

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**“GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS  
APLICABLES A LA REGIÓN DE QUITO- ECUADOR”**

**AUTOR:**

**ALEXANDER PAREDES**

**DIRECTOR:**

**ING. CARLOS CELI, M.Sc**

**QUITO, 2019**



## **Dedicatoria**

A mi mamá Jéssica Calderón, que me ha dado todo en la vida: sus consejos, su tiempo, su sabiduría, su actitud, su juventud. Me ha apoyado en todas las circunstancias y me ha hecho ver las cosas de otro modo. Sé que siempre estará para mí en todo momento, tanto en los buenos y mucho más en los malos momentos durante toda mi vida.

A mi papá Carlos Obando, gran hombre. Digno ejemplo de que el que quiere, puede salir adelante pese a cualquier circunstancia. Me ha inculcado que con actitud, perseverancia y constancia se logra todo en esta vida. También ha sabido aconsejarme en momentos en los que lo he necesitado y me ha dado ese empujón para salir adelante.

A mis abuelitas, que a pesar de no tenerlas cerca todo el tiempo siempre se han preocupado por mí y siempre me desean lo mejor de corazón.



## **Agradecimientos**

A Dios, que me ha cuidado en todo momento y me he bendecido con una gran familia.

A mis padres por haberme dado lo más valioso en esta vida, entre otras cosas, el estudio y su constante motivación a ser mejor día a día.

A mi director de tesis Ing. Carlos Celi, que me ha apoyado en el desarrollo de este trabajo de investigación en todo momento de principio a fin para que sea finalizado de la mejor manera posible.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería que brindaron sus valiosos conocimientos durante toda la carrera además de su amistad.

A mis compañeros, amigos de clase que estuvieron ahí, supieron apoyarme y darme su mano en todo momento.



*Incluso el peor sismo tiene algunas virtudes: que al estudiarlo podemos aprender algo sobre la estructura de la tierra, sobre las causas de los sismos y sobre cómo podemos protegernos de su daño.*

John H. Hodgson, 1964

## Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad la generación de acelerogramas sintéticos aplicables a la región de Quito- Ecuador cuyos espectros de respuesta se ajusten al espectro objetivo que propone la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC Committee, 2014). Para ello se cuenta con 120 registros reales provenientes de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador [RENAC] (Geofísico, 2019) cuyas magnitudes  $M_L$  y  $M_W$  oscilan entre 2.5 a 5.1.

La generación de acelerogramas sintéticos requiere calcular parámetros de los registros reales como: intensidad de Arias, duración significativa, aceleración pico del suelo donde este colocado el acelerógrafo [PGA] por sus siglas en inglés, contenido frecuencial, periodo predominante y amplitudes máximas, entre otros.

A partir de la confección de la base de datos de registros reales, solo ciertos registros se emplearán en la posterior confección de acelerogramas sintéticos; puesto que no todos los registros reales cumplen con una cierta variación espectral [valor obtenido al dividir el espectro objetivo con el espectro calculado del acelerograma sintético, la literatura sugiere que los mismos oscilen entre 1 – 3] (Flores & Ayes, 2018) esperada para los varios periodos de retorno sísmico establecidos en la presente investigación.

En una primera etapa, de la base de datos se calcularán espectros de respuesta empleando la técnica Beta de Newmark (Chopra, 2012) durante la duración significativa con un factor de amortiguamiento del 5%, se graficarán frente al espectro objetivo NEC para suelo tipo “C” [suelo característico del Centro Histórico del DMQ] (Carlos Celi & Moyano, 2017) y se desecharán los registros cuya variación espectral sea mayor a 7. Posteriormente, se realizarán combinaciones usando de 3 a 4 partes de los registros válidos [dentro de la duración significativa] creando así acelerogramas sintéticos y se calculará los espectros de respuesta de estos. Finalmente, se tomarán como válidos los acelerogramas sintéticos cuya variación espectral sea mayor a 1 y menor a 3.

De los resultados obtenidos de la presente investigación, se observa que la metodología propuesta deriva en acelerogramas que satisfacen las condiciones de variación espectral, contenido frecuencial y energía esperada para la amenaza sísmica intrínseca del Distrito Metropolitano de Quito [DMQ].

## Abstract

The purpose of this work is to generate synthetic accelerograms applicable to the Quito-Ecuador region whose response spectra conform to the objective spectrum proposed by the Ecuadorian Construction Regulations (NEC Committee, 2014). For this, there are 120 real records from the National Network of Accelerators of Ecuador [RENAC] (Instituto Geofísico, 2016) whose magnitudes  $M_L$  and  $M_W$  range between 2.5 to 5.1.

The generation of synthetic accelerograms requires calculating parameters of the real records such as: Arias intensity, significant duration, peak ground acceleration [PGA] where the accelerometer is placed, frequency content, predominant period and maximum amplitudes, among others.

As of the preparation of the database of real records, only certain records will be used in the subsequent preparation of synthetic accelerograms; due not all real records comply with a certain spectral variation [value obtained by dividing the target spectrum with the calculated spectrum of the synthetic accelerogram, the literature suggests that they range between 1 - 3] (Flores & Ayes, 2018) expected to various return periods established in this investigation.

In a first stage, response spectra will be calculated from the database using the Newmark Beta technique (Chopra, 2012) within the significant duration with a damping factor of 5%, plotted against the NEC target spectrum for soil type “C” [characteristic soil of the DMQ] (Carlos Celi & Moyano, 2017) and records whose spectral variation is greater than 7 will be discarded. Subsequently, combinations will be made using 3 to 4 parts of the valid records [within the significant duration] thus creating synthetic accelerograms and the response



spectra of these will be calculated. Finally, synthetic accelerograms whose spectral variation is greater than 1 and less than 3 will be considered valid.

From the results obtained in this research, it is observed that the proposed methodology derives in accelerograms that satisfy the conditions of spectral variation, frequency content and expected energy for the intrinsic seismic threat of the DMQ.

## Contenido

Dedicatoria .....	I
Agradecimientos .....	II
Resumen .....	IV
Abstract .....	V
1.    CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Antecedentes.....	1
1.3    Justificación.....	2
1.4    Hipótesis.....	3
1.5    Objetivos .....	4
1.5.1        Objetivo general .....	4
1.5.2        Objetivos específicos .....	4
1.6    Alcance.....	4
1.7    Metodología.....	5
2.    CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	5
2.1    Estructura de la tierra .....	6
2.1.1        Teoría de la tectónica de placas .....	7
2.2    Sismos: definición, características y causas .....	8
2.2.1        Teoría del rebote elástico .....	9
2.2.2        Sismos preliminares y réplicas .....	10
2.3    Ondas sísmicas .....	11
2.3.1        Ondas internas .....	11
2.3.1.1            Ondas Longitudinales .....	11
2.3.1.2            Ondas Transversales .....	12
2.3.2        Ondas superficiales .....	13
2.3.2.1            Ondas Rayleigh .....	13
2.3.2.2            Ondas Love .....	14
2.4    Escala de Intensidad .....	15
2.5    Sismógrafos y Sismogramas .....	16
2.5.1        Sismógrafos .....	16
2.5.1.1            RENSIG .....	17

2.5.2	Sismogramas .....	17
2.6	Profundidad de los sismos .....	23
2.7	Escalas de Magnitud .....	23
2.7.1	Magnitud de Richter .....	23
2.7.2	Magnitud de onda superficial .....	25
2.7.3	Magnitud de momento .....	25
2.7.3.1	Momento sísmico .....	26
2.8	Acelerógrafos y acelerogramas .....	26
2.8.1	Acelerógrafos .....	27
2.8.1.1	RENAC .....	28
2.8.2	Acelerogramas .....	29
2.9	Duración de un sismo .....	30
2.9.1	Intensidad de Arias .....	30
2.9.2	Duración significativa .....	31
2.10	PGD, PGV y PGA .....	32
2.11	Respuesta en el tiempo- Integral de Duhamel .....	33
2.12	Respuesta en el tiempo- Beta de Newmark .....	35
2.13	Espectro de respuesta .....	38
2.14	Espectro elástico de diseño NEC .....	40
2.14.1	Factor de zona sísmica $Z$ .....	41
2.14.2	Curvas de peligro sísmico .....	41
2.14.3	Tipos de perfiles de suelo .....	42
2.14.4	Coefficientes de perfil de suelo $F_a, F_d, F_s$ .....	43
2.14.4.1	Coefficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto ..	44
2.14.4.2	Amplificación de las ordenadas del $S_d$ elástico para diseño en roca	44
2.14.4.3	Comportamiento no lineal de los suelos .....	44
2.15	Análisis de Fourier .....	47
2.15.1	Serie trigonométrica de Fourier .....	48
2.15.2	Serie exponencial compleja de Fourier .....	49
2.15.3	Transformada de Fourier .....	50
2.15.4	Transformada de Fourier para movimiento del suelo .....	52
2.15.5	Transformada discreta de Fourier .....	52
2.15.6	Transformada rápida de Fourier .....	54

2.15.7	Suavizado de espectros de Fourier .....	58
2.16	Acelerogramas sintéticos .....	59
2.16.1	Escalado Lineal .....	60
2.16.2	Escalado en el Dominio de la frecuencia .....	60
2.16.3	Escalado en el Dominio del tiempo .....	61
3.	<b>CAPÍTULO III: GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS .....</b>	<b>61</b>
3.1	Obtención de registros reales de la RENAC .....	61
3.2	Características de la base de datos .....	63
3.2.1	PGA y duración significativa .....	63
3.2.2	Espectros de respuesta .....	66
3.2.3	Espectros de diseño elástico .....	67
3.2.4	Espectros de Fourier .....	68
3.2.5	Periodos predominantes .....	69
3.2.6	Variación espectral .....	70
3.3	Generación de Acelerogramas Sintéticos.....	70
3.3.1	Espectro de respuesta de la base de Acelerogramas Sintéticos.....	72
3.3.2	Variación espectral de los Acelerogramas Sintéticos .....	72
3.3.3	Acelerogramas Sintéticos Válidos.....	72
3.3.4	Análisis de Fourier de los Acelerogramas Sintéticos Válidos .....	72
4.	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
4.1	Registros reales.....	73
4.2	Registros reales válidos.....	73
4.3	Acelerogramas sintéticos válidos .....	75
5.	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>75</b>
6.	<b>ANEXOS.....</b>	<b>77</b>
6.1	Mapas .....	77
6.2	Acelerogramas reales .....	89
6.3	Duración significativa de los acelerogramas reales .....	93
6.4	Espectros de respuesta del acelerogramas reales.....	97
6.5	Espectros de diseño elástico NEC .....	98
6.6	Análisis de Fourier.....	99
6.7	Periodos de la base de datos.....	123
6.8	Variación espectral de registros reales válidos.....	125

6.9	Registros reales válidos para generación de acelerogramas sintéticos .....	129
6.10	Espectros de respuesta de registros válidos para generación de acelerogramas sintéticos.....	133
6.11	Acelerogramas sintéticos .....	137
6.12	Espectros de respuesta de acelerogramas sintéticos .....	200
6.13	Variación espectral acelerogramas sintéticos.....	204
6.14	Acelerogramas sintéticos válidos .....	208
6.15	Espectros de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos .....	222
6.16	Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos.....	226
6.17	Scripts para generación de acelerogramas sintéticos.....	230
6.17.1	Parte 1 .....	230
6.17.2	Parte 2 .....	230
6.17.3	Parte 3 .....	230
6.18	Base de datos de Acelerogramas reales .....	230

## **Contenido de figuras**

Fig 1-1:	Mapa de peligro sísmico, periodo de retorno 475 años. ....	3
Fig 2-1:	Estructura interna de la tierra. ....	6
Fig 2-2:	Capas por composición vs Capas por propiedades físicas. ....	7
Fig 2-3:	Esquema del proceso de un sismo. ....	8
Fig 2-4:	Esquema del proceso del rebote elástico. ....	10
Fig 2-5:	Modelo de movimiento característico de la Onda P. ....	12
Fig 2-6:	Modelo de movimiento característico de la onda S.....	12
Fig 2-7:	Registro típico. ....	13
Fig 2-8:	Modelo del movimiento característico de la onda Rayleigh. ....	13
Fig 2-9:	Modelo de movimiento característico de la onda Love. ....	14
Fig 2-10:	Sismógrafo que registra componente a) horizontal y b) vertical.....	17
Fig 2-11:	Horas GMT de un sismograma.....	18

Fig 2-12: Porción inicial ampliada de un sismograma.....	18
Fig 2-13: Discontinuidad de Gutenberg- Onda P. ....	20
Fig 2-14: Discontinuidad de Gutenberg- Onda S. ....	20
Fig 2-15: Epicentro evento sísmico. ....	22
Fig 2-16: Profundidad focal de un evento sísmico. ....	22
Fig 2-17: Datos de un sismograma para escala <i>ML</i> . ....	24
Fig 2-18: Representación esquemática acelerógrafo que registra componente vertical. ....	28
Fig 2-19: Acelerogramas componentes ortogonales del registro del 29/10/2011 Estación CIRC. ....	28
Fig 2-20: Estaciones Acelerográficas del DMQ. ....	29
Fig 2-21: Acelerograma típico (duración=24.96 seg). ....	29
Fig 2-22: Intensidad de Arias del Acelerograma de la Fig 2-21. ....	31
Fig 2-23: Duración significativa en el gráfico de Husid de la Fig 2-22. ....	31
Fig 2-24: Duración significativa del Acelerograma de la Fig 2-21. ....	32
Fig 2-25: PGA del Acelerograma de la Fig 2-21. ....	33
Fig 2-26: Sistema de 1 GDL sometido a excitación en su base. ....	34
Fig 2-27: Notación para método paso a paso en el tiempo. ....	36
Fig 2-28: Respuesta en el tiempo- Método de Newmark para una estructura dada. ....	38
Fig 2-29: Espectro de respuesta en aceleración. ....	40
Fig 2-30: Curvas de peligro sísmico, Quito. ....	41
Fig 2-31: Espectro de diseño elástico en aceleración. ....	47
Fig 2-32: Señal periódica, $f=8$ [hz], $A=8$ . ....	47
Fig 2-33: Espectro de Fourier de la Fig 2-32. ....	48
Fig 2-34: Secuencia finita $\{x_j\}$ . ....	55
Fig 2-35: Secuencias cortas provenientes de $x_j$ . ....	55
Fig 2-36: Espectro de Fourier del Acelerograma de la Fig 2-21. ....	58

Fig 2-37: Espectro de Fourier del Acelerograma de la Fig 2-21 durante la Duración significativa. ....58

Fig 3-1: Formato archivo .txt de registros de la RENAC. ....63

Fig 3-2: Espectros NEC para varios periodos de retorno.....67

Fig 3-3: Espectro suavizado de Fourier del Registro 1001. ....68

Fig 3-4: Variación de la frecuencia vs amplitud del espectro de Fourier de la Fig 3-3.....69

## Contenido de tablas

Tabla 2-1: Características de la estructura de la tierra. ....6

Tabla 2-2: Clasificación de los perfiles de suelo. ....43

Tabla 2-3: Tipo de suelo y factores de sitio  $F_a$ . ....44

Tabla 2-4: Tipo de suelo y factores de sitio  $F_d$ . ....44

Tabla 2-5: Tipo de suelo y factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$ . ....45

Tabla 2-6: Parámetros para  $S_a$  de la Fig 2-31. ....46

Tabla 3-1: Registros reales 1 de la RENAC. ....61

Tabla 3-2: Registros reales 2 de la RENAC. ....62

Tabla 3-3: Coordenadas de estaciones RENAC. ....63

Tabla 3-4: PGA de la base de datos. ....65

Tabla 3-5: Duración significativa de la base de datos. ....66

Tabla 3-6:  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$  para diferentes periodos de retorno.....68

Tabla 3-7: Acelerogramas sintéticos, representado por combinaciones de cada registro real.  
.....71

Tabla 4-1: PGA y Dur. Significativa de registros reales válidos.....74

Tabla 4-2: Periodos predominantes de los registros válidos para generación de acelerogramas sintéticos ..... 74

### Contenido de ecuaciones

Ecuación 2-1: Velocidad de propagación de la onda P..... 11

Ecuación 2-2: Velocidad de propagación de la onda S..... 12

Ecuación 2- 3: Escala JMA en función de MMI. .... 15

Ecuación 2-4: Intervalo de llegada entre onda S y onda P..... 21

Ecuación 2-5: Distancia hipocentral en función del intervalo de llegada entre onda S y onda P. .... 21

Ecuación 2-6: Magnitud Richter o Local. .... 24

Ecuación 2-7:  $A_0$  para distancias epicentrales mayores a 100 km. .... 24

Ecuación 2-8: Magnitud de onda superficial..... 25

Ecuación 2- 9: Magnitud de momento ..... 26

Ecuación 2-10: Momento sísmico. .... 26

Ecuación 2-11: Intensidad de Arias. .... 30

Ecuación 2-12: Ecuación diferencial del movimiento del sistema de la Fig 2-26..... 35

Ecuación 2-13: Ecuación diferencial del movimiento del sistema de la Fig 2-26..... 35

Ecuación 2-14: Respuesta del sistema de la Fig 2-26..... 35

Ecuación 2-15: Respuesta en velocidad. .... 37

Ecuación 2-16: Respuesta en desplazamiento..... 37

Ecuación 2-17: Respuesta en aceleración. .... 37

Ecuación 2-18: Convergencia de Método de Newmark. .... 37

Ecuación 2-19: Estabilidad del Método de Newmark. .... 37

Ecuación 2-20: Máxima respuesta absoluta de desplazamiento..... 39



Ecuación 2-21: Máxima respuesta absoluta de velocidad relativa. ....	39
Ecuación 2- 22: Máxima respuesta absoluta de aceleración. ....	39
Ecuación 2-23: Máximas respuestas absolutas de desplazamiento, velocidad y aceleración. .....	39
Ecuación 2-24: Aceleración correspondiente a la meseta del espectro. ....	46
Ecuación 2-25: Aceleración correspondiente a la cola del espectro.....	46
Ecuación 2-26: Serie trigonométrica de Fourier.....	48
Ecuación 2-27: Serie exponencial compleja de Fourier.....	49
Ecuación 2-28: Transformada inversa de Fourier. ....	51
Ecuación 2-29: Transformada de Fourier.....	51
Ecuación 2-30: Transformada discreta de Fourier.....	53
Ecuación 2-31: Ecuaciones bases para la FFT. ....	57
Ecuación 2-32: Smoothing Function. ....	59
Ecuación 3-1:Combinaciones sin repetir.....	71

## 1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

Al realizar cualquier diseño sismorresistente, ya sea desde la perspectiva estructural o geotécnica, es imprescindible determinar las características de los movimientos sísmicos esperados en la zona de interés (Flores & Ayes, 2018); es por esta razón que el presente trabajo enfoca sus esfuerzos en generar acelerogramas sintéticos [representación gráfica de un registro sintético] que puedan representar la amenaza sísmica del Distrito Metropolitano de Quito [DMQ] {dentro de un rango de probabilidad aceptable} a partir de registros reales, provistos por el Instituto Geofísico [IG-EPN] con base en las mediciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador [RENAC].

