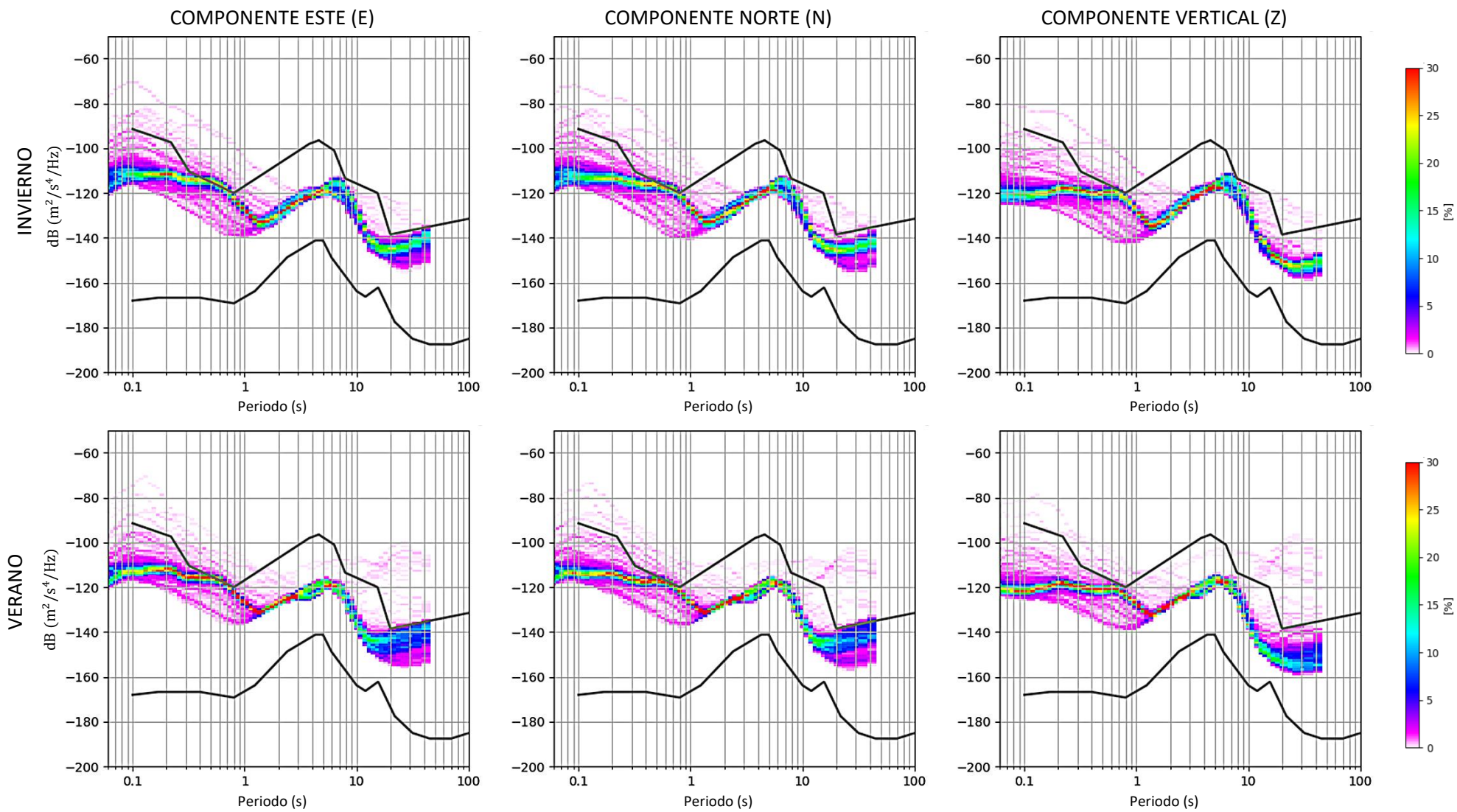
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PUERTO MALDONADO (PTM0)



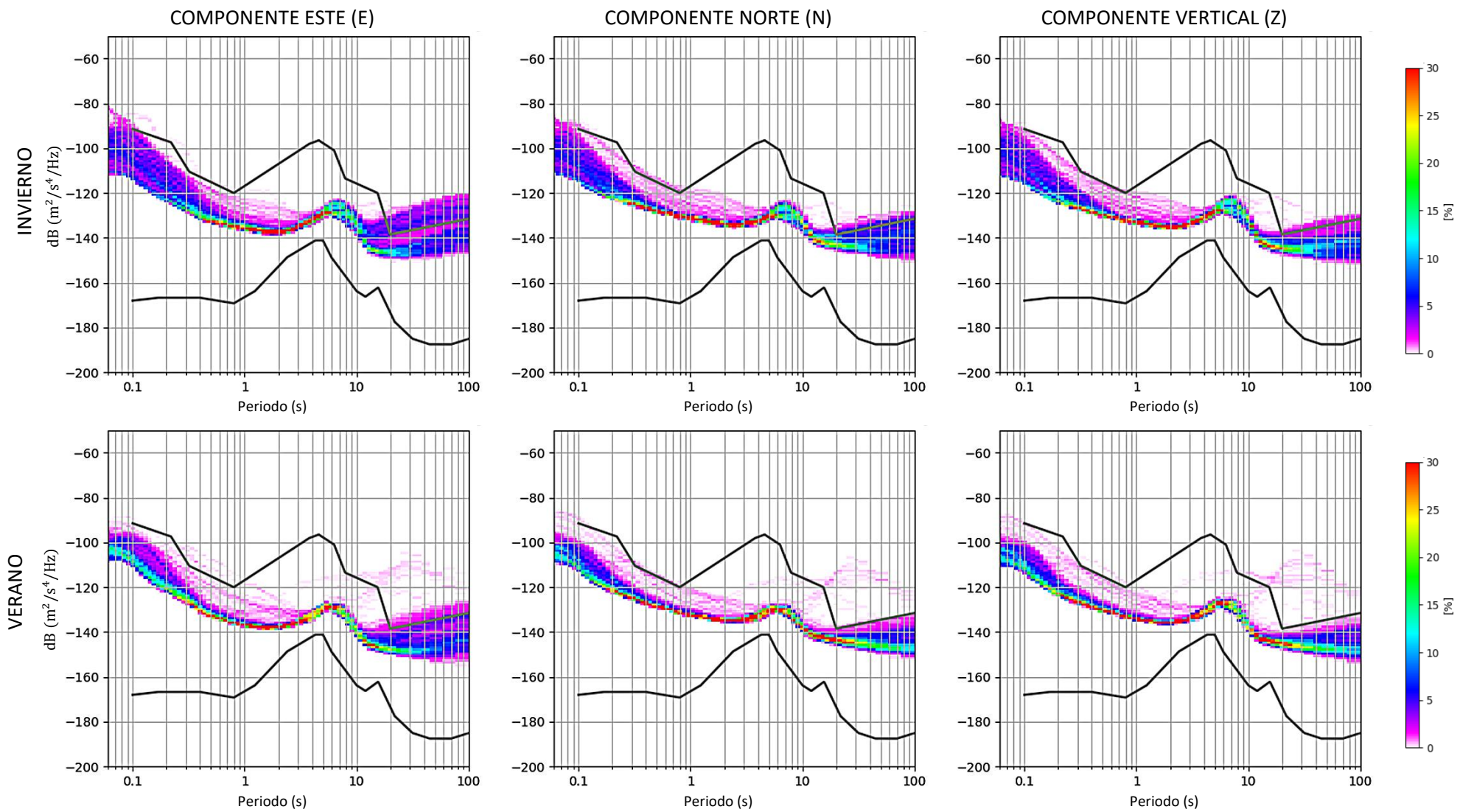