Posteriormente, los acelerogramas sintéticos obtenidos en la presente investigación serán empleados dentro de la confección de curvas de fragilidad de estructuras de baja ductilidad del centro histórico del DMQ [*Determinación de la capacidad estructural de edificaciones del Centro Histórico de Quito mediante el método de elementos finitos {FEM} Macromodels* (J. Vargas, 2019)]; cuyos resultados a su vez serán empleados para expandir la base de datos del estudio de vulnerabilidad sísmica del DMQ (C. Celi, Pantoja, Sosa, & Ayala, 2018)

### 1.2 Antecedentes

La generación de acelerogramas sintéticos es un tema estudiado mundialmente pero pobremente implementado en la región (C. Celi & Arellano, 2014). No obstante, se han desarrollado ya varias técnicas o procedimientos para la generación de registros sintéticos como por ejemplo: escalado lineal, escalado en el dominio del tiempo, escalado en el dominio de la frecuencia (Carreño, Bravo, Suárez, & Tordesillas, 1999) y adición de ondas wavelets las cuales modifican un registro real para ajustarlo a un espectro objetivo

(Flores & Ayes, 2018) con el fin de representar de mejor manera la amenaza sísmica de un sector que no cuenta con una data suficiente dentro del análisis de completitud sísmica.

Las técnicas mencionadas poseen ventajas y limitaciones en la aproximación frecuencial, energética, duración significativa, etc. frente a los registros reales; es decir, no existe un proceso matemático capaz de generar registros sintéticos sin incertidumbre, debido su desarrollo matemático intrínseco y la misma naturaleza no periódica- no armónica de los eventos sísmicos. No obstante, para la determinación de la resiliencia de estructuras de baja ductilidad es necesario conocer la amenaza sísmica a lo largo del tiempo [ajustada lo mejor posible a la realidad] (Chopra, 2012; Vielma, 2017).

### 1.3 Justificación

Con base en Análisis Dinámico Incremental [IDA] por sus siglas en inglés, se determinan curvas de fragilidad las cuales permiten estimar la probabilidad de exceder un estado límite de daño cuando se produce una determinada acción sísmica (Vielma, Alfaro, & Barrios, 2014). Como datos de entrada para este análisis [no lineal], es fundamental definir acelerogramas sintéticos compatibles con el espectro elástico de diseño correspondiente al lugar de emplazamiento de las estructuras.

Por otro lado, de acuerdo a la NEC- SE- DS, 2014 (NEC Committee, 2014) y (Beauval et al., 2018), en el Distrito Metropolitano de Quito se esperan aceleraciones en el estrato competente (roca), entre 0.40g – 0.60g correspondientes a un periodo de retorno sísmico de 475 años (ver Fig 1-1); si adicional a lo mencionado, observamos los resultados preliminares del estudio de Vulnerabilidad Sísmica del DMQ (C. Celi, Pantoja, Sosa, & Ayala, 2017) en el que se prevé que las estructuras patrimoniales del Centro Histórico del DMQ poseen baja ductilidad (debido a su filosofía de construcción y materiales), la necesidad de describir de mejor manera la amenaza sísmica en el tiempo toma fundamental importancia en el proceso de estimar la vulnerabilidad sísmica de las mencionadas estructuras.

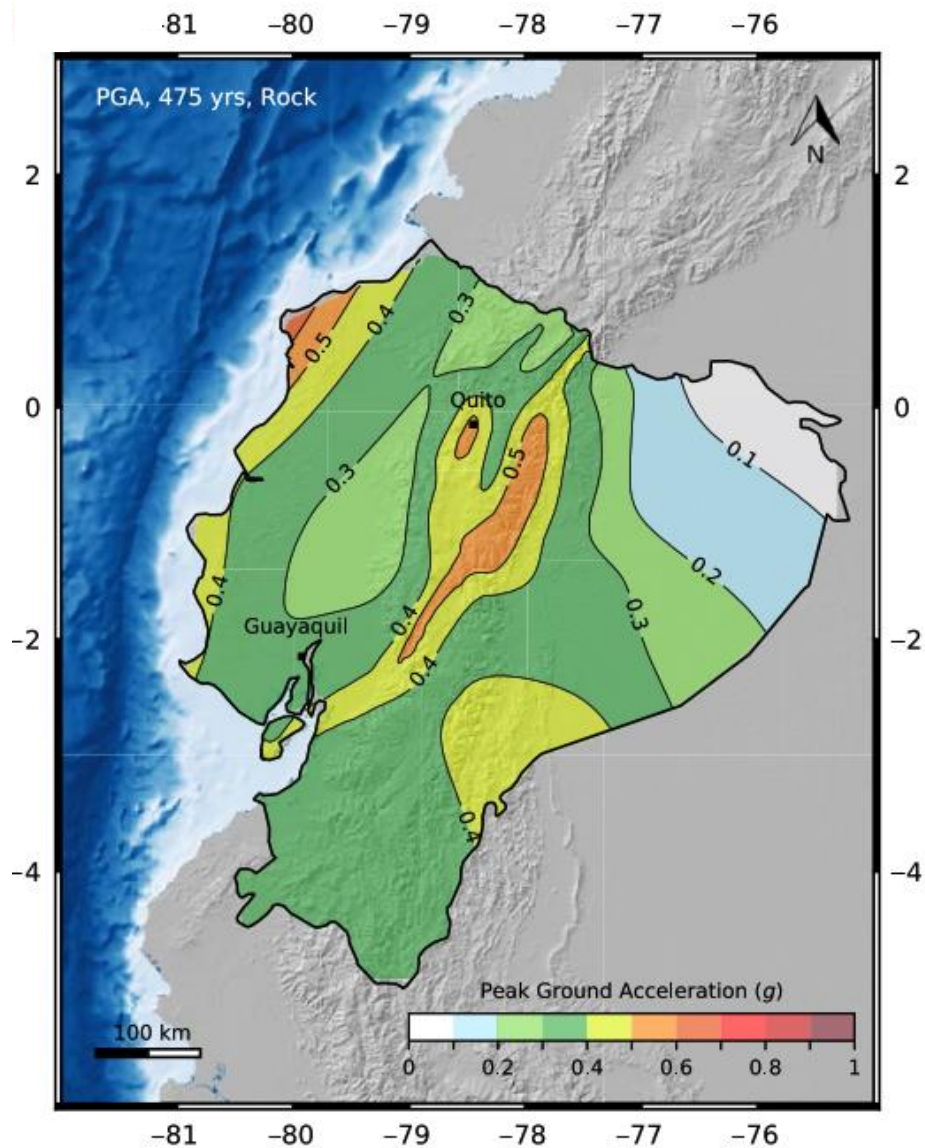


Fig 1-1: Mapa de peligro sísmico, periodo de retorno 475 años. (Beauval et al., 2018)

#### 1.4 Hipótesis

Los eventos sísmicos que se producen en el campo cercano del Distrito Metropolitano de Quito poseen un contenido frecuencial que puede inducir un pobre desempeño de estructuras de baja ductilidad (Beauval et al., 2018)

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

- ✓ Generar acelerogramas sintéticos aplicables a la región de Quito, Ecuador.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- ✓ Obtener base de datos con base en los eventos sísmicos registrados en la RENAC.
- ✓ Calcular parámetros característicos de los registros de la base de datos, tales como PGA, intensidad de Arias y duración significativa.
- ✓ Determinar el contenido frecuencial característico y amplitudes máximas de los registros de la base de datos.
- ✓ Generar acelerogramas sintéticos a partir de los registros de la base de datos, cuyos espectros de respuesta se ajusten al espectro objetivo propuesto por la NEC.
- ✓ Determinar el contenido frecuencial característico de los acelerogramas sintéticos.

## 1.6 Alcance

Con base en la información que se recolecte de la RENAC se procederá a generar acelerogramas sintéticos de distintas amplitudes que se ajusten al espectro objetivo para diferentes periodos de retorno.

## 1.7 Metodología

Es necesario realizar un análisis detallado a los registros reales con el fin de obtener características tales como: intensidad de Arias, duración significativa, contenido frecuencial entre otros; dichos parámetros a través de distintos procesos y filosofías permiten descartar los registros que no se ajusten a la finalidad del presente trabajo.

Empleando la Transformada Rápida de Fourier [FFT] por sus siglas en inglés, a los registros de reales, se obtendrá el contenido frecuencial de los mismos. Se generará una base de datos en la que se cuantificará las frecuencias, periodos predominantes y amplitudes máximas. A partir de esta base de datos, se generarán los acelerogramas sintéticos que se ajusten al espectro objetivo NEC.

Todo el proceso se realiza en software desarrollado en la plataforma MATrix LABoratory [MATLAB], el cual trabaja esencialmente con operaciones entre matrices. Del mismo se usará una característica esencial la cual es el procesamiento de señales. La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas científicos y de ingeniería. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. ([The MathWorks, Inc, 2019](#))

## **2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

A continuación, se definen los términos que involucran el desarrollo de la presente investigación.

## 2.1 Estructura de la tierra

La tierra es un cuerpo aproximadamente esférico de 6370 kilómetros de radio. Su estructura interna consta de 4 capas concéntricas (ver Fig 2-1), la cual ha sido deducida comparando las vibraciones en diferentes puntos de la superficie de la tierra en el instante de un sismo. (Okamoto, 1984)

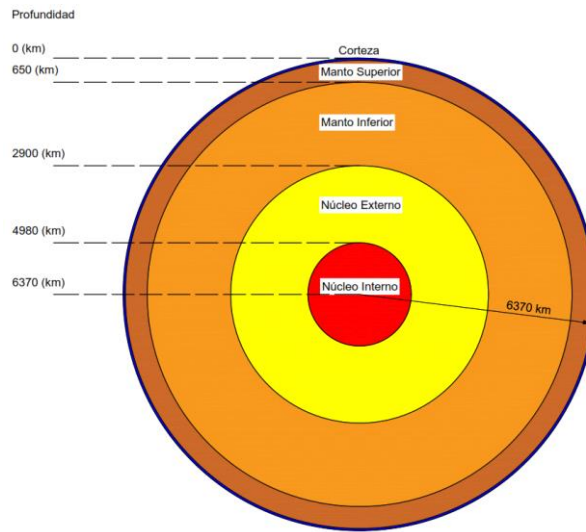


Fig 2-1: Estructura interna de la tierra. (Villaverde, 2009)

Las características de las capas de la tierra definidas por su composición se detallan en la Tabla 2-1.

Capa	Espesor (km)	Gravedad Específica	Estado	Compuesto
Núcleo Interno	1390	17,2	Sólido	Níquel y hierro
Núcleo Externo	2080	9,7	Líquido	Hierro, oxígeno y silicio
Manto Inferior	2250	5,6	Viscoso	Rocas de granito, basalto, sílice.
Manto Superior	635	3,3	Viscoso	Rocas de granito. Basalto y sílice
Corteza Oceánica	4-6	2,7-3,0	Líquido	Rocas de granito y basalto
Corteza Continental	25-60	2,7-3,0	Sólido	Rocas de granito y basalto

Tabla 2-1: Características de la estructura de la tierra. (Okamoto, 1984; Villaverde, 2009)

Existen capas definidas por sus propiedades físicas, como sigue: la capa que envuelve los 250 km más externos de esta (incluida la corteza) se denomina litósfera. Por debajo de la litósfera se encuentra la astenósfera con un espesor aproximado de 660 km. Sobre la astenósfera se encuentra la mesósfera con un espesor de 2240 km, núcleo externo con espesor de 2270 km y núcleo interno con espesor de 1216 km (ver Fig 2-2). La composición de estas capas es de material rocoso, se diferencian por su rigidez. (Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005)

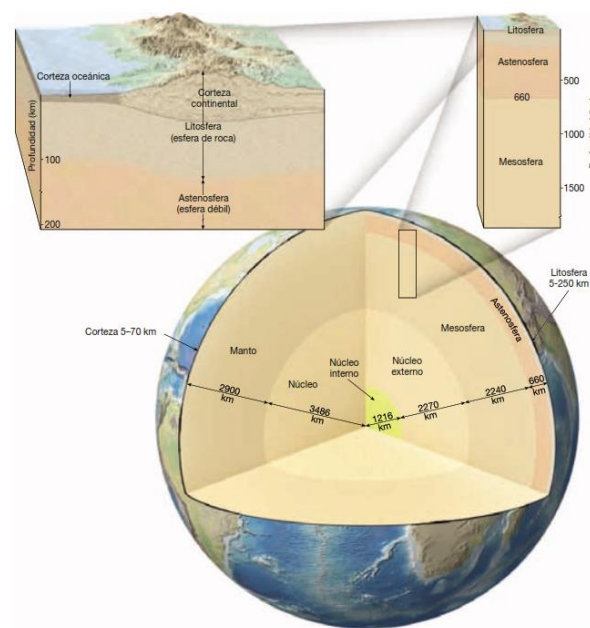


Fig 2-2: Capas por composición vs Capas por propiedades físicas. (Tarbuck et al., 2005)

### 2.1.1 Teoría de la tectónica de placas

Basada en la teoría de la deriva continental propuesta por Alfred Wegener en 1915. Esta teoría postula que la corteza terrestre se fractura y por lo tanto se divide en piezas grandes y rígidas conocidas como placas, cuyos tamaños varían entre cientos y miles de kilómetros. También esta teoría postula que estas placas flotan en la astenósfera, se mueven relativamente una respecto de otra liberando gran cantidad de energía. Se conocen las siguientes interacciones:

- ✓ Divergencia, las placas se separan entre sí y se crean grietas.

- ✓ Convergencia, las placas se acercan entre sí (chocan de frente o una se sumerge debajo de otra). Cuando la placa continental y la placa oceánica convergen, se genera una zona de subducción.
- ✓ Desliz una sobre otra, generando fallas transformantes como la de San Andrés.

## 2.2 Sismos: definición, características y causas

Un sismo es un fenómeno de fuertes vibraciones en el suelo debido a la liberación de una gran cantidad de energía en un corto período de tiempo a través de una perturbación repentina en la corteza terrestre o en la parte superior del manto. (Okamoto, 1984)

La ubicación en donde se genera la ruptura de la falla se denomina foco o hipocentro (ver Fig 2-3) y la proyección de este sobre la superficie de la tierra se denomina epicentro. La distancia entre el hipocentro y el epicentro se conoce como la profundidad focal.

Los sismos que se generan en una interacción divergente entre placas suelen ser de baja magnitud (ver Sección 2.7 Escalas de Magnitud), por el contrario, la subducción de placas da lugar a algunos de los sismos más poderosos del mundo. De hecho, casi el 90% de la energía sísmica liberada por el movimiento de la placa tectónica proviene de los sismos generados en las zonas de subducción.

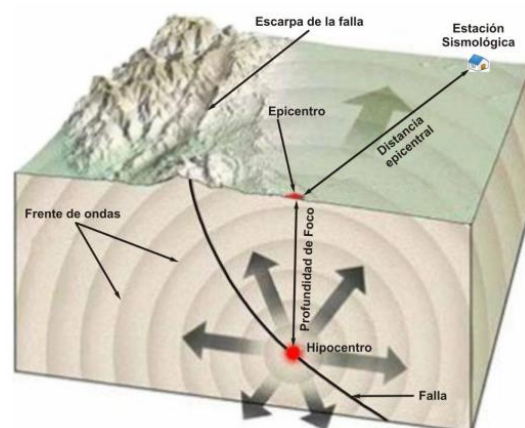


Fig 2-3: Esquema del proceso de un sismo. (Tarbuck et al., 2005)

Aunque la gran mayoría de los sismos ocurren en los límites de las placas, algunas regiones sísmicas del mundo están muy lejos de los límites de las placas. Esta sismicidad se conoce como **sismicidad interplaca** y constituye una manifestación de la deformación interna de una placa. La falta de una explicación satisfactoria de los sismos interplaca es una de las debilidades de la teoría tectónica de placas. (Villaverde, 2009)

Debe reconocerse que el movimiento relativo entre placas no puede proporcionar, por sí solo, una explicación satisfactoria del origen de los sismos, ya que un movimiento relativo constante entre placas no puede producir las vibraciones violentas de la corteza terrestre que caracterizan un sismo. La explicación completa la da la teoría del **rebote elástico** formulada por Harry F. Reid, de la Universidad Johns Hopkins, poco después del sismo de San Francisco- California en 1906. (Villaverde, 2009). Como antecedente se tiene que, Bunjiro Koto (geólogo japonés) en 1891, sugirió que una ruptura en el suelo que se extendía casi por completo a través de la principal isla japonesa de Honshu fue responsable del devastador sismo de Mino Owari.

### 2.2.1 Teoría del rebote elástico

La teoría del rebote elástico (ver Fig 2-4) de Reid afirma que: *“Los sismos son el resultado de la liberación repentina de tensiones que se acumulan gradualmente en las rocas en los lados opuestos de una falla cuando estos lados opuestos tienden a moverse uno con respecto al otro, pero el movimiento es inicialmente impedido por fuerzas de fricción. Cuando las tensiones acumuladas se hacen más grandes que la fuerza de fricción entre los dos lados, la falla comienza a deslizarse en su punto más débil y se rompe rápidamente a lo largo de toda su superficie. Unos segundos después, la roca a ambos lados de la falla se recupera, o vuelve a saltar, a una posición sin restricciones y la energía elástica almacenada se libera en forma de calor y ondas sísmicas radiantes”*. (Villaverde, 2009)

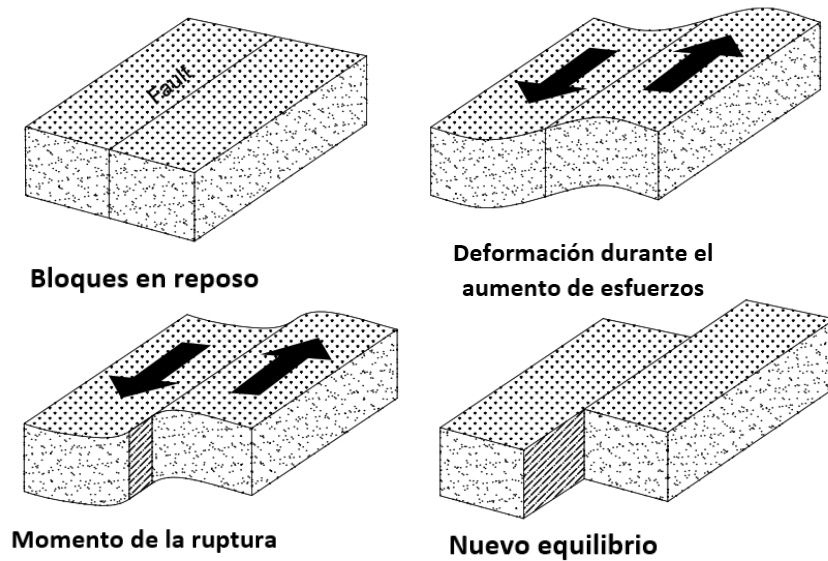


Fig 2-4: Esquema del proceso del rebote elástico. (Villaverde, 2009)

Adicionalmente, los conceptos detrás de la teoría del rebote elástico no solo sirven para explicar el mecanismo que genera los sismos, sino también para desarrollar una técnica para determinar la orientación de la falla causal. (Villaverde, 2009)

## 2.2.2 Sismos preliminares y réplicas

Un evento sísmico de gran magnitud está precedido por sismos preliminares y réplicas que se originan aproximadamente en el mismo lugar. Los sismos preliminares son los precursores de la ruptura de la falla que genera el sismo principal y en general son pequeños en número y tamaño, por el contrario, las réplicas son el resultado de ajustes a los desequilibrios de tensión producidos por dicha ruptura y pueden ser relativamente grandes en número y tamaño.

## 2.3 Ondas sísmicas

Como se describió en la teoría del rebote elástico, la energía sísmica almacenada se libera en forma de ondas sísmicas. Existen 2 tipos:

- ✓ Ondas internas o de cuerpo: son ondas P y ondas S.
- ✓ Ondas superficiales: son ondas Rayleigh y ondas Love.

Las ondas sísmicas pueden generar:

- ✓ Amplificación: los sedimentos blandos amplifican las vibraciones del suelo más que un estrato de roca sólida.
- ✓ Licuefacción: en áreas donde los materiales no consolidados están saturados con agua, las vibraciones del sismo pueden transformar el suelo en un fluido móvil que no es capaz de soportar ninguna edificación.

### 2.3.1 Ondas internas

Este tipo de ondas se transmiten a través del interior de la tierra y nacen en el foco del sismo hasta llegar a la superficie.

#### 2.3.1.1 Ondas Longitudinales

O denominadas P, primarias. Son ondas de cuerpo que comprimen y expanden (Tarbuck et al., 2005) el medio elástico (ver Fig 2-5). Son las más veloces, por lo tanto, las primeras que registran los sismógrafos. Atraviesan tanto líquidos, sólidos y gases en el interior de la tierra.

La velocidad de propagación de la onda P, está dada por la Ecuación 2-1.

$$\alpha = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

Ecuación 2-1: Velocidad de propagación de la onda P. (Okamoto, 1984)

Donde:

- E= Módulo de Young;
- $\rho$ = densidad; y
- $\sigma$ = relación de Poisson.

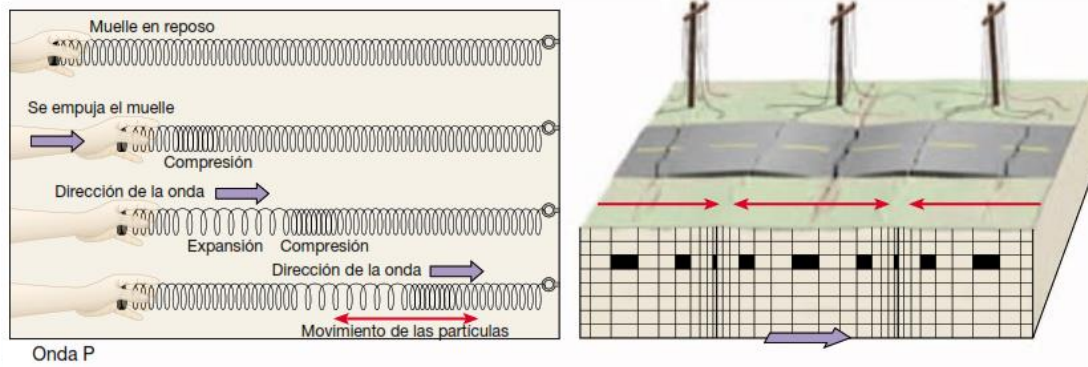


Fig 2-5: Modelo de movimiento característico de la Onda P. (Tarbuck et al., 2005)

### 2.3.1.2 Ondas Transversales

O denominadas S, secundarias. Son ondas de cuerpo que se propagan perpendicularmente en el sentido de vibración de las partículas (ver Fig 2-6). Son más lentas que las anteriores, por lo tanto, las segundas que registran los sismógrafos. Atraviesan únicamente sólidos. (Okamoto, 1984).

La velocidad de propagación de la onda S, está dada por la Ecuación 2-2.

$$\beta = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}}$$

Ecuación 2-2: Velocidad de propagación de la onda S. (Okamoto, 1984)

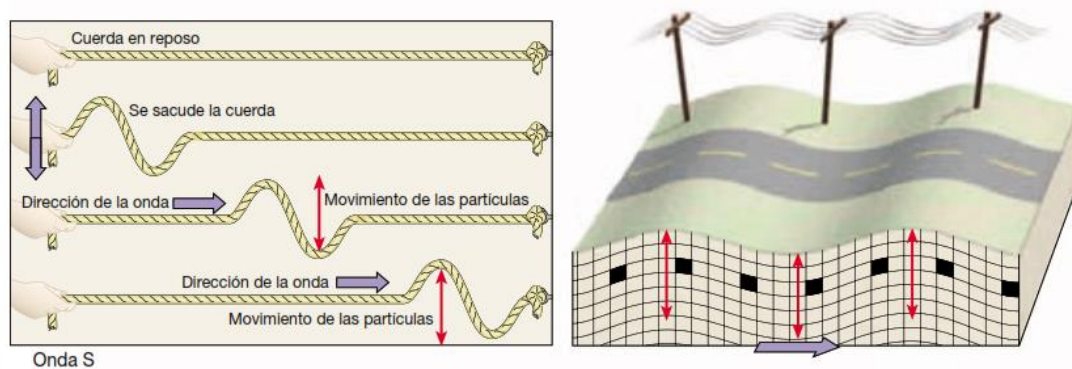


Fig 2-6: Modelo de movimiento característico de la onda S. (Tarbuck et al., 2005)

### 2.3.2 Ondas superficiales

Su movimiento es más complejo, son aquellas que se propagan en zonas de discontinuidad en el interior de la tierra y por la superficie de esta. Resultan de la interacción de las ondas P y S. Se propagan a partir del epicentro y son las últimas que se distinguen en un registro (ver Fig 2-7). Son capaces de viajar a través de sólidos y líquidos. (Villaverde, 2009)

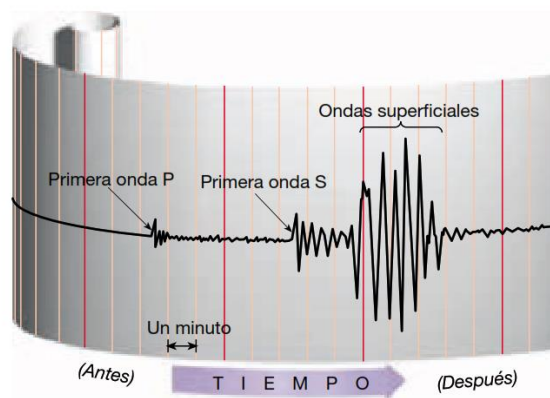


Fig 2-7: Registro típico. (Tarbuck et al., 2005)

#### 2.3.2.1 Ondas Rayleigh

Son aquellas que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo (ver Fig 2-8). Su velocidad de propagación es alrededor del 90% de la velocidad de las ondas P y 50% de las ondas S. (Villaverde, 2009)

Son ondas de compresión de tensión similares a las ondas P, que su amplitud disminuye con la distancia debajo de la superficie del suelo. (Tarbuck et al., 2005)

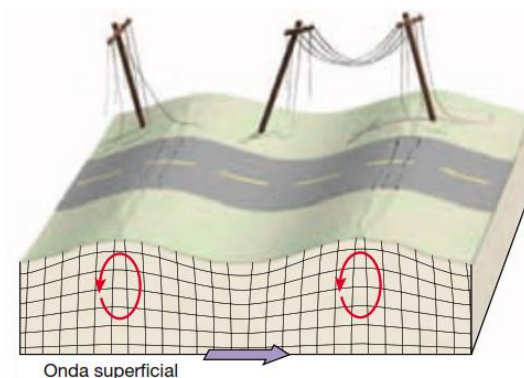


Fig 2-8: Modelo del movimiento característico de la onda Rayleigh. (Tarbuck et al., 2005)

### 2.3.2.2 Ondas Love

Son aquellas que producen un movimiento de forma transversal a la dirección de propagación sin desplazamiento vertical (ver Fig 2-9).

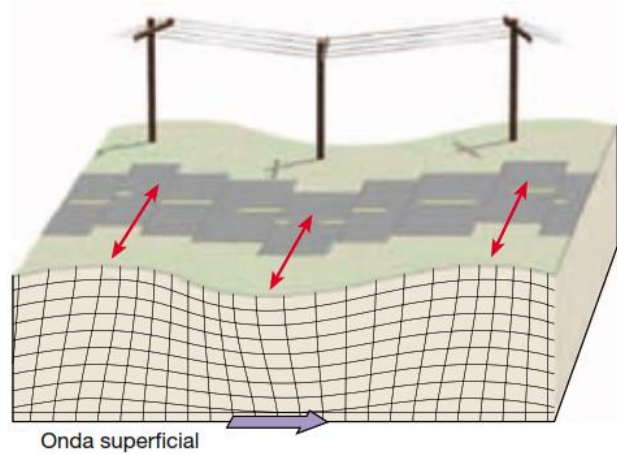


Fig 2-9: Modelo de movimiento característico de la onda Love. (Tarbuck et al., 2005)

Son ondas de corte, similar a la onda S, que disminuyen rápidamente con la distancia debajo de la superficie. (Villaverde, 2009). Este tipo de onda superficial mueve el terreno de un lado a otro y puede ser particularmente dañino para los cimientos de los edificios. (Tarbuck et al., 2005)

Vale la pena recalcar como se relacionan, en general, las velocidades de los tipos de ondas mencionados:

$$V_p > V_s > V_{LOVE} > V_{RAYLEIGH}$$

Y la amplitud de las ondas registradas (ver Fig 2-17) en muchos casos corresponden al orden inverso.

$$A_{REYLEIGH} > A_{LOVE} > A_s > A_p$$

## 2.4 Escalas de Intensidad

Los que hemos experimentado la sensación de un sismo ya sea dentro o fuera de una edificación, sabemos que no todos los sismos poseen la misma intensidad ni duración. Algunos son leves, que apenas son percibidos por unos pocos en ciertas circunstancias, por el contrario, otros producen daños catastróficos como el acontecido el pasado 16 de abril de 2016 en Ecuador.

Por lo que, con el pasar del tiempo se han creado varias escalas que sirven para todos estar de acuerdo con lo leve o fuerte que un sismo fue en un lugar en particular. Entonces, se creó la escala de intensidad que está basada en la percepción del ser humano. La primera escala de intensidad conocida se registra en 1564 denominada escala Gastaldi. A partir de esta se han ido desarrollando más escalas que sean aplicables a diferentes regiones del mundo. Por ejemplo:

- ✓ Escala de Paordi (1637) para Italia.
- ✓ Escala de Egen (1828) para Alemania.
- ✓ Escala de Rossi- Forel (1880) para condiciones europeas.
- ✓ Escala de Mercalli (1902), modificación de la escala de Rossi- Forel.
- ✓ Escala modificada de Mercalli (1931) con amplio uso en América del Norte y otras partes del mundo, desarrollada por Wood y Newman.

Esta última escala también conocida como MMI es la más usada y consta de 12 grados, que van desde el grado I por un sismo que las personas no sienten hasta el grado XII por un sismo que causa destrucción total. (Villaverde, 2009)

- ✓ Escala de la Agencia Meteorológica Japonesa (1949) para condiciones japonesas, denominada (JMA). Okamoto propuso la Ecuación 2-3 para relacionar esta escala con la escala MMI:

$$I_M = 0.5 + 1.5I_J$$

*Ecuación 2-3: Escala JMA en función de MMI. (Okamoto, 1984)*

Donde:

- $I_M$  es la escala modificada de Mercalli; y
  - $I_J$  es la escala de la Agencia Meteorológica Japonesa.
- 
- ✓ Escala Medvedev- Sponheuer-Karnik (MSK) (1964) para uso internacional.

Es importante tener en cuenta que estas escalas no implican una medición científica, y por lo tanto tienen un valor limitado (Villaverde, 2009). Dependen de factores subjetivos como:

- ✓ Experiencia previa de las personas frente a sismos;
- ✓ Prácticas locales de diseño;
- ✓ Si el sismo ocurre o no en una región habitada;
- ✓ Densidad poblacional.

## 2.5 Sismógrafos y Sismogramas

### 2.5.1 Sismógrafos

Debido a la subjetividad a la que se prestan las mencionadas escalas de intensidad, los científicos se dieron cuenta que el fenómeno requería de mediciones físicas y consistentes que preserven las características del movimiento del suelo en cada instante de tiempo. Por lo que se crearon dispositivos que midan las características de un evento sísmico denominado sismógrafos. En la práctica, debido a que los movimientos generados por un sismo no son únicamente horizontales ni únicamente verticales, se utilizan un sismógrafo vertical y dos sismógrafos horizontales. De esta manera el movimiento del suelo puede estar completamente caracterizado en cualquier instante de tiempo. (Villaverde, 2009)

Los sismógrafos se componen de un péndulo, un elemento de amortiguación, un tambor de grabación y una aguja unida a la masa del péndulo (ver Fig 2-10). Para poder detectar eventos sísmicos distantes, los sismógrafos también se implementan con un sistema mecánico, óptico o electromagnético que magnifica el movimiento del péndulo según corresponda (generalmente 2800). El elemento de amortiguación es normalmente del orden del 80%. (Villaverde, 2009)

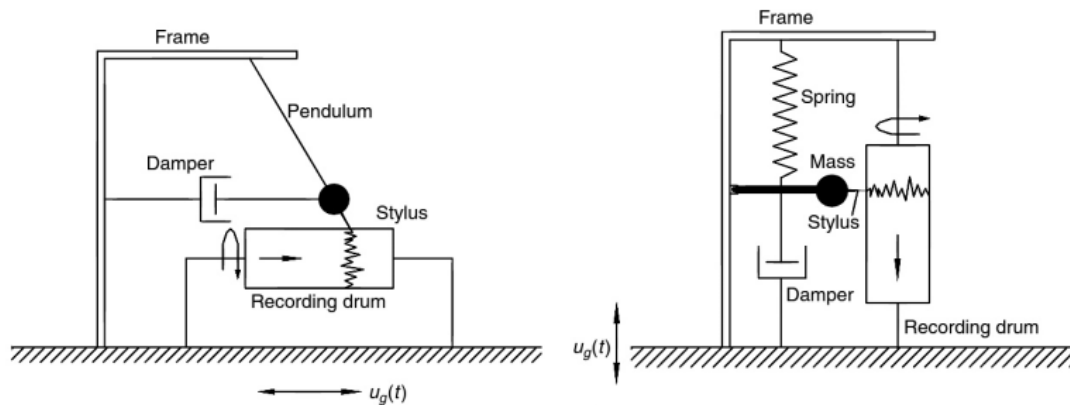


Fig 2-10: Sismógrafo que registra componente a) horizontal y b) vertical. (Villaverde, 2009)

### 2.5.1.1 RENSIG

En el Distrito Metropolitano de Quito, no existen sensores de la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG).

### 2.5.2 Sismogramas

La representación de los registros obtenidos de un sismógrafo magnificado por el factor de magnificación se denominan sismogramas. Los sismogramas poseen 24 líneas horizontales que representan las horas referidas al GMT (ver Fig 2-11). En cada línea existen 60 marcas y en ellas se puede diferenciar la llegada de las ondas P y S (ver Fig 2-12).

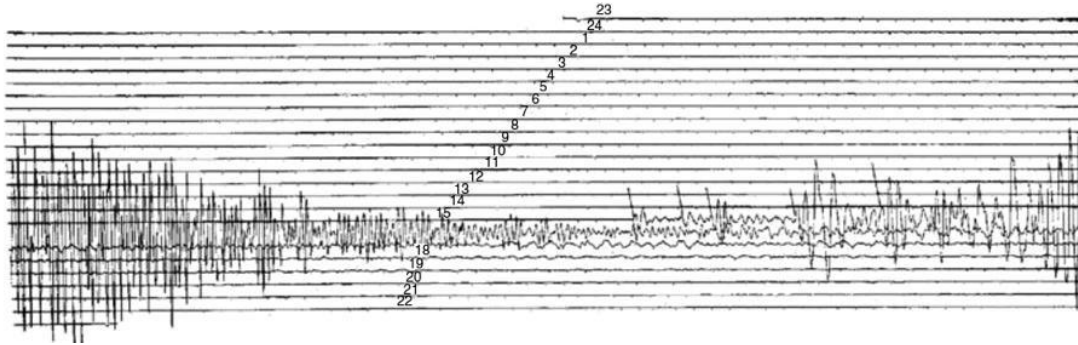


Fig 2-11: Horas GMT de un sismograma. (Villaverde, 2009)

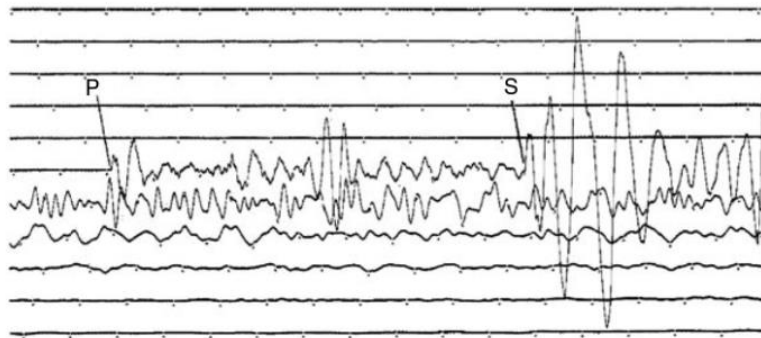


Fig 2-12: Porción inicial ampliada de un sismograma. (Villaverde, 2009)

Cabe señalar que un sismograma nunca carece de pequeñas ondas, estas se generan debido a la sensibilidad del sismógrafo que pueden detectar hasta el ruido de fondo, por ejemplo, ruido en las calles, rompimiento de olas en la playa, perturbaciones creadas por el hombre, entre otras. (Villaverde, 2009)

Se definen las siguientes características de las ondas en un registro sísmico:

- ✓ **Amplitud:** es el tamaño de la onda desde su posición de equilibrio hasta el pico de esta (ver Fig 2-17). Su magnitud fundamental es de longitud. Se representa con la letra “A” (USGS, 2019)
- ✓ **Periodo:** es el intervalo requerido para un ciclo completo de la onda. Su magnitud fundamental es de tiempo, generalmente en segundos (seg). Se representa con la letra “T”. (USGS, 2019)

- ✓ **Frecuencia:** es la cantidad de veces que se repite cualquier suceso en un determinado periodo de tiempo. Es el inverso del periodo. Su unidad es de hercios ( $1/s = \text{hz}$ ). Se representa con la letra “f”. (USGS, 2019)

Complementando la [sección 2.1](#) Estructura de la tierra, se han compilado y analizado los datos provenientes de sismógrafos con el fin de desarrollar una imagen detallada del interior de la tierra como se observa en la [Fig 2-2](#) y se llegó a descubrir los límites principales de la tierra.