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA PUCALLPA (PUCO)



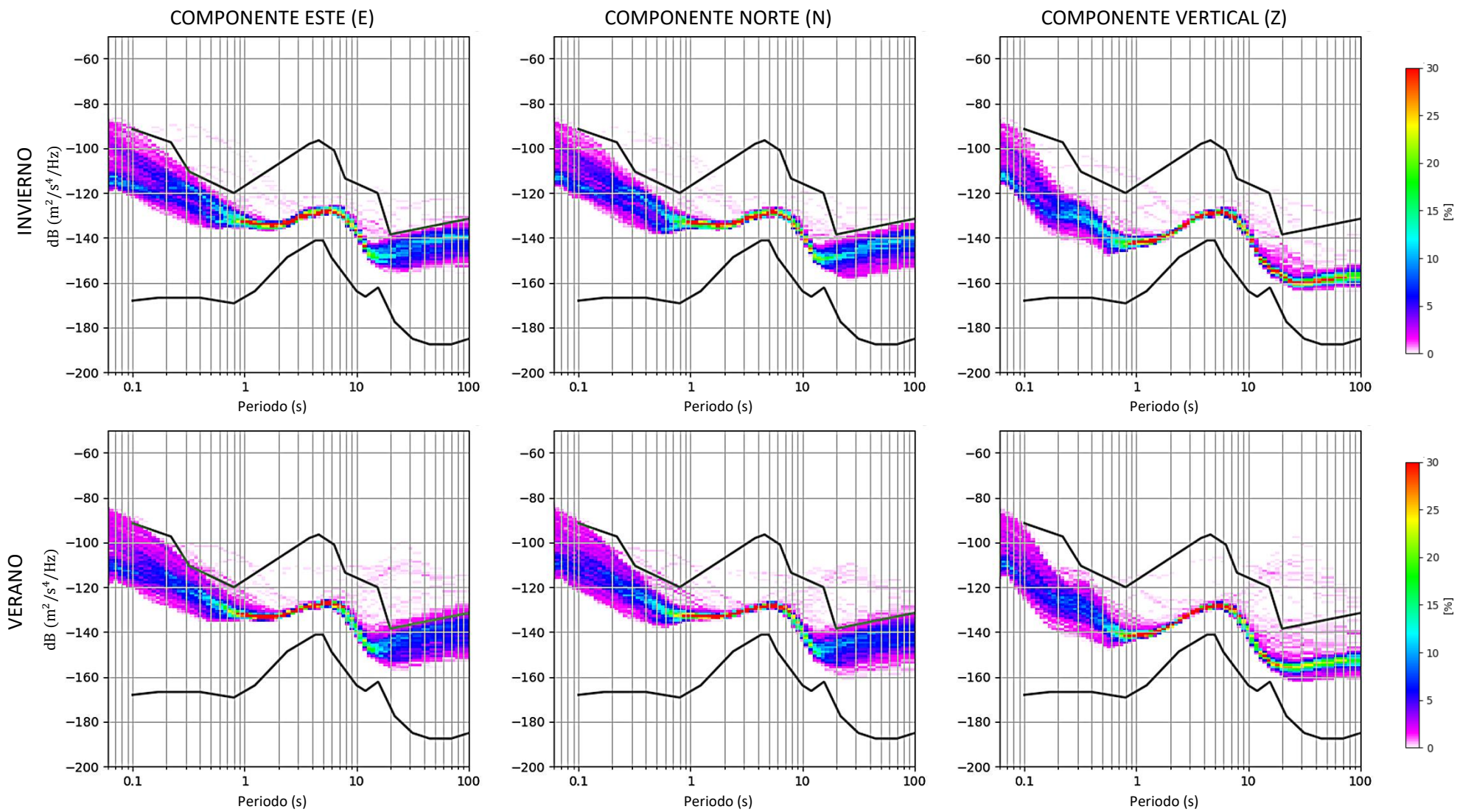
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA QUILCA (QLKO)



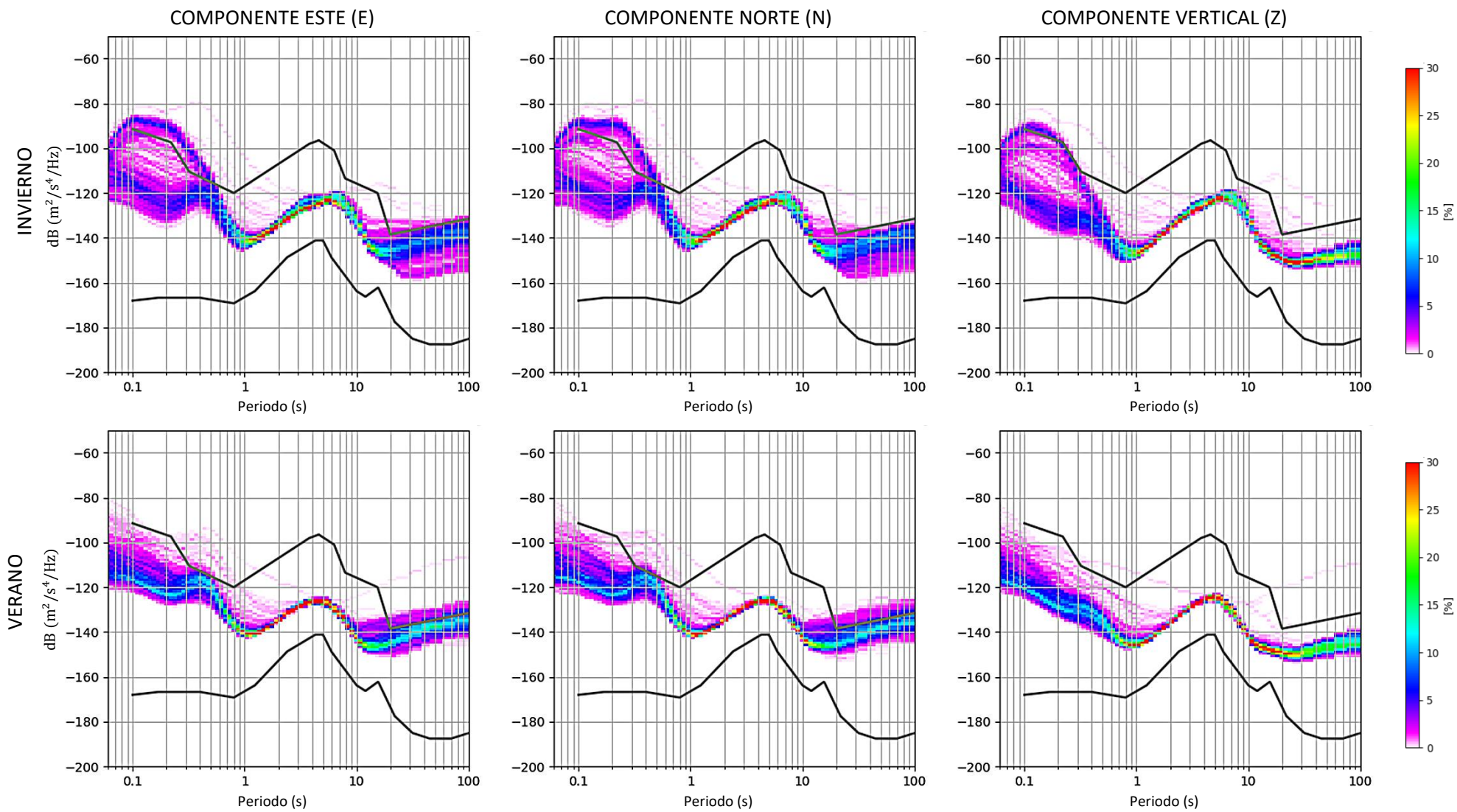
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA TOQUEPALA (TOQ0)