#### Límites principales de la tierra:

- ✓ **Discontinuidad de Mohorovic:** Andrija Mohorovic, en 1909, descubrió un límite que separa los materiales de la corteza de las rocas de composición diferente del manto subyacente. Realizó un minucioso análisis de los sismogramas de sismos superficiales ([ver sección 2.6](#) Profundidad de los sismos) y descubrió que:

*“... En particular, la velocidad media de las ondas P, que eran las primeras en llegar a las estaciones más próximas, era de unos 6 km/s. Por el contrario, la energía sísmica registrada en estaciones más distantes viajaba a velocidades aproximadas a los 8 km/s. Mohorovic concluyó que por debajo de 50 kilómetros existía una capa con propiedades notablemente diferentes de las correspondientes a la capa más externa de la Tierra.”(Tarbuck et al., 2005)*

- ✓ **Discontinuidad de Gutenberg:** Beno Gutenberg, en 1914, observó que las ondas P disminuyen y finalmente desaparecen por completo a unos  $105^\circ$  desde el epicentro de un sismo. Luego, alrededor de  $140^\circ$  más lejos, reaparecen, pero unos 2 minutos después de lo que cabría esperar en función de la distancia recorrida. Este cinturón, donde las ondas sísmicas directas están ausentes, se ha denominado zona de sombra de las ondas P ([ver Fig 2-13](#)). En esta zona se produce la refracción de dichas ondas. (Tarbuck et al., 2005)

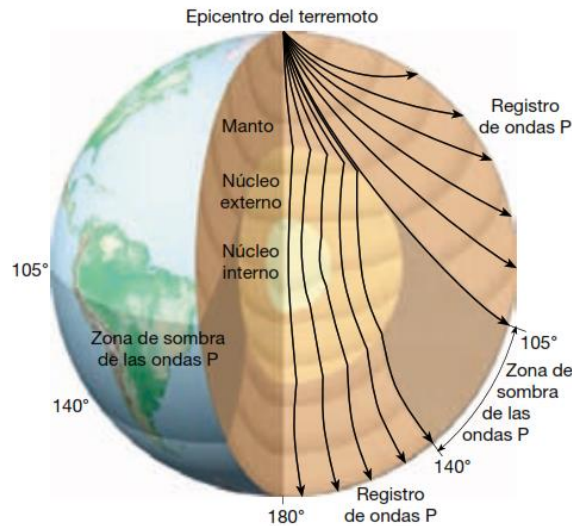


Fig 2-13: Discontinuidad de Gutenberg- Onda P. (Tarbuck et al., 2005)

Más adelante, se determinó que las ondas S no atraviesan el núcleo. Este hecho indujo a los geólogos a concluir que, al menos una parte de esta región es líquida (ver Fig 2-14).

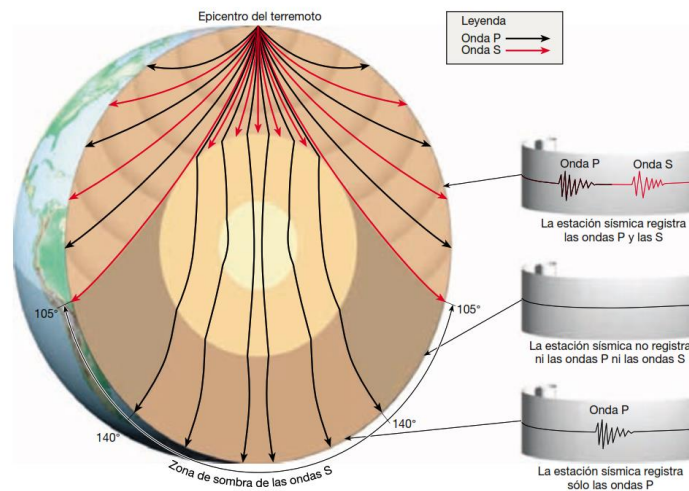


Fig 2-14: Discontinuidad de Gutenberg- Onda S. (Tarbuck et al., 2005)

- ✓ **Discontinuidad de Lehmann:** Inge Lehmann, en 1936, descubrió una nueva región de reflexión y refracción dentro del núcleo. Por lo tanto, se descubrió un núcleo dentro del núcleo. Además, las ondas P que atraviesan el núcleo interno tienen velocidades ligeramente más rápidas que las que sólo penetran en el núcleo externo. El aparente aumento de elasticidad del núcleo interno es una prueba de que esta región más interna es sólida. (Tarbuck et al., 2005)

Gracias a los sismogramas, se consigue obtener una estimación aproximada de la ubicación del hipocentro de un evento sísmico en función de los tiempos de llegada de las ondas P y S. Dado que existe un desfase temporal entre una y otra se considera que este es directamente proporcional a la distancia desde el punto de observación hasta el hipocentro. Este intervalo se expresa en función de las velocidades de propagación de las ondas P y S como se observa en la [Ecuación 2-4](#).

$$t_{sp} = \frac{\Delta}{V_s} - \frac{\Delta}{V_p}$$

*Ecuación 2-4: Intervalo de llegada entre onda S y onda P. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $V_p$  = velocidad promedio de la onda P;
- $V_s$  = velocidad promedio de la onda S; y
- $\Delta$  = distancia hipocentral.

Por lo que:

$$\Delta = \frac{t_{sp}}{\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p}}$$

Si se toma en cuenta que las velocidades promedio de la onda P y S en roca es aproximadamente 6.0 y 3.5 (km/s) ([Okamoto, 1984](#)), respectivamente, se tiene la [Ecuación 2-5](#):

$$\Delta = 8 \text{ (km/s)} * t_{sp}$$

*Ecuación 2-5: Distancia hipocentral en función del intervalo de llegada entre onda S y onda P. (Villaverde, 2009)*

Sobre la base de este concepto, el epicentro de un evento sísmico puede localizarse de la siguiente manera:

- ✓ Identificar desfase temporal  $t_{sp}$  en los sismogramas registrados en al menos 3 estaciones sismográficas.
- ✓ Calcular distancias hipocentrales.

- ✓ Dibujar en un mapa círculos con radios iguales a las distancias hipocentrales en el centro de cada estación y el epicentro se ubicará en el punto de intersección de los círculos. En caso de no existir un punto de intersección, la ubicación del epicentro se definirá por la intersección de los arcos como se observa en la Fig 2-15.

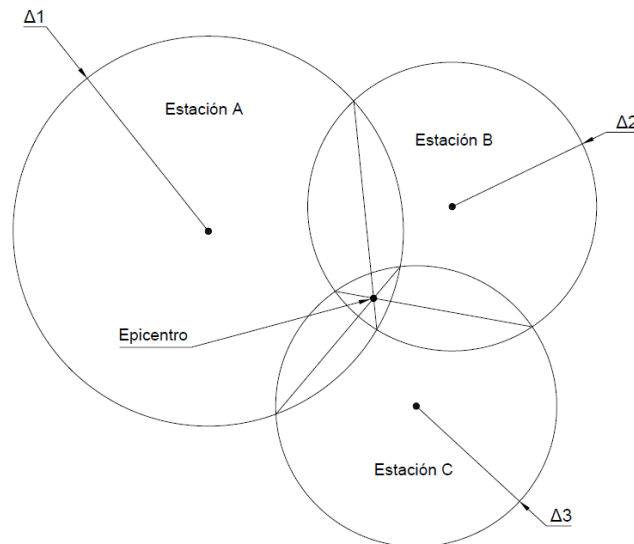


Fig 2-15: Epicentro evento sísmico. (Villaverde, 2009)

La profundidad focal de un evento sísmico puede determinarse a partir de la relación trigonométrica entre la distancia epicentral e hipocentral de una estación cercana. No de una estación lejana, ya que, estas distancias son aproximadamente las mismas como se observa en la Fig 2-16.

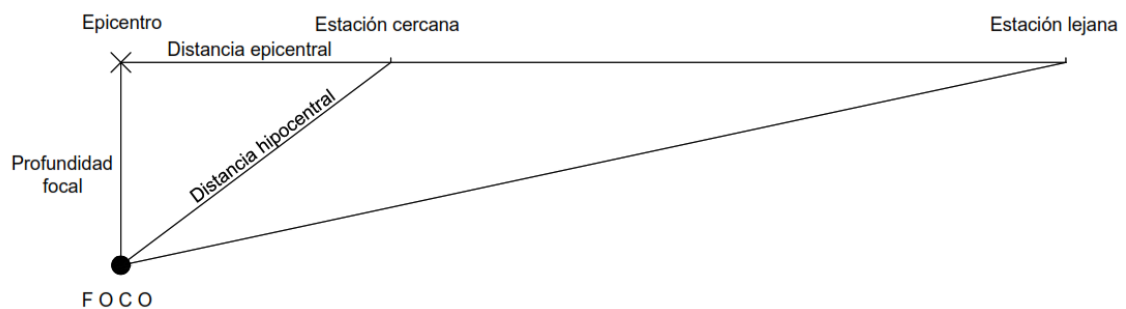


Fig 2-16: Profundidad focal de un evento sísmico. (Villaverde, 2009)

## 2.6 Profundidad de los sismos

De manera algo arbitraria (Tarbuck et al., 2005) los sismos se han clasificado por su profundidad de aparición, como sigue:

- ✓ Superficiales: aquellos cuyo foco está dentro de los primeros 70 km de la estación de registro;
- ✓ Intermedios: aquellos cuyo foco está entre los 70 y 300 km de la estación de registro;
- ✓ Profundos: aquellos cuyo foco está a más de 300 km de la estación de registro.

Alrededor del 90% de los sismos se producen a profundidades menores a los 100 km, y suelen ser los mas dañinos los generados a poca profundidad.

## 2.7 Escalas de Magnitud

Con la aparición de los sismógrafos se desarrollaron escalas de magnitud. Estas escalas se basan en cálculos a partir de datos proporcionados por los sismógrafos y así calcular la cantidad de energía liberada en el foco del sismo.

### 2.7.1 Magnitud de Richter

Charles Richter en 1935 introdujo el término de magnitud sísmica. Basó su escala en la medición de la amplitud (ver Fig 2-17) de la mayor onda registrada por un sismógrafo normalizado. Definió además un sismo de magnitud cero como aquel sismo que teóricamente produciría un sismograma con un pico de amplitud igual a 0.000001 m (1  $\mu$ m) a una distancia de 100 km del epicentro. (Villaverde, 2009)

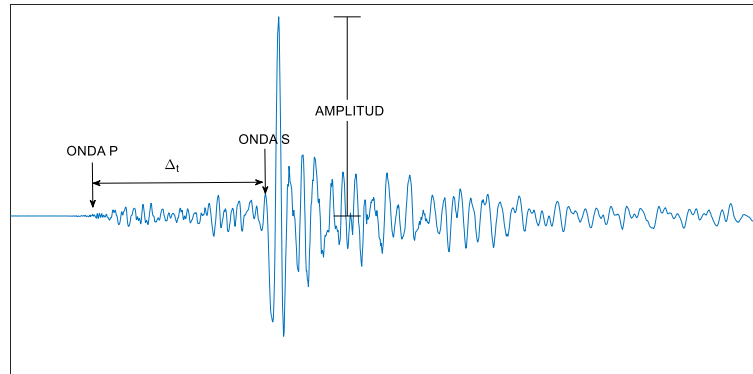


Fig 2-17: Datos de un sismograma para escala  $M_L$ . (Elaboración propia)

La magnitud de Richter o magnitud local ( $M_L$  debido a que fue hecha para el sur de California) se calcula con la [Ecuación 2-6](#):

$$M_L = \log \frac{A}{A_0}$$

*Ecuación 2-6: Magnitud Richter o Local. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $A$ = es la amplitud máxima en micrómetros en un sismograma;
- $A_0$ = es la amplitud máxima de un sismo de magnitud cero.

Para estaciones ubicadas a más de 100 km, se debe calcular  $A_0$  con la [Ecuación 2-7](#):

$$\log A_0 = 5.12 - 2.56 \log \Delta$$

*Ecuación 2-7:  $A_0$  para distancias epicentrales mayores a 100 km. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $\Delta$ = distancia epicentral en km,  $10 < \Delta < 600$ .

Debido a que es una escala logarítmica, un aumento de una unidad en magnitud significa un aumento de 10 veces en la amplitud registrada por el sismógrafo. Además, cada unidad

corresponde aproximadamente a un aumento de energía de 32 veces. En general, es utilizado para calcular caracterizar sismos superficiales registrados a <600 km. (Tarbuck et al., 2005; Villaverde, 2009)

A continuación, se detallan escalas que se crearon a partir del trabajo realizado por Richter con ciertas modificaciones.

### 2.7.2 Magnitud de onda superficial

Richter y Gutenberg en 1936 crearon la magnitud  $M_S$  para superar las limitaciones de la magnitud de Richter. Es decir, esta escala era válida para sismos con distancias epicentrales mayores a 600 km y para sismogramas registrados por sismógrafos diferentes al normalizado. En general, esta escala se basa en la máxima amplitud de la onda superficial del registro en su componente vertical y está definida por la [Ecuación 2-8](#). (Villaverde, 2009)

$$M_S = \log a + 1.66 \log \Delta + 2.0$$

*Ecuación 2-8: Magnitud de onda superficial. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $a$ = desplazamiento máximo medido en  $\mu\text{m}$ ;
- $\Delta$ = distancia epicentral medida en grados ( $360^\circ$  corresponde a la circunferencia de la tierra).

### 2.7.3 Magnitud de momento

Hanks y Kanamori en 1979 propusieron la magnitud de momento  $M_W$  basada en el momento sísmico y así superar la evidente limitación de no considerar el área de rotura de la falla procedente a un sismo. Esta magnitud está dada por la [Ecuación 2- 9](#):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.0$$

*Ecuación 2- 9: Magnitud de momento. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $M_0$  = momento sísmico en N.m.

### 2.7.3.1 Momento sísmico

Las escalas de magnitud antes mencionadas, miden las ondas emitidas únicamente por una fracción del área de falla en lugar de la falla completa, dando como resultado una subestimación de la verdadera fuerza de los sismos. El momento sísmico está dado por la [Ecuación 2-10](#):

$$M_0 = GA\bar{D}$$

*Ecuación 2-10: Momento sísmico. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- G= Módulo de corte de la roca adyacente a la falla;
- A= Área que se rompe a lo largo del plano de falla;
- $\bar{D}$ = cantidad promedio de deslizamiento de la falla.

## 2.8 Acelerógrafos y acelerogramas

Los sismógrafos poseen limitaciones en los siguientes aspectos:

- ✓ No registran el movimiento generado por fuertes sismos cerca de las regiones epicentrales, que son precisamente los que producen daños generalizados en obras civiles.
- ✓ Se instalan en roca sólida ya que su objetivo es medir los movimientos de la corteza terrestre, por lo tanto, no pueden dar información sobre las condiciones de suelo local.

- ✓ Focalizan sus esfuerzos para registrar el momento de llegada de las ondas, más que en la amplitud de las ondas.

Por lo expuesto, en 1930 se diseñó el denominado acelerógrafo de movimiento fuerte el cual se instaló en áreas urbanas para poder proporcionar información útil para aplicaciones ingenieriles (por ejemplo, conocer la respuesta de las estructuras frente a excitaciones sísmicas). Los registros obtenidos mediante acelerógrafos se denominan de campo cercano, ya que el estudio se realiza en la región epicentral, en la que los movimientos en superficie al paso de las ondas sísmicas son más intensos. (Carreño et al., 1999; Villaverde, 2009)

### 2.8.1 Acelerógrafos

Los acelerógrafos están diseñados para medir directamente la variación de la aceleración del suelo en función del tiempo. Frente a los sismógrafos, los acelerógrafos presentan las siguientes ventajas:

- ✓ Facilidad de construcción;
- ✓ Precisión de la integración numérica de la aceleración para obtener velocidad y desplazamiento, en comparación de la diferenciación del desplazamiento para obtener velocidad y aceleración del suelo.
- ✓ Funcionan con baterías ya que, por lo general, un sismo fuerte interrumpe la energía eléctrica.

Similar a los sismógrafos, los acelerógrafos se componen de péndulo, amortiguador, dispositivo de grabación, reloj interno y GPS (ver Fig 2-18). Registran 3 componentes ortogonales del suelo (ver Fig 2-19). La diferencia frente a los sismógrafos radica principalmente en que los acelerógrafos se activan con fuertes sismos, los mismos que ocurren después de varios años en un sitio determinado. El dispositivo de grabación del acelerógrafo se activa cuando el suelo alcanza una aceleración específica (principalmente con la componente vertical, ya que es el primer movimiento en arribar). (Villaverde, 2009)

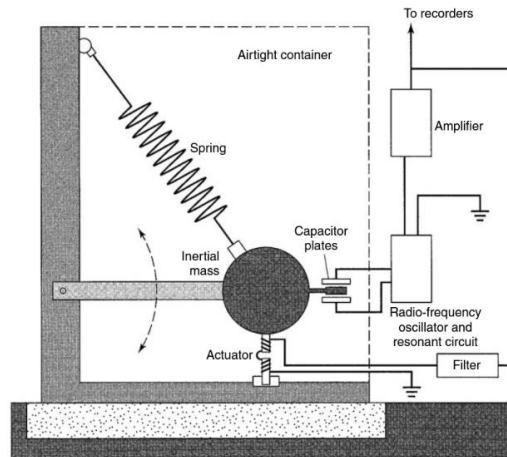


Fig 2-18: Representación esquemática acelerógrafo que registra componente vertical. (Villaverde, 2009)

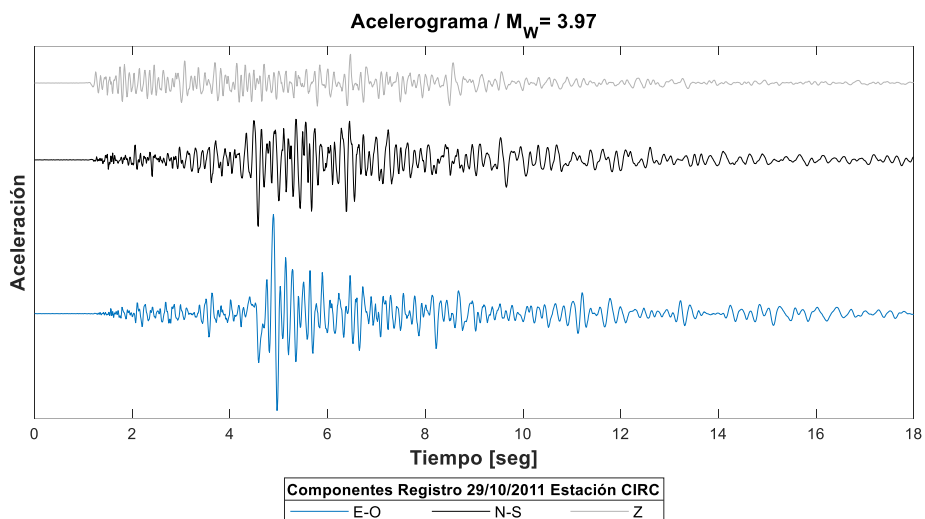


Fig 2-19: Acelerogramas componentes ortogonales del registro del 29/10/2011 Estación CIRC. (Elaboración propia)

### 2.8.1.1 RENAC

En el Ecuador se cuenta con una red nacional de acelerógrafos permanente RENAC, la cual permite llevar a cabo el registro de las señales sísmicas de mayor impacto y destrucción.

Con el proyecto FEIREP e IRD se instalaron equipos de monitoreo en todo el Distrito Metropolitano de Quito (ver Fig 2-20), detectando así movimientos fuertes generados por las placas tectónicas.

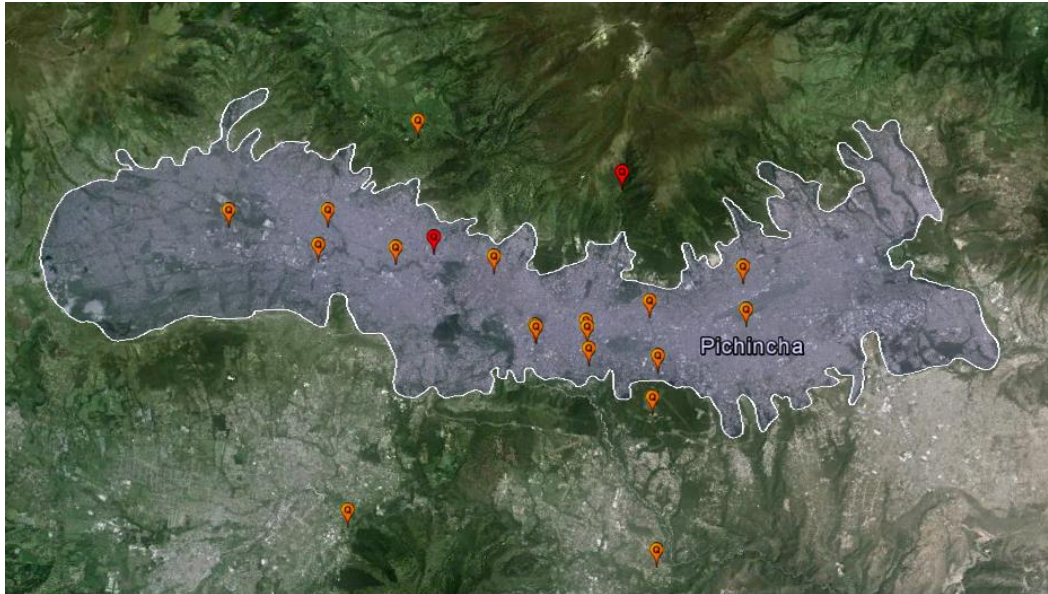


Fig 2-20: Estaciones Acelerográficas del DMQ. (Instituto Geofísico, 2016)

### 2.8.2 Acelerogramas

Los registros obtenidos de los acelerógrafos se denominan acelerogramas. El primer acelerograma registrado se obtuvo durante el sismo de Long Beach del 10 de marzo de 1933 en el sur de California. Desde entonces, se han obtenido miles de acelerogramas en todo el mundo, proporcionando información útil de relevancia ingenieril (Villaverde, 2009). Comúnmente, se representa la aceleración en función de la gravedad como se observa en la Fig 2-21:

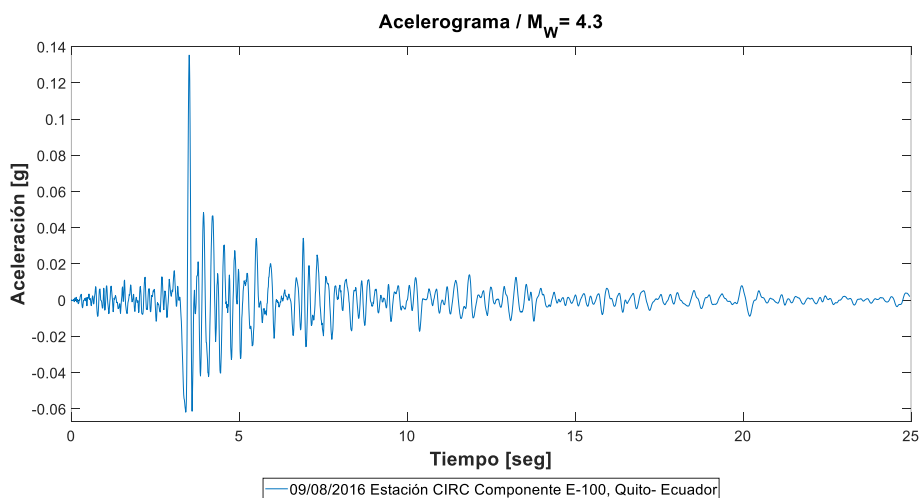


Fig 2-21: Acelerograma típico (duración=24.96 seg). (Elaboración propia)

## 2.9 Duración de un sismo

La duración de un registro se define como el tiempo transcurrido desde que el acelerógrafo o sismógrafo detecta el sismo, hasta que las ondas de este dejan de ser significativas y depende de:

- ✓ Características geológicas del terreno donde se propaga el sismo y los estratos que atraviesa este hasta su lugar de registro;
- ✓ Geometría de la falla;
- ✓ Velocidad de propagación.

En los últimos años, el estudio de la duración de un sismo ha tomado mayor relevancia ya que esta determina en gran medida los efectos destructivos de un sismo sobre una estructura. El efecto de la duración ha sido tradicionalmente ignorado en los códigos de diseño. Ello se debe a que el espectro de respuesta ([ver sección 2.13](#) Espectro de respuesta) resulta insensible a la duración del sismo, pues recoge solamente la información referente a la máxima aceleración ocurrida en algún momento del sismo, e ignora lo que sucede en adelante. Sin embargo, en sismos largos, pueden ocurrir fenómenos complejos de degradación de la rigidez y la resistencia ([Vielma, 2017](#)) debido al elevado número de ciclos de carga que deben soportar los elementos estructurales de una edificación.

### 2.9.1 Intensidad de Arias

A. Arias en 1970 definió una medida de la cantidad de energía total liberada por un sismo, y está conectada con el daño que puede producir un sismo en una estructura. Se define mediante la [Ecuación 2-11](#):

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_g} a_g^2(t) dt$$

*Ecuación 2-11: Intensidad de Arias. (Villaverde, 2009)*

Donde:

- $a_g$  = aceleración registrada del suelo;
- $T_g$  = duración total del registro;
- $g$  = gravedad

En un gráfico de Husid, se representa la variación de la intensidad de Arias en porcentaje (ver Fig 2-22).

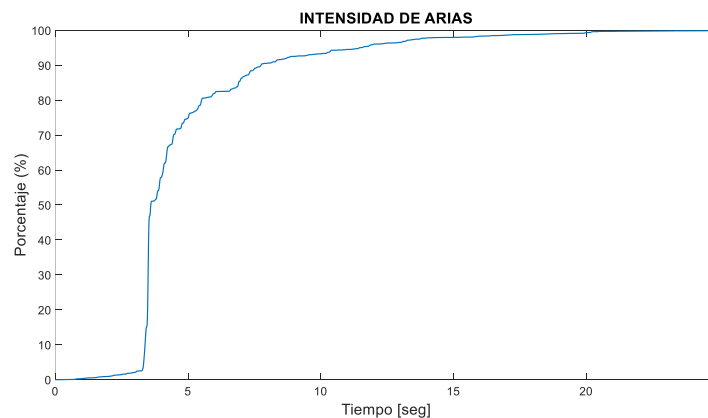


Fig 2-22: Intensidad de Arias del Acelerograma de la Fig 2-21. (Elaboración propia)

### 2.9.2 Duración significativa

El concepto de duración significativa relaciona la duración con la fase de máxima energía del movimiento, representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias como se observa en la Fig 2-23. (Carreño et al., 1999)

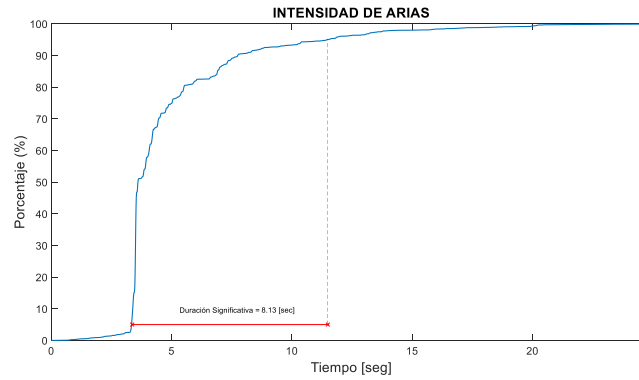


Fig 2-23: Duración significativa en el gráfico de Husid de la Fig 2-22. (Elaboración propia)

Por lo tanto, entre 3.36 [seg] y 11.49 [seg] se libera el 5% y 95%, respectivamente, la energía del sismo de la Fig 2-21 y está dado por la Fig 2-24:

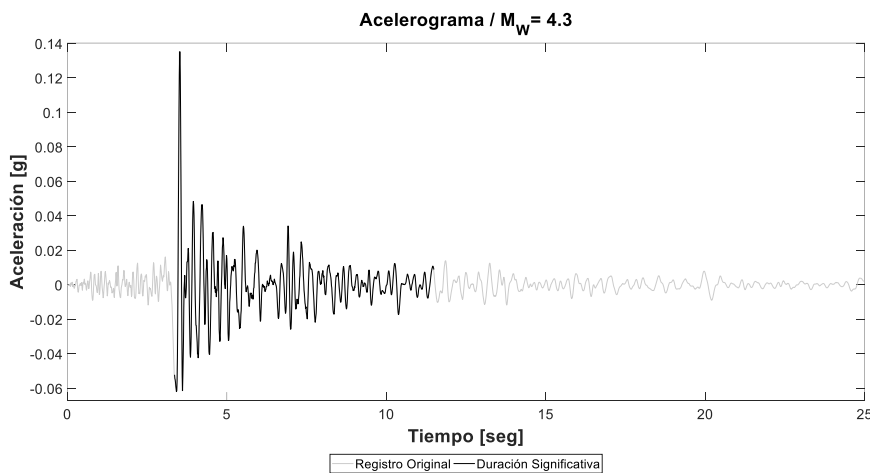


Fig 2-24: Duración significativa del Acelerograma de la Fig 2-21. (Elaboración propia)

## 2.10 PGD, PGV y PGA.

Gracias a los acelerógrafos, se obtiene información de las características del movimiento fuerte del terreno. Los registros de aceleración se pueden integrar para obtener historias de velocidad del terreno e historias de desplazamiento del terreno. El valor máximo (en términos absolutos) de cada registro se denomina:

- ✓ Desplazamiento pico del terreno (peak ground displacement, PGD);
- ✓ Velocidad pico del terreno (peak ground velocity, PGV);
- ✓ Aceleración pico del terreno (peak ground acceleration, PGA) (ver Fig 2-25).

El PGA, es el parámetro con el cual varios códigos de diseño caracterizan la intensidad del movimiento del suelo en regiones sísmicas. Pero, solo el PGA no refleja la intensidad de la respuesta de un sistema estructural, ya que la duración del sismo y los periodos predominantes (periodos que mayormente caracterizan un registro) también afectan significativamente la respuesta de un sistema estructural. (Villaverde, 2009)

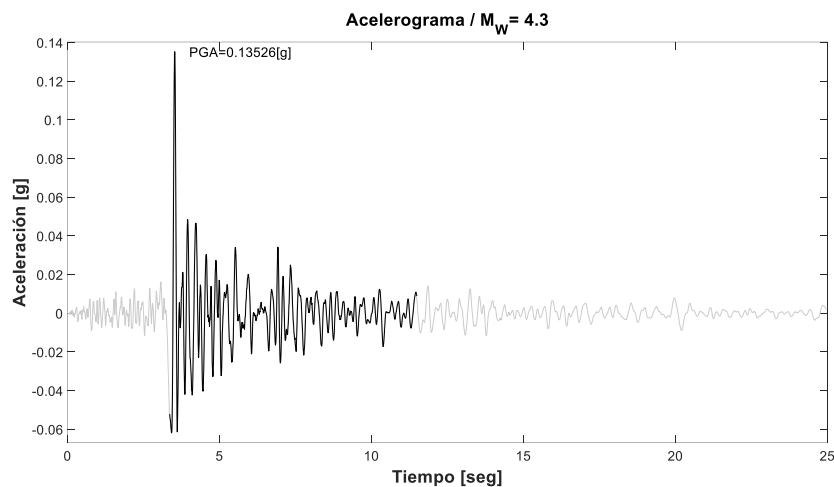


Fig 2-25: PGA del Acelerograma de la Fig 2-21. (Elaboración propia)

Aunque, en los últimos años, se ha preferido el PGV ya que se ha encontrado que ésta se correlaciona de mejor manera con el daño estructural observado después de un sismo, particularmente para estructuras dentro del rango intermedio de las frecuencias naturales típicas. (Villaverde, 2009)

## 2.11 Respuesta en el tiempo- Integral de Duhamel

Con referencia a la estructura de la Fig 2-26 cuyas propiedades son; masa  $m$ , rigidez  $k$  y constante de amortiguamiento viscoso  $c$ . La estructura se somete a un desplazamiento del suelo  $u_g(t)$  respecto a un marco de referencia fijo que produce un desplazamiento relativo

$u(t)$  respecto de la base. Entonces el desplazamiento que sufre la masa es  $y(t) = u_g(t) + u(t)$ .

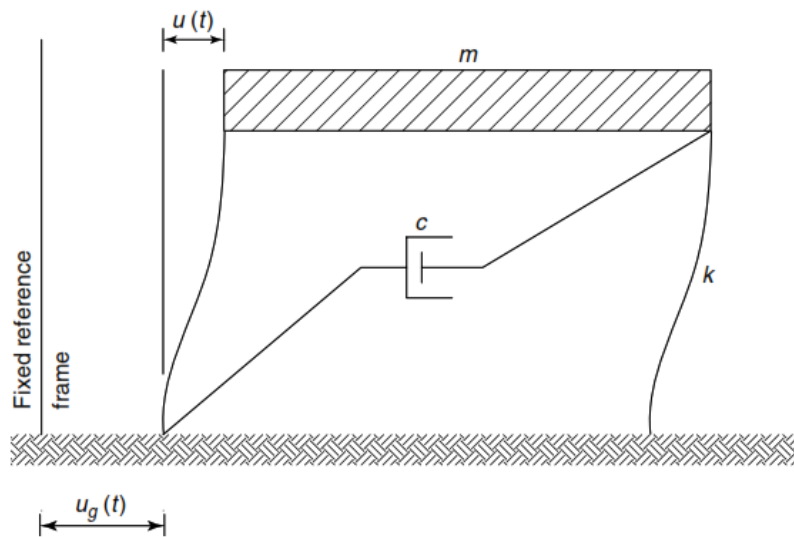


Fig 2-26: Sistema de 1 Grado de libertad [GDL] sometido a excitación en su base. (Villaverde, 2009)

La frecuencia natural de la estructura (sin considerar  $u_g(t)$ ) viene dada por la 2da ley de Newton:

$$\Sigma F = m\ddot{u}(t)$$

$$-ku(t) = m\ddot{u}(t)$$

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0$$

Se divide para  $m$ :

$$\ddot{u}(t) + \frac{k}{m} u(t) = 0$$

Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow k = \omega_n^2 m$$

Además, el factor de amortiguamiento viscoso del sistema es:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} \rightarrow c = 2m\omega_n \xi$$

Y la frecuencia natural amortiguada del sistema es:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

La ecuación diferencial del movimiento del sistema de la Fig 2-26 se expresa:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

*Ecuación 2-12: Ecuación diferencial 1 del movimiento del sistema de la Fig 2-26. (Villaverde, 2009)*

Si se reemplaza  $c$ ,  $k$  y se divide para  $m$ , se obtiene:

$$\ddot{u}(t) + 2\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

*Ecuación 2-13: Ecuación diferencial  $f(\omega_n)$  del movimiento del sistema de la Fig 2-26. (Villaverde, 2009)*

Si se emplea la integral de Duhamel a la Ecuación 2-13 con condiciones iniciales (en desplazamiento y velocidad) igual a cero, se obtiene la Ecuación 2-14:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau$$

*Ecuación 2-14: Respuesta del sistema de la Fig 2-26. (Villaverde, 2009)*

La integral de Duhamel proporciona un resultado general para evaluar la respuesta de un sistema de lineal de 1GDL a una excitación externa arbitraria. Este resultado se restringe a los sistemas lineales, por lo tanto, no es aplicable a estructuras que se deforman más allá de su límite elástico lineal. Como  $\ddot{u}_g(t)$  es una función complicada que se describe numéricamente, la evaluación de la integral de Duhamel requiere métodos numéricos. (Chopra, 2014)

## 2.12 Respuesta en el tiempo- Beta de Newmark

Los métodos numéricos que se requieren para resolver la integral de Duhamel ante una excitación externa que varía en el tiempo o si el sistema no es lineal, no son muy eficaces. Por lo que, a continuación, se presenta el método paso a paso en el tiempo realizado por Nathan Mortimore Newmark en 1959 basado en la variación de la aceleración. (Chopra, 2014)

La excitación externa  $\ddot{u}_g(t)$  está dada por un conjunto de valores discretos  $\ddot{u}_{g_i} = \ddot{u}_g(t_i)$ ,  $i = 0$  a  $N$  como se observa en la Fig 2-27. El intervalo de tiempo  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ , suele tomarse como constante. La respuesta se determina en los instantes de tiempo discretos  $t_i$ , indicados como el tiempo  $i$ ; el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del sistema de 1GDL son  $u_i$ ,  $\dot{u}_i$  y  $\ddot{u}_i$  respectivamente.