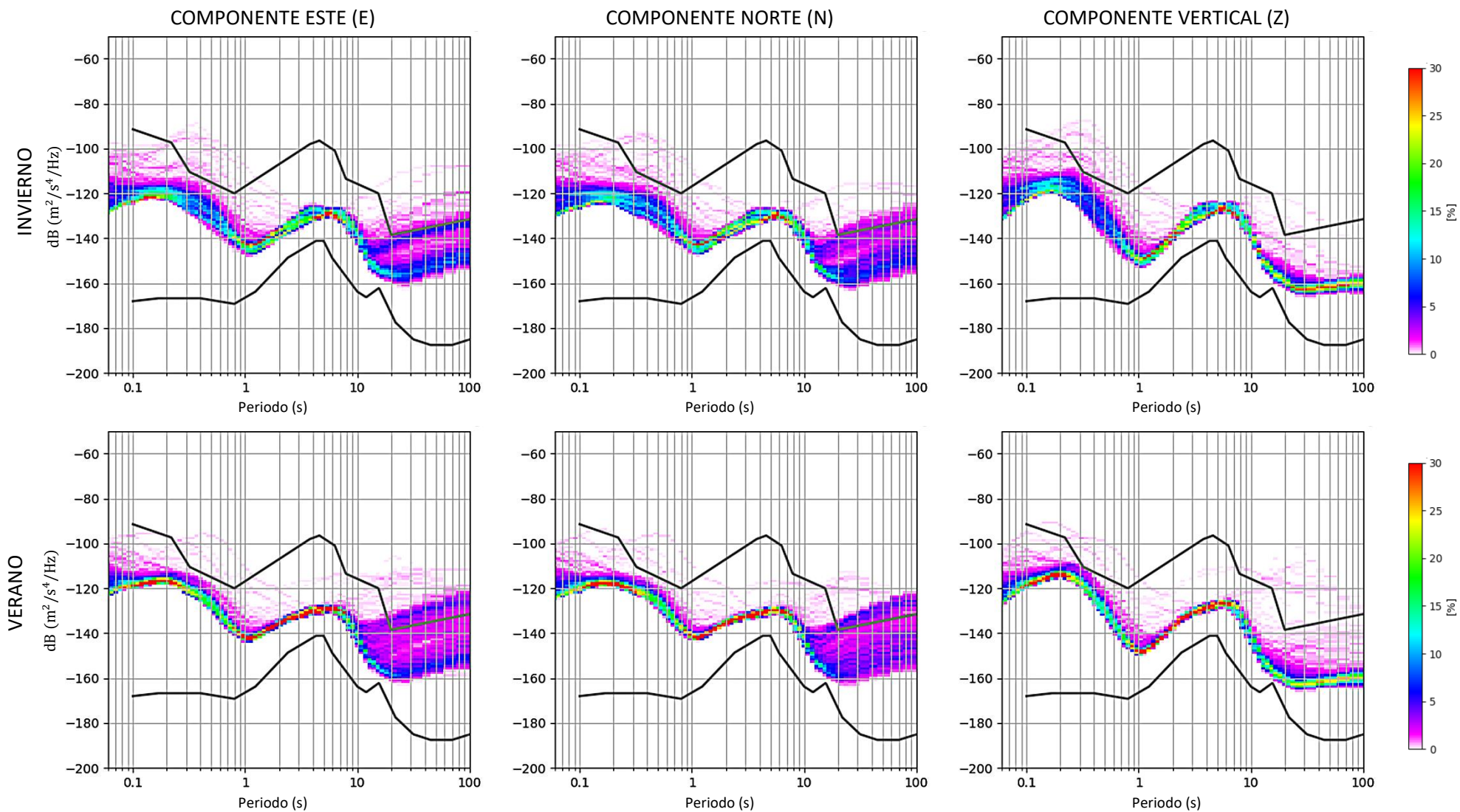
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA SARCONTA (SCRT)



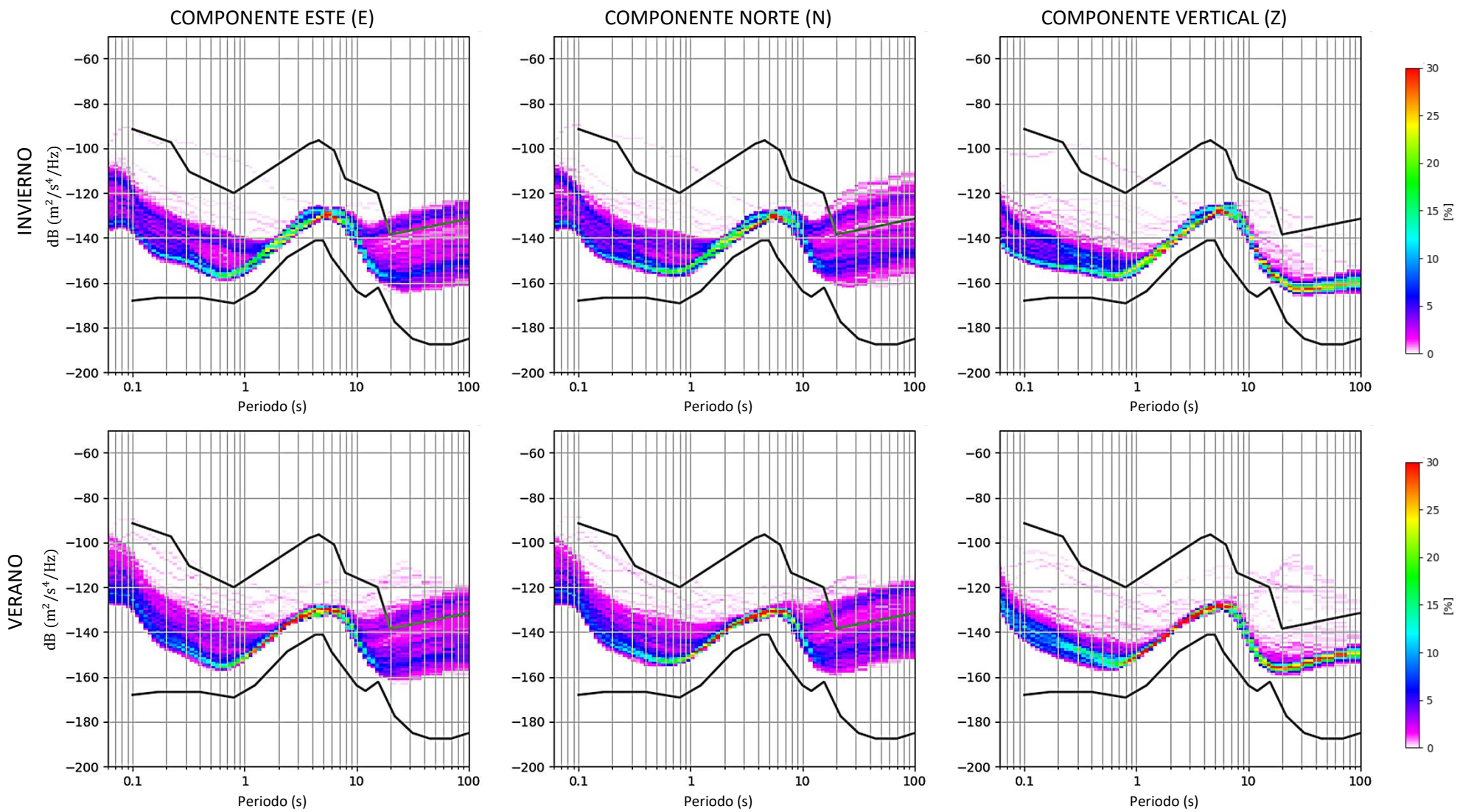