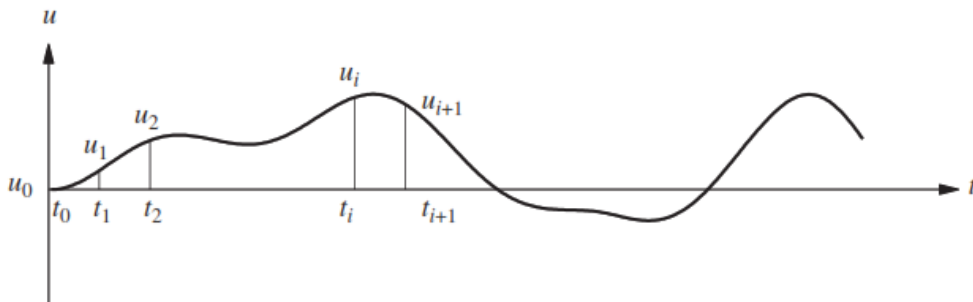


Fig 2-27: Notación para método paso a paso en el tiempo. (Chopra, 2014)

El procedimiento numérico de Newmark permite determinar las cantidades de respuesta  $u_{i+1}$ ,  $\dot{u}_{i+1}$  y  $\ddot{u}_{i+1}$  en el instante  $i + 1$ , que satisfacen la Ecuación 2-12 en el tiempo  $i + 1$ :

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = -m\ddot{u}_{g_{i+1}}$$

Los requisitos importantes para un procedimiento numérico son:

- ✓ **Convergencia:** a medida que disminuye el paso del tiempo, la solución numérica debe acercarse a la solución exacta;
- ✓ **Estabilidad:** la solución numérica debe ser estable en la presencia de errores numéricos de redondeo;
- ✓ **Precisión:** el procedimiento numérico debe proporcionar resultados que estén lo suficientemente cerca de la solución exacta.

Newmark en 1959, desarrolló una familia de métodos paso a paso en el tiempo basándose en la [Ecuación 2-15](#) y [Ecuación 2-16](#):

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1}$$

*Ecuación 2-15: Respuesta en velocidad. (Chopra, 2014)*

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + [(0.5 - \beta) (\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{i+1}$$

*Ecuación 2-16: Respuesta en desplazamiento. (Chopra, 2014)*

Donde  $\beta$  y  $\gamma$  definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan las características de estabilidad y precisión del método. La selección típica de  $\gamma = 1/2$  y  $1/6 \leq \beta \leq 1/4$  es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluido el de la precisión. Para implementar estos cálculos es necesario iterar debido a que  $\ddot{u}_{i+1}$  aparece en el lado derecho de la respuesta en velocidad y desplazamiento. (Chopra, 2014)

La aceleración puede obtenerse con base en la [Ecuación 2-12](#) en el tiempo  $i + 1$ .

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{\ddot{u}_{g_{i+1}} - c\dot{u}_{i+1} - ku_{i+1}}{m}$$

*Ecuación 2-17: Respuesta en aceleración. (Chopra, 2014)*

Las respuestas convergen según la [Ecuación 2-18](#):

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{2\pi\sqrt{\beta}}$$

*Ecuación 2-18: Convergencia de Método de Newmark. (Chopra, 2014)*

Donde:

✓  $T_n$  = periodo natural de la estructura en análisis.

Las respuestas son estables según la [Ecuación 2-19](#):

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{1 - 4\beta}}$$

A continuación, en la Fig 2-28 se observa la respuesta en el tiempo mediante el método de Newmark frente al registro de la Fig 2-25 (en la duración significativa) de una estructura cuyas características son:  $W= 30[\text{ton}]$ ,  $k= 6000 [\text{T/m}]$  y  $\xi=5\%$ . La frecuencia natural del sistema para un sistema de 1GDL está dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k g}{W}} = 44,29 [\text{hz}]$$

Por lo tanto, el periodo natural del sistema es:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 0,14 [\text{seg}]$$

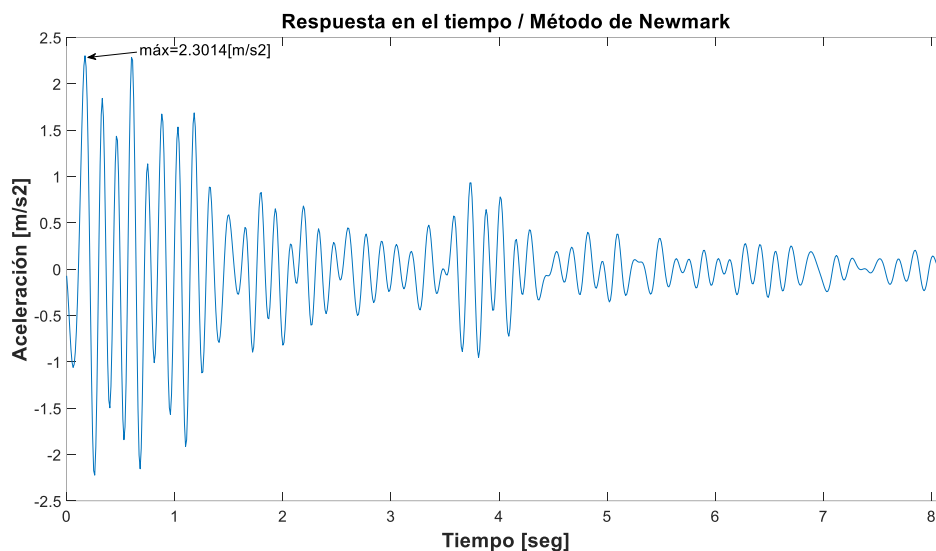


Fig 2-28: Respuesta en el tiempo- Método de Newmark para una estructura dada. (Elaboración propia)

### 2.13 Espectro de respuesta

“Un espectro de respuesta se define, formalmente, como una representación gráfica de la variación del periodo natural (o frecuencia natural) y la relación de amortiguamiento del valor absoluto de la respuesta máxima de un sistema de 1GDL frente a un evento sísmico.

Si la respuesta que se considera es la aceleración absoluta, entonces el espectro de respuesta se denota como el espectro de respuesta en aceleración [ $S_a$ , por sus siglas en inglés]. De manera similar si la respuesta en consideración es la velocidad o el desplazamiento relativos, entonces el espectro de respuesta se denomina espectro de respuesta en velocidad [ $S_v$ ] y espectro de respuesta en desplazamiento [ $S_d$ ], respectivamente”. (Villaverde, 2009)

Por lo tanto, con base en la respuesta en el tiempo obtenida mediante la integral de Duhamel, si se aplica este concepto a la Ecuación 2-14 se obtiene el espectro de respuesta en desplazamiento:

$$\max|u(t)| = SD(\omega_n, \xi) = \left| -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \right|_{max}$$

Ecuación 2-20: Máxima respuesta absoluta de desplazamiento. (Villaverde, 2009)

Si se halla la primera y segunda derivada de la Ecuación 2-20 se obtiene el espectro de respuesta en velocidad relativa y el espectro de respuesta en aceleración respectivamente:

$$\max|\dot{u}(t)| = SV(\omega_n, \xi) = \left| -\int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \left[ \cos \omega_d(t-\tau) - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d(t-\tau) \right] d\tau \right|_{max}$$

Ecuación 2-21: Máxima respuesta absoluta de velocidad relativa. (Villaverde, 2009)

$$\max|\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)| = SA(\omega_n, \xi) = \left| \omega_d \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \left[ \left(1 - \frac{\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \sin \omega_d(t-\tau) + \frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos \omega_d(t-\tau) \right] d\tau \right|_{max}$$

Ecuación 2- 22: Máxima respuesta absoluta de aceleración. (Villaverde, 2009)

Del mismo modo, con base en la respuesta en el tiempo obtenido mediante el método de Newmark, si se aplica el concepto de espectro de respuesta a la Ecuación 2-16, Ecuación 2-15 y Ecuación 2-17 se obtienen los espectros de respuesta en desplazamiento, velocidad relativa y aceleración, respectivamente:

$$u_o(T_n, \xi) = \max_t |u(t, T_n, \xi)|$$

$$\dot{u}_o(T_n, \xi) = \max_t |\dot{u}(t, T_n, \xi)|$$

$$\ddot{u}_o^t(T_n, \xi) = \max_t |\ddot{u}^t(t, T_n, \xi)|$$

Ecuación 2-23: Máximas respuestas absolutas de desplazamiento, velocidad y aceleración. (Chopra, 2014)

A continuación, en la Fig 2-29 se observa el espectro de respuesta en aceleración (para  $T_n = 0$  hasta  $T_n = 4.5$  [seg]) mediante el método de Newmark, frente al registro de la Fig 2-25 (en la duración significativa) para las estructuras con periodos naturales comprendidos entre 0.0 y 4.5 [seg]. Se observa que para el periodo natural ( $T_n = 0.14$  [seg]) calculado al final de la sección 2.12 Respuesta en el tiempo- Beta de Newmark y el máximo valor absoluto de la respuesta en el tiempo ( $\ddot{u}^t = 2.3014[m/s^2]$ ) (ver Fig 2-28), conforman un único punto del espectro de respuesta en aceleración.

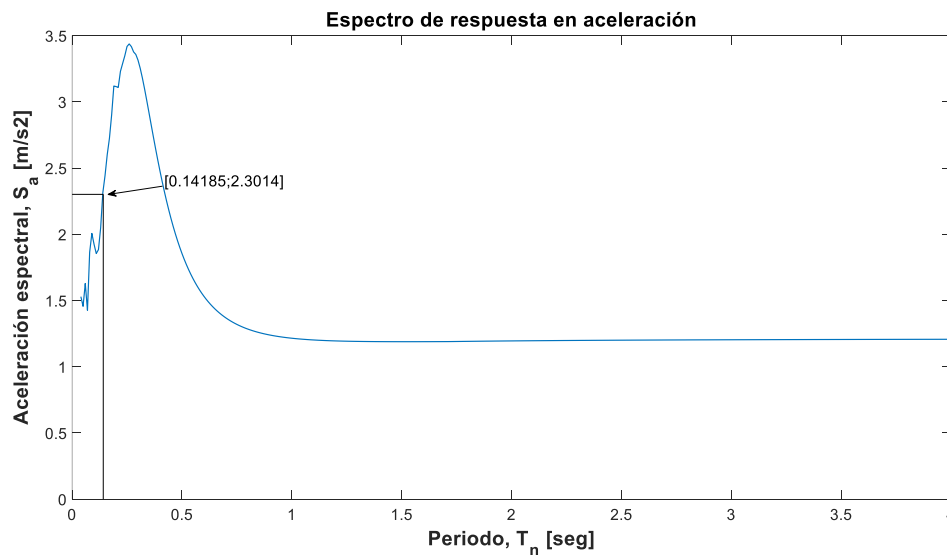


Fig 2-29: Espectro de respuesta en aceleración. (Elaboración propia)

**Nota:** En la Fig 2-29, se observa que para periodos desde  $T_n = 0$  [seg] hasta  $T_n = 0.03$  [seg] no se grafican aceleraciones espectrales  $S_a$  debido a que la respuesta en el tiempo no cumple las condiciones de estabilidad y convergencia.

## 2.14 Espectro elástico de diseño NEC

La Normativa ecuatoriana de la construcción de peligro sísmico (NEC Committee, 2014), en su sección 3.3 establece parámetros para construir el espectro de respuesta elástico de aceleraciones  $S_a$  en base a:

- ✓ El factor de zona sísmica  $Z$ ;
- ✓ El tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura;
- ✓ La consideración de los valores de los coeficientes de amplificación de suelo  $F_a, F_d, F_s$ .

#### 2.14.1 Factor de zona sísmica $Z$

El lugar de emplazamiento de una estructura determina una zona sísmica del Ecuador, caracterizada por el valor de  $Z$  (ver Fig 1-1).

#### 2.14.2 Curvas de peligro sísmico

Probabilidad de excedencia, dentro de un periodo específico de tiempo y dentro de una región determinada, de movimiento del suelo cuyos parámetros de aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados. (NEC Committee, 2014)

Para definir los diferentes niveles de aceleración sísmica esperada en roca, se proporcionan curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia, en donde se relaciona el valor de aceleración sísmica en el terreno (PGA) con un nivel de probabilidad anual de excedencia, como se observa en la Fig 2-30:

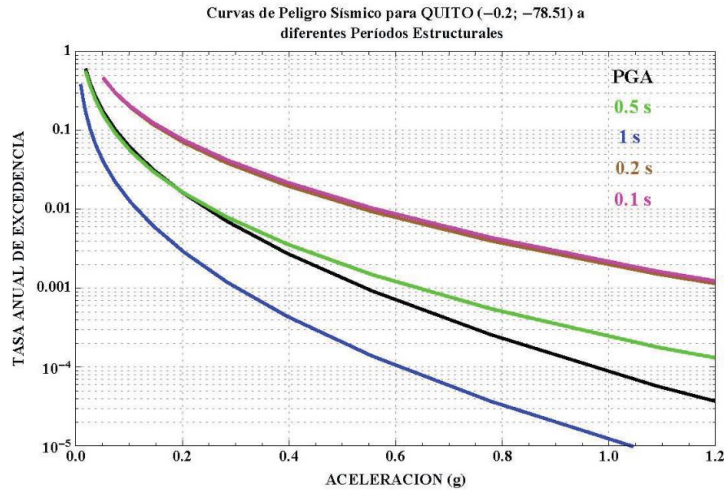


Fig 2-30: Curvas de peligro sísmico, Quito. (NEC Committee, 2014)

La tasa anual de excedencia es el inverso del periodo de retorno del evento sísmico.

### 2.14.3 Tipos de perfiles de suelo

En la [Tabla 2-2](#) se definen seis tipos de perfil de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente.	$V_s \geq 1500 \left(\frac{m}{s}\right)$
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media.	$760 \left(\frac{m}{s}\right) \leq V_s \leq 1500 \left(\frac{m}{s}\right)$
<b>C</b>	Perfiles de suelo muy densos o roca blanca, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte, o Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios.	$360 \left(\frac{m}{s}\right) \leq V_s \leq 760 \left(\frac{m}{s}\right)$  $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ kPa}$

<p><b>D</b></p>	<p>Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de onda de corte, o</p> <p>Perfiles de suelo rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones.</p>	$180 \left(\frac{m}{s}\right) \leq V_s \leq 360 \left(\frac{m}{s}\right)$ $15 \leq N < 50.0$ $50 \text{ kPa} \leq S_u < 100 \text{ kPa}$
<p><b>E</b></p>	<p>Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de corte, o</p> <p>Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas.</p>	$180 \left(\frac{m}{s}\right) < V_s$ $I_p > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} < S_u$
<p><b>F</b></p>	<p>Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotécnico. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <p><b>F1</b> - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.</p> <p><b>F2</b> - Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H &gt; 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).</p> <p><b>F3</b> - Arcillas de muy alta plasticidad (H &gt; 7.5m con un índice de plasticidad IP &gt; 75).</p> <p><b>F4</b> - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H &gt; 30m).</p> <p><b>F5</b> - Suelos con contrastes de impedancia <math>\alpha</math> ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con</p>	

	variaciones bruscas de velocidades de onda de corte.  <b>F6 - Rellenos colocados sin control ingenieril.</b>	
--	--	--

Tabla 2-2: Clasificación de los perfiles de suelo. (NEC Committee, 2014)

2.14.4 Coeficientes de perfil de suelo  $F_a, F_d, F_s$

Para los suelos tipo F, no se proporcionan valores de  $F_a, F_d, F_s$  debido a que requieren un estudio especial, como se mencionó anteriormente.

2.14.4.1 *Coefficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto*

En la [Tabla 2-3](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_a$  que amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	<b>0.15</b>	<b>0.25</b>	<b>0.30</b>	<b>0.35</b>	<b>0.40</b>	<b>&gt;0.50</b>
<b>A</b>	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
<b>B</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>C</b>	1.40	1.30	1.25	1.23	1.20	1.18
<b>D</b>	1.60	1.40	1.30	1.25	1.20	1.12
<b>E</b>	1.80	1.40	1.25	1.10	1.00	0.85

Tabla 2-3: Tipo de suelo y factores de sitio  $F_a$ . (NEC Committee, 2014)

2.14.4.2 *Amplificación de las ordenadas del  $S_d$  elástico para diseño en roca*

En la [Tabla 2-4](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_d$  que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.50
<b>A</b>	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
<b>B</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>C</b>	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
<b>D</b>	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
<b>E</b>	2.10	1.75	1.70	1.65	1.60	1.50

Tabla 2-4: Tipo de suelo y factores de sitio  $F_d$ . (NEC Committee, 2014)

#### 2.14.4.3 Comportamiento no lineal de los suelos

En la [Tabla 2-5](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_s$  que consideran el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.50
<b>A</b>	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
<b>B</b>	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
<b>C</b>	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
<b>D</b>	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
<b>E</b>	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00

Tabla 2-5: Tipo de suelo y factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$ . (NEC Committee, 2014)

Se detallan las siguientes constantes, para definir por completo el espectro de respuesta elástico de aceleraciones  $S_a$ :

- ✓  $\eta$ , de los análisis de las ordenadas de los espectros de peligro uniforme en roca para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años), que se obtienen a partir de los valores de aceleraciones espectrales proporcionados por las curvas de peligro sísmico ([ver Fig 2-30](#)) y, normalizando estos para la aceleración máxima en el terreno Z, se definieron los valores de la relación espectral,  $\eta (S_a/Z)$ , en

roca), que varían dependiendo de la región del Ecuador, adoptando los siguientes valores:

- $\eta=1.80$ : Provincias de la Costa (Excepto Esmeraldas).
- $\eta=2.48$ : Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos.
- $\eta=2.60$ : Provincias del Oriente.
- ✓  $r$ , Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto:
  - $r=1.0$ : para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E.
  - $r=1.5$ : para tipo de suelo E.
- ✓  $T_c$ , Periodo límite de vibración en el espectro de diseño elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño. Se establece mediante la siguiente expresión:
  - $T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a}$

El espectro de diseño elástico obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5% y se obtiene mediante la [Ecuación 2-24](#) y [Ecuación 2-25](#), válida para periodos de vibración natural  $T_n$  pertenecientes a 2 rangos.

$$S_a = \eta Z F_a \quad \text{para } 0 \leq T_n \leq T_c$$

*Ecuación 2-24: Aceleración correspondiente a la meseta del espectro. (NEC Committee, 2014)*

$$S_a = \eta Z F_a \left( \frac{T_c}{T_n} \right)^r \quad \text{para } T_c < T_n$$

*Ecuación 2-25: Aceleración correspondiente a la cola del espectro. (NEC Committee, 2014)*

Vale recalcar que: “Para determinar el espectro elástico para diferentes periodos de retorno, se podrá estimar dicho espectro mediante el procedimiento descrito, utilizando los valores de los coeficientes  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$  obtenidos mediante una interpolación lineal a partir de los valores discretos de la [Tabla 2-3](#), [Tabla 2-4](#) y [Tabla 2-5](#), considerando en este caso un PGA igual a  $Z$ ”. (NEC Committee, 2014)

En la [Fig 2-31](#) se observa el espectro de diseño elástico en aceleración para las características que se detallan en la [Tabla 2-6](#):

Espectro de diseño elástico en aceleraciones	
Zona Sísmica	V
Tipo de Suelo	C
Región	Sierra
Periodo de retorno	475 años

Tabla 2-6: Parámetros para  $S_a$  de la Fig 2-31. (Elaboración propia)

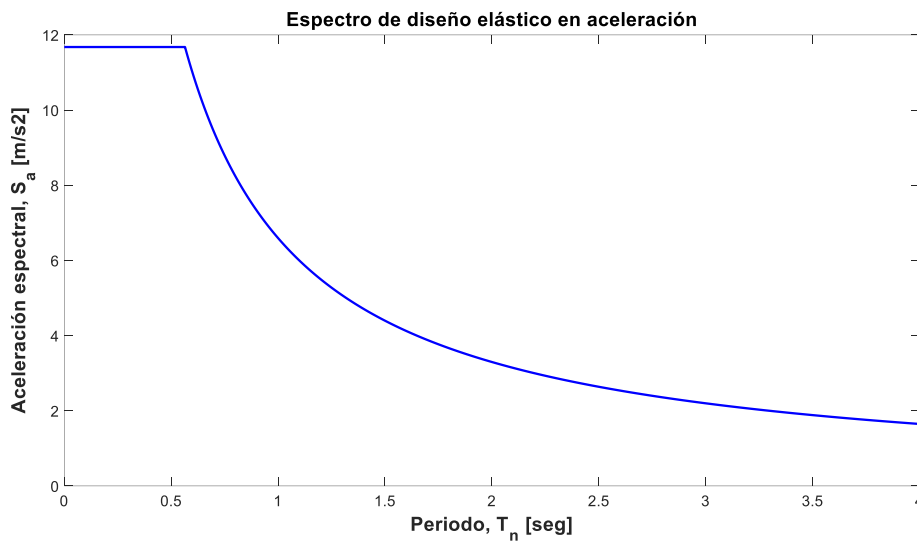


Fig 2-31: Espectro de diseño elástico en aceleración. (Elaboración propia)

### 2.15 Análisis de Fourier

Joseph Fourier (matemático y físico francés) es reconocido por sus trabajos sobre la descomposición de funciones periódicas en series trigonométricas convergentes, llamadas series de Fourier. La transformada de Fourier permite transformar una señal en el tiempo (ver Fig 2-32) a una señal en frecuencia (Fig 2-33) y así verificar el comportamiento de la señal en el dominio de la frecuencia.

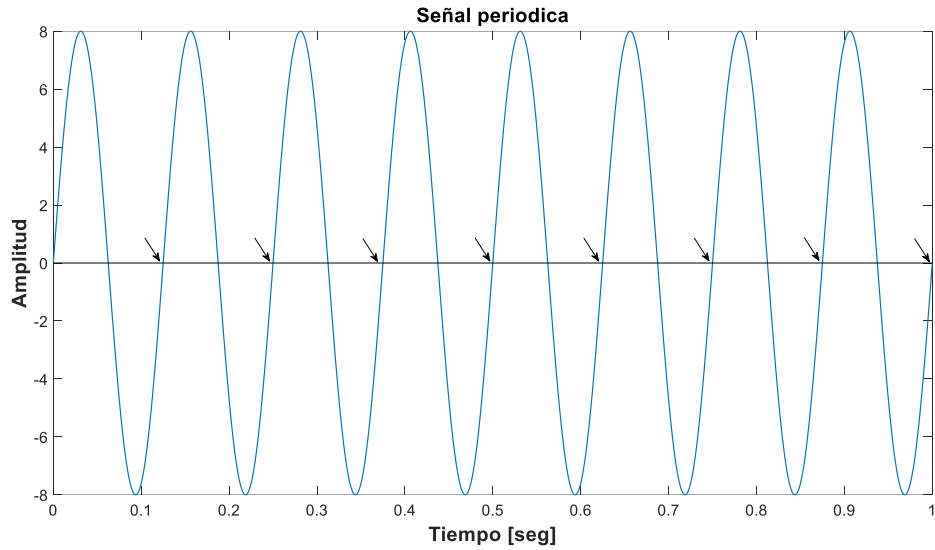


Fig 2-32: Señal periódica,  $f=8$  [hz],  $A=8$ . (Elaboración propia)

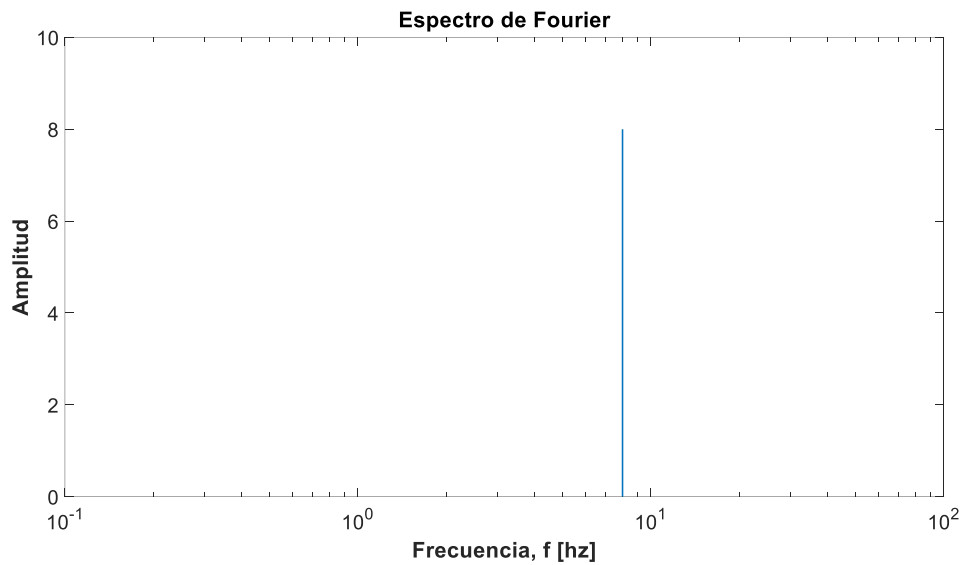


Fig 2-33: Espectro de Fourier de la Fig 2-32. (Elaboración propia)

### 2.15.1 Serie trigonométrica de Fourier

**Función periódica:** función que se repite a sí mismo cada cierto intervalo de tiempo.

Toda función periódica  $f(t)$  continua y de periodo  $T$ , se puede expresar en una serie infinita de senos y cosenos:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t)$$

Ecuación 2-26: Serie trigonométrica de Fourier. (Villaverde, 2009)

Donde:

- $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \rightarrow$  valor medio de la función periódica  $f(t)$
- $\omega_m = m\omega_0$
- $a_m = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \omega_m t dt$
- $b_m = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \omega_m t dt$

### 2.15.2 Serie exponencial compleja de Fourier

De la identidad de Euler:

$$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha$$

$$\cos \omega_m t = \frac{1}{2}(e^{i\omega_m t} + e^{-i\omega_m t})$$

$$\sin \omega_m t = \frac{1}{2i}(e^{i\omega_m t} - e^{-i\omega_m t})$$

Se reemplaza las identidades de Euler en la [Ecuación 2-26](#):

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ a_m \frac{1}{2}(e^{i\omega_m t} + e^{-i\omega_m t}) + b_m \frac{1}{2i}(e^{i\omega_m t} - e^{-i\omega_m t}) \right]$$

Se reagrupa términos y se reemplaza  $\frac{1}{i} = -i$

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2}(a_m - ib_m)e^{i\omega_m t} + \frac{1}{2}(a_m + ib_m)e^{-i\omega_m t} \right] (*)$$

Si:

$$c_0 = \frac{1}{2}a_0; c_m = \frac{1}{2}(a_m - ib_m); c_{-m} = \frac{1}{2}(a_m + ib_m)$$

Se reemplaza estos coeficientes en (\*):

$$f(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (c_m e^{i\omega_m t} + c_{-m} e^{-i\omega_m t})$$

Se desarrolla la sumatoria:

$$f(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} c_m e^{i\omega_m t} + \sum_{m=1}^{\infty} c_{-m} e^{-i\omega_m t}$$

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{i\omega_m t}$$

*Ecuación 2-27: Serie exponencial compleja de Fourier. (Villaverde, 2009)*

Donde, si se desarrollan los coeficientes de la serie exponencial compleja con los coeficientes de la serie trigonométrica:

$$c_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \right) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

$$c_m = \frac{1}{2} (a_m - ib_m) = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \omega_m t dt - i \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \omega_m t dt \right)$$

$$c_m = \frac{1}{T} \left[ \int_{-T/2}^{T/2} f(t) (\cos \omega_m t - i \sin \omega_m t) dt \right]$$

$$c_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i\omega_m t} dt$$

$$c_{-m} = \frac{1}{2} (a_m + ib_m) = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \omega_m t dt + i \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \omega_m t dt \right)$$

$$c_{-m} = \frac{1}{T} \left[ \int_{-T/2}^{T/2} f(t) (\cos \omega_m t + i \sin \omega_m t) dt \right]$$

$$c_{-m} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{i\omega_m t} dt$$

Sin embargo, se debe notar que si la función  $f(t)$  es real, entonces:

$$c_{-m} = c_m^*$$

En donde \* indica la conjugada compleja.

### 2.15.3 Transformada de Fourier

Si una función  $f(t)$  es no periódica, pero está definida desde  $-\infty < t < \infty$  y su integral:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$$

Entonces es posible expresar la función en términos de la [Ecuación 2-27](#) interpretando esta como una función periódica con periodo infinitamente largo. Si se reemplaza el coeficiente  $c_m$  en la [Ecuación 2-27](#) y  $\frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi}$ :

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(x) e^{-i\omega_m x} dx \right] \omega_0 e^{i\omega_m t}$$

Se introdujo la variable  $x$  para evitar la confusión con la variable  $t$ . Si  $T \rightarrow \infty$  entonces  $\omega_0$  es infinitesimalmente pequeño o lo que es lo mismo  $\omega_0 \rightarrow d\omega$ , la variable discreta  $\omega_m$  se convierte en variable continua  $\omega$  y la sumatoria se convierte en la integral sobre la variable continua  $\omega$ :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \right] e^{i\omega t} d\omega$$

O puede ser escrito como:

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

*Ecuación 2-28: Transformada inversa de Fourier. (Villaverde, 2009)*

Donde:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

*Ecuación 2-29: Transformada de Fourier. (Villaverde, 2009)*

La [Ecuación 2-29](#) se denomina la transformada de Fourier de la función  $f(t)$ .  $F(\omega)$  es función de la frecuencia, por lo tanto  $F(\omega)$  representa la función  $f(t)$  en el dominio de la frecuencia.

#### 2.15.4 Transformada de Fourier para movimiento del suelo

La transformada de Fourier es la representación de una historia de tiempo (por ejemplo: acelerograma) en el dominio de la frecuencia. Si  $\ddot{u}_g(t)$  representa la aceleración del movimiento del suelo, el espectro de Fourier de  $\ddot{u}_g(t)$  está definido por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt$$

El espectro de Fourier sirve para analizar la composición del movimiento del suelo en términos de componentes armónicos. En particular, la amplitud del espectro de Fourier se usa para identificar las frecuencias del movimiento del suelo que poseen las amplitudes más grandes. Por lo que, este tipo de análisis se conoce como análisis de contenido frecuencial. ([Villaverde, 2009](#))

La importancia del estudio del espectro de Fourier radica en que el contenido frecuencial de un movimiento de suelo es función del mecanismo de rotura, profundidad focal, distancia epicentral, condiciones de sitio, magnitud del sismo, entre otros.

#### 2.15.5 Transformada discreta de Fourier

En principio, la definición original se puede usar directamente para obtener el espectro de Fourier del movimiento del suelo  $\ddot{u}_g(t)$ . Sin embargo, en la práctica la integración no puede llevarse a cabo analíticamente ya que en la mayoría de los casos  $\ddot{u}_g(t)$  no puede

expresarse en forma analítica (con una ecuación que relacione la aceleración en función del tiempo). Por lo tanto, es necesaria una forma discreta de la transformada de Fourier [DFT, por sus siglas en inglés]. (Villaverde, 2009)

Se obtiene de la siguiente manera:

$$F(\omega) = \int_0^{t_d} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt$$

Donde:

- ✓  $t_d$ , es la duración del acelerograma.
- ✓  $\ddot{u}_g(t)$ , es la aceleración del suelo en el tiempo  $t$ .

Si  $\ddot{u}_g(t)$  está definida en  $N$  puntos discretos correspondientes a  $t_j = j \Delta t, j = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$ , donde  $\Delta t = t_d/N$  representa el intervalo entre puntos, entonces la integral se puede reemplazar por el sumatoria de  $N$  áreas iguales a  $\ddot{u}_g(t_j)e^{-i\omega t_j} dt$ :

$$F(\omega) = \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-i\omega t_j} dt = t_d \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-i\omega j(t_d/N)}$$

Además,  $F(\omega)$  solo se obtiene para valores discretos  $\omega_m = m \Delta\omega, m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$  donde  $\Delta\omega$  es cualquier incremento arbitrario de frecuencia, entonces los valores discretos de  $F(\omega)$  están dados por:

$$F(\omega_m) = t_d \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-im\Delta\omega j(t_d/N)} \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

Para recuperar los valores exactos de  $\ddot{u}_g(t)$  mediante la aplicación de la correspondiente transformada inversa de Fourier a  $F(\omega)$ , es necesario igualar  $\Delta\omega = 2\pi/t_d$ :

$$F(\omega_m) = t_d \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-i2\pi(jm/N)} \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

También se puede expresar como:

$$F(\omega) = t_d C_m \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

Donde:

$$C_m = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-i2\pi(jm/N)} \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

*Ecuación 2-30: Transformada discreta de Fourier. (Villaverde, 2009)*

En la [Ecuación 2-30](#) se presenta la versión discretizada de la fórmula para calcular los coeficientes  $C_m$  de la serie exponencial compleja de Fourier.

Vale recalcar que para la obtención del espectro de Fourier mediante la [Ecuación 2-30](#), las únicas frecuencias para las que se puede calcular una amplitud son las correspondientes a  $0 \leq m \leq N/2$ . La razón para esto es que los coeficientes  $C_m$  obtenidos para  $m > N/2$  son solo repeticiones de aquellos determinados por  $m \leq N/2$ . (Villaverde, 2009). Se verifica con el simple reemplazo de  $m$  por  $-(N - m)$  en la [Ecuación 2-30](#):

$$C_{-(N-m)} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{i2\pi j((N-m)/N)} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{u}_g(t_j) e^{-i2\pi(jm/N)} = C_m$$

Se debe acotar que en la práctica el espectro de Fourier se obtiene mediante el uso de un algoritmo altamente eficaz para el cálculo de la transformada discreta de Fourier. Este algoritmo se denomina transformada rápida de Fourier [FFT, por sus siglas en inglés] y se detallará la siguiente sección.

### 2.15.6 Transformada rápida de Fourier

La FFT es un algoritmo numérico que acelera el cálculo de la DFT. Fue introducida por J. W. Cooley y J.W. Tukey en 1965. Este algoritmo ha hecho del análisis en el dominio de la frecuencia una realidad práctica. A continuación, se describe el concepto en el que se base la FFT.