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA SAN IGNACIO (SNIG)



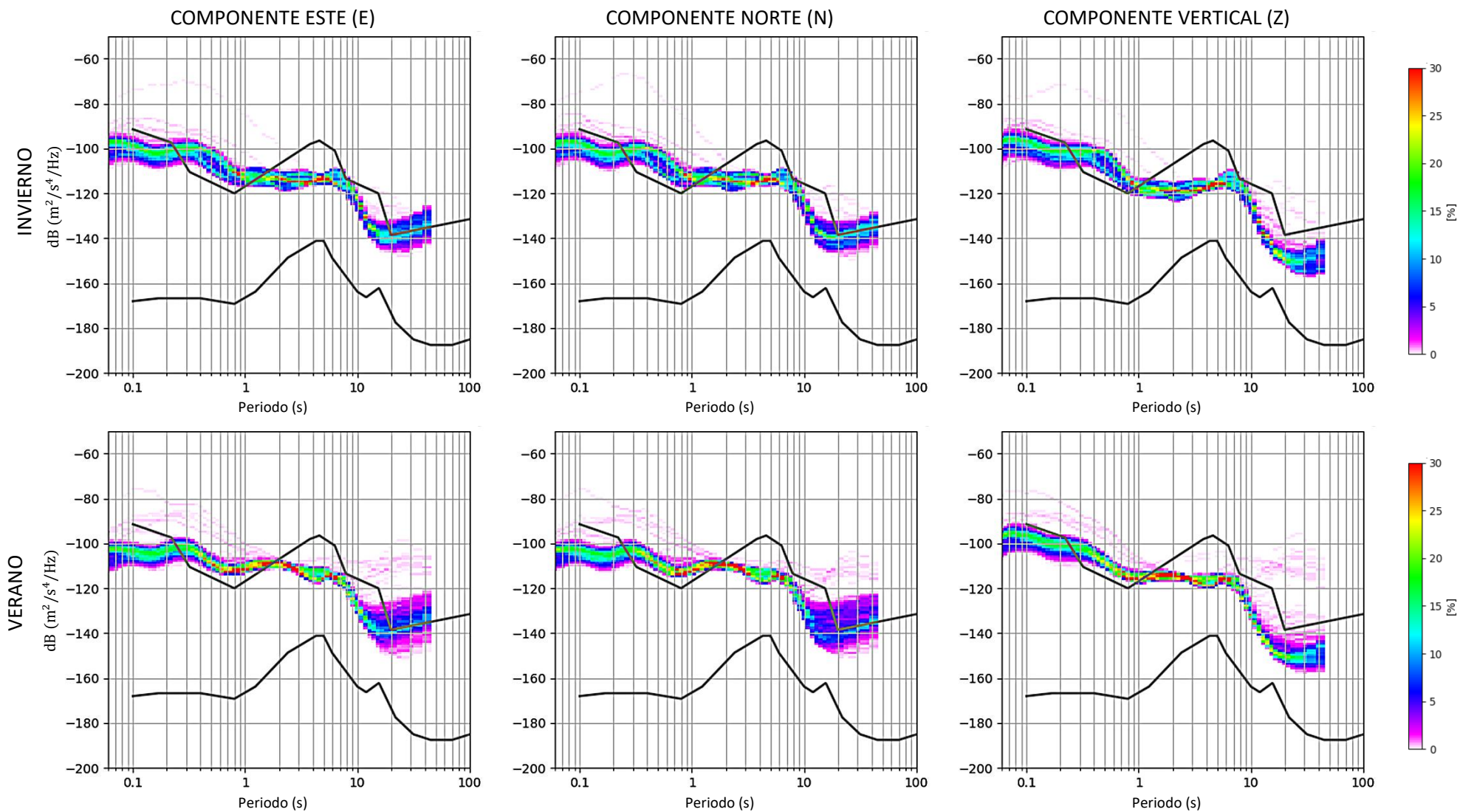
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA SATIPO (STPO)



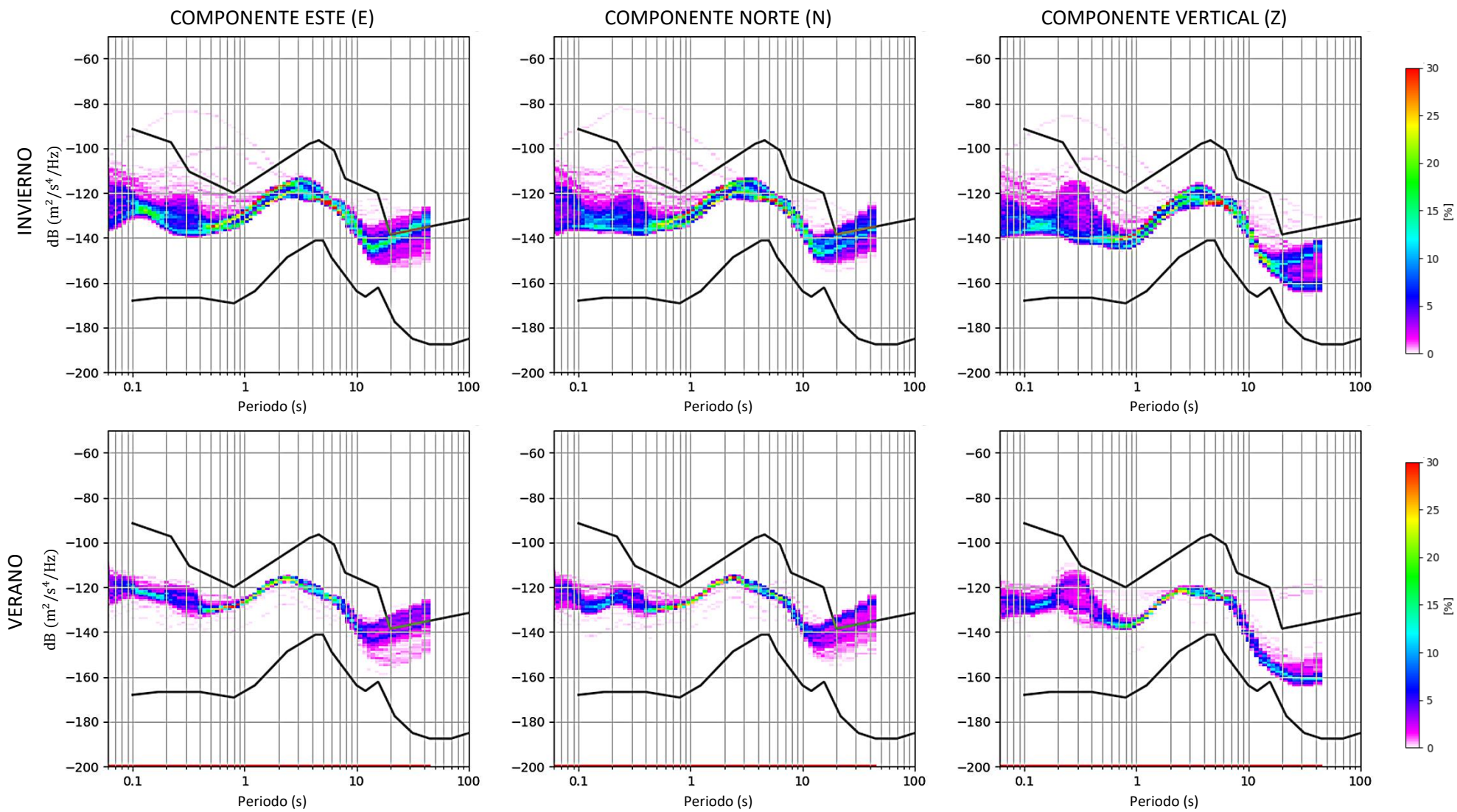
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA TICAPAMPA (TICA)



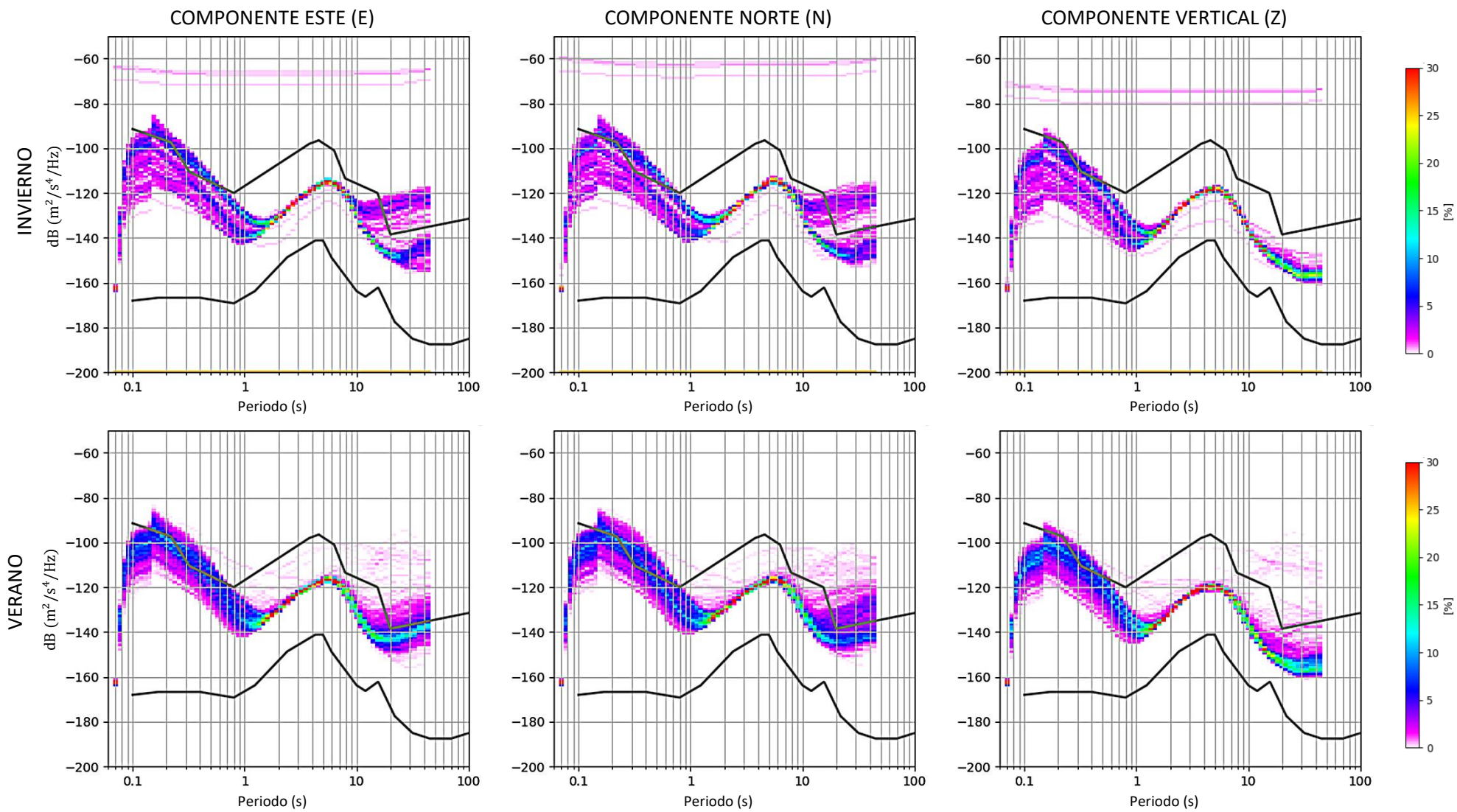
VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA YANACACHI (YANA)



VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA YAUCA (YCA0)



VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA HUAYLAS (YLS0)



VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA ESTACIÓN SÍSMICA YURIMAGUAS (YRM0)