Como se observó en la sección anterior, la DFT de una función discreta de tiempo o secuencia finita  $\{x_j\}, j = 1, 2, \dots, (N - 1)$ , donde  $N$  es el número de datos de la función, es otra secuencia finita  $\{X_m\}$ , donde:

$$X_m = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i(2\pi m j / N)} \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

Suponga que  $\{x_j\}$  es la secuencia de la Fig 2-34, donde  $N$  es un número par. Al dividir esta secuencia en dos secuencias cortas  $\{y_j\}$  y  $\{z_j\}$  (ver Fig 2-35), se obtiene:

$$y_j = x_{2j} \quad j = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

$$z_j = x_{2j+1} \quad j = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

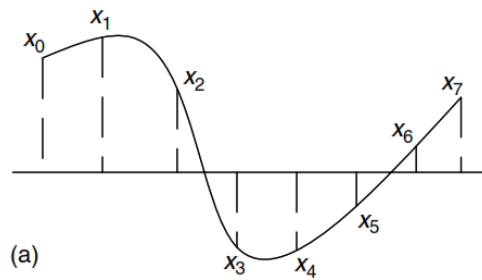


Fig 2-34: Secuencia finita  $\{x_j\}$ . (Villaverde, 2009)

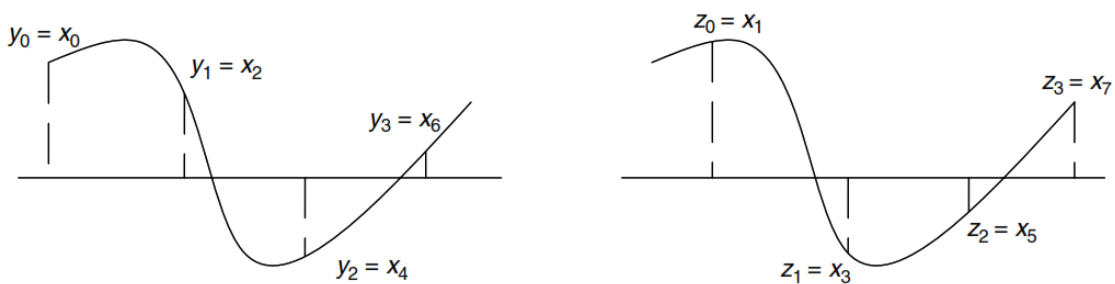


Fig 2-35: Secuencias cortas provenientes de  $\{x_j\}$ . (Villaverde, 2009)

La DFT de las secuencias cortas es  $\{Y_m\}$  y  $\{Z_m\}$ :

$$Y_m = \frac{1}{N/2} \sum_{j=0}^{(N/2)-1} y_j e^{-i(2\pi m j / (N/2))} \quad m = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

$$Z_m = \frac{1}{N/2} \sum_{j=0}^{(N/2)-1} z_j e^{-i(2\pi m j / (N/2))} \quad m = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Por lo que, si la DFT de la secuencia original  $\{x_j\}$  se separa en términos pares e impares:

$$X_m = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{j=0}^{(N/2)-1} x_{2j} e^{-i(2\pi m(2j) / N)} + \sum_{j=0}^{(N/2)-1} x_{2j+1} e^{-i(2\pi m(2j+1) / N)} \right\}$$

También se la puede expresar en función de las secuencias cortas:

$$X_m = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{j=0}^{(N/2)-1} y_j e^{-i(2\pi m j / (N/2))} + e^{-i(2\pi m / N)} \sum_{j=0}^{(N/2)-1} z_j e^{-i(2\pi m j / (N/2))} \right\}$$

Si se reemplaza la DFT de las secuencias cortas:

$$X_m = \frac{1}{2} (Y_m + e^{-i(2\pi m / N)} Z_m) \quad m = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Esta expresión aplica para los valores  $0 \leq m \leq \frac{N}{2} - 1$ , es decir para la mitad de los elementos de la secuencia  $\{X_m\}$ . La mitad adicional en el concepto: Si  $Y_m$  y  $Z_m$  son periódicas en  $m$  y se repiten así mismo con un periodo  $N/2$ , se cumple que:

$$Y_{m-(N/2)} = Y_m$$

$$Z_{m-(N/2)} = Z_m$$

En consecuencia, los elementos de la secuencia completa se determinan como sigue:

$$X_m = \frac{1}{2} (Y_m + e^{-i(2\pi m / N)} Z_m) \quad m = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Y:

$$X_{(N/2)+m} = \frac{1}{2} (Y_m + e^{-i(2\pi(m+N/2) / N)} Z_m) \quad m = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Si se reemplaza la identidad  $e^{-i\pi} = -1$ , se simplifica a:

$$X_{(N/2)+m} = \frac{1}{2} (Y_m - e^{-i(2\pi m / N)} Z_m) \quad m = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Se introduce una nueva variable definida por:

$$W = e^{-i(2\pi/N)}$$

Se obtiene que los elementos de la secuencia  $\{X_m\}$  se expresan:

$$X_m = \frac{1}{2}(Y_m + W^m Z_m) \quad m = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

$$X_{(N/2)+m} = \frac{1}{2}(Y_m - W^m Z_m) \quad m = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

*Ecuación 2-31: Ecuaciones bases para la FFT. (Villaverde, 2009)*

Por lo tanto: la DFT de la secuencia original  $\{x_j\}$  se puede obtener a partir de la DFT de las 2 medias secuencias  $\{y_j\}$  y  $\{z_j\}$ . La [Ecuación 2-31](#) constituye la base para la FFT. Si el número original de elementos  $N$  de la secuencia  $\{x_j\}$  es una potencia de 2, entonces las secuencias  $\{y_j\}$  y  $\{z_j\}$  pueden dividirse en medias secuencias y continuar dividiéndose hasta que las últimas subsecuencias contengan solo un elemento cada una. (Villaverde, 2009)

Ahora se aprecia ventaja de la FFT sobre el enfoque directo de la DFT. El cálculo directo de la DFT requiere aproximadamente un número igual a  $N^2$  operaciones aritméticas, por el contrario, la FFT reduce este número a aproximadamente  $N \log_2 N$ . Por ejemplo, para  $N = 2^{15}$  la DFT requiere  $1.1 \times 10^9$  operaciones, mientras que la FFT involucra  $4.9 \times 10^5$  operaciones.

En la [Fig 2-36](#), se observa el espectro de Fourier del acelerograma de la [Fig 2-21](#) (durante toda la duración de este). Y en la [Fig 2-37](#) el espectro de Fourier usando únicamente la parte comprendida en la duración significativa. Se observa que se pierden ciertas frecuencias y amplitudes en comparación de la [Fig 2-36](#). Debido a que se requiere obtener un análisis del contenido frecuencial a detalle, en el presente trabajo, se empleará todo el registro original.

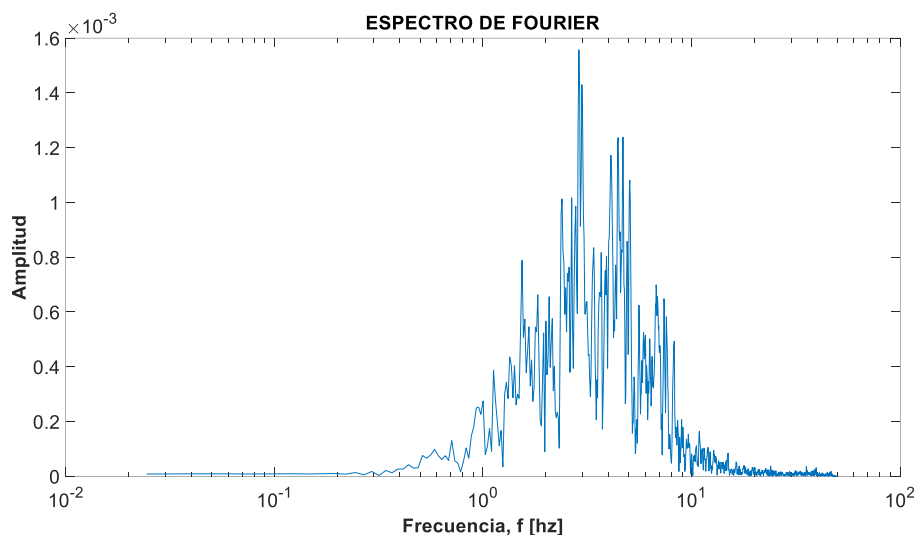


Fig 2-36: Espectro de Fourier del Acelerograma de la Fig 2-21. (Elaboración propia)

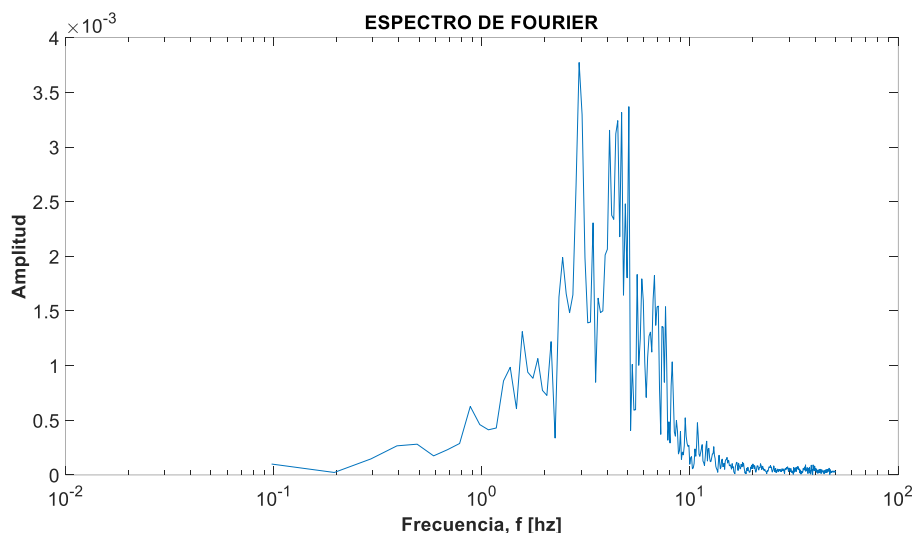


Fig 2-37: Espectro de Fourier del Acelerograma de la Fig 2-21 durante la Dur. significativa. (Elaboración propia)

### 2.15.7 Suavizado de espectros de Fourier

Katsuaki Konno & Tatsuo Ohmachi, en 1998 propusieron la [Ecuación 2-32](#) (de tipo trigonométrica- logarítmica) que es una función de suavizado (smoothing function, en inglés) para funciones con la finalidad de aclarar el aspecto de las curvas. En el presente trabajo se aplica para suavizar el espectro de Fourier, ya que como se mencionó anteriormente se desea realizar un análisis del contenido frecuencial a detalle.

$$W_B(f, f_c) = \left[ \frac{\sin \left( \log_{10} \left( \frac{f}{f_c} \right)^b \right)}{\left( \log_{10} \left( \frac{f}{f_c} \right)^b \right)} \right]^4$$

*Ecuación 2-32: Smoothing Function. (Konno & Ohmachi, 1998)*

Donde:

- $f$ =frecuencia;
- $f_c$ =frecuencia central;
- $b$ = coeficiente de ancho de banda.

**Frecuencia central:** frecuencia que corresponde a la máxima amplitud del espectro de Fourier, en donde se realiza el suavizado con un coeficiente exponencial.

**Ancho de banda:** es la longitud medida del rango de frecuencias comprendidas entre el 70% de la máxima amplitud del espectro de Fourier.

## 2.16 Acelerogramas sintéticos

Para la solución de problemas ingenieriles como por ejemplo la respuesta de estructuras inelásticas (estructuras con relación de esfuerzo- deformación no lineal), es necesario usar la aceleración en el tiempo como dato de entrada. Para ello existen dos posibilidades, 1) usar acelerogramas registrados en un sitio cuyas condiciones geológicas y tectónicas concuerden con las condiciones del sitio de emplazamiento de la estructura, o 2) usar acelerogramas modificados (sintéticos) cuyo espectro de respuesta se ajuste al espectro de diseño generado para el sitio. Debido a que acelerogramas que coincidan con las condiciones geológicas y tectónicas, no siempre están disponibles (y aunque así fuera, es difícil esperar que un sismo futuro en una zona en particular pueda generar el mismo nivel de energía- aceleración- movimiento), el uso de acelerogramas sintéticos se ha vuelto se ha vuelto la alternativa preferida en el diseño práctico. (Villaverde, 2009)

La solución dinámica no lineal de un sistema geotécnico, estructural o mixto es un problema complejo y el uso de espectros de diseño elásticos no se considera un método adecuado para generar análisis a detalle. El concepto de ajuste espectral se basa en modificar un acelerograma de tal manera que su espectro se ajuste de manera cercana al espectro objetivo en un amplio rango de periodos; modificando lo menos posible parámetros relacionados con la amplitud, contenido frecuencial y duración. (Flores & Ayes, 2018)

A continuación, se detallan algunos procedimientos existentes para realizar ajustes espectrales:

#### 2.16.1 Escalado Lineal

Este tipo de escalado consiste en multiplicar por un factor constante a todo el acelerograma. Por lo general el factor empleado se utiliza para ajustar el espectro de respuesta al PGA, o generar el ajuste en la zona de cercana al periodo fundamental de la estructura en análisis. Se recomienda un factor de 2- 3. (Flores & Ayes, 2018)

#### 2.16.2 Escalado en el Dominio de la frecuencia

Este método se basa en ajustar el espectro de Fourier basado en la relación existente entre el espectro de diseño y el espectro de respuesta del acelerograma original. Aunque el procedimiento es directo, este escalado no mantiene el carácter no estacionario del acelerograma original, es decir genera acelerogramas que no se parecen a uno real. Desafortunadamente el ajuste del espectro de Fourier corrompe la respuesta en velocidad y desplazamiento y puede causar movimientos con un alto y no realista contenido energético. Existen softwares que realizan este escalado, por ejemplo: SIMQKE, RASCAL, SYNTH, TARSCH. (Flores & Ayes, 2018)

2.16.3 Escalado en el Dominio del tiempo

Para superar la desventaja del escalado mediante el ajuste de espectro de Fourier, se creó un ajuste mediante una función que permite la adición de ondas denominadas wavelets. Esta función presenta duración finita con un promedio igual a cero, su amplitud típicamente inicia en cero, se incrementa y posteriormente vuelve a cero. Este procedimiento introduce menos energía al movimiento del suelo.

### 3. CAPÍTULO III: GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

#### 3.1 Obtención de registros reales de la RENAC

El Instituto Geofísico entregó registros reales de la RENAC que se detallan en las Tabla 3-1 y [Tabla 3-2](#). En ellas se observan: fecha del evento sísmico, profundidad del foco y coordenadas geográficas del epicentro.

CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS							
Nº	FECHA	HORA (TU)	PROFUND. (km)	MAGN. [Mw]	LONG.	LAT.	NO.
1	sábado, 29 de octubre de 2011	13:50:00	6,00	3,97	-0,13	-78,40	4
2	martes, 12 de agosto de 2014	19:57:00	5,00	5,10	-0,05	-78,42	4
3	sábado, 16 de agosto de 2014	15:08:00	4,00	4,80	-0,05	-78,41	4
4	martes, 15 de marzo de 2016	13:02:00	8,00	4,10	-0,19	-78,49	5
5	martes, 9 de agosto de 2016	4:23:00	6,00	4,30	-0,15	-78,37	5

Nº	FECHA	HORA (TU)	PROFUND. (km)	MAGN. [Mw]	LONG.	LAT.	NO.
6	lunes, 5 de septiembre de 2016	0:23:00	5,00	4,20	-0,16	-79,35	4
7	martes, 3 de abril de 2018	1:15:00	3,00	4,10	-0,17	-78,64	5

Tabla 3-1: Registros reales 1 de la RENAC. (Instituto Geofísico, 2016)

CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS							
Nº	FECHA	HORA (TU)	PROFUND. (km)	MAGN. [ML <sub>v</sub> ]	LONG.	LAT.	NO.
8	jueves, 21 de marzo de 2019	22:48:00	4,93	3,78	-0,04	-78,44	3
9	jueves, 21 de marzo de 2019	22:58:00	4,86	3,86	-0,04	-78,44	3
10	jueves, 21 de marzo de 2019	23:12:00	3,23	2,53	-0,04	-78,43	3
						TOT:	40

Tabla 3-2: Registros reales 2 de la RENAC. (Instituto Geofísico, 2016)

**Nota 1:** La magnitud  $M_{L_v}$  es la magnitud local calculada en la componente vertical, usando una corrección para adecuarla a la  $M_L$  estándar de Richter.

**Nota 2:** El nombre de cada archivo empieza con la letra de la componente (i.e. E= Este-oeste, N= Norte- sur, Z= vertical), seguida por la fecha del evento y el nombre de la estación. Los archivos contienen la ubicación de cada estación, la tasa de muestreo, y las unidades de aceleración. La señal debe ser reconstruida leyendo la información por filas de izquierda a derecha para conformar el vector de aceleración [serie de tiempo vs. aceleración] (ver Fig 3-1). En el Anexo 1-1 se observa la ubicación del epicentro de cada uno de los registros de la RENAC en un mapa.

**Nota 3:** La última columna de las Tabla 3-1

CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS							
Nº	FECHA	HORA (TU)	PROFUND. (km)	MAGN. [Mw]	LONG.	LAT.	NO.

1	sábado, 29 de octubre de 2011	13:50:00	6,00	3,97	-0,13	-78,40	4
2	martes, 12 de agosto de 2014	19:57:00	5,00	5,10	-0,05	-78,42	4
3	sábado, 16 de agosto de 2014	15:08:00	4,00	4,80	-0,05	-78,41	4
4	martes, 15 de marzo de 2016	13:02:00	8,00	4,10	-0,19	-78,49	5
5	martes, 9 de agosto de 2016	4:23:00	6,00	4,30	-0,15	-78,37	5
Nº	FECHA	HORA (TU)	PROFUND. (km)	MAGN. [Mw]	LONG.	LAT.	NO.
6	lunes, 5 de septiembre de 2016	0:23:00	5,00	4,20	-0,16	-79,35	4
7	martes, 3 de abril de 2018	1:15:00	3,00	4,10	-0,17	-78,64	5

y [Tabla 3-2](#) indican el número de estaciones que registró cada evento. Es decir, se tiene 40 registros de 10 eventos sísmicos. Se tiene un total de 120 registros debido a que cada evento sísmico se detectó en sus 3 componentes ortogonales.

```

E_201903210300_EPNI_5R60E2_100: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Archivo de aceleración parte de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) Ecuador
Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)

Fecha del evento UTM (aamddd):          2019  3  21
Hora del registro UTM (hhmmss):  3  48 26.00
Estación:                               EPNI
Latitud:                                -0.2120
Longitud:                                -78.4900
Altitud:                                 2813
Componente:                              E
Frecuencia de muestreo (Hz):           100
Unidades: cm/s^2

0.0202 0.0246 0.0076 -0.0181 -0.0339 -0.0181
0.0183 0.0296 0.0145 -0.0031 -0.0150 -0.0138
0.0020 0.0177 0.0151 -0.0012 -0.0106 -0.0081
0.0026 0.0101 0.0126 0.0001 -0.0181 -0.0119
-0.0037 0.0020 0.0145 0.0101 -0.0081 -0.0163
-0.0068 -0.0024 -0.0018 0.0045 0.0120 0.0089
-0.0050 -0.0012 -0.0012 -0.0068 0.0020 0.0120
-0.0094 -0.0181 -0.0075 -0.0056 -0.0012 0.0076
0.0101 -0.0018 -0.0018 0.0051 0.0064 -0.0068
-0.0056 0.0089 0.0145 0.0089 0.0082 0.0026
-0.0075 -0.0031 -0.0050 -0.0018 -0.0024 -0.0037
-0.0081 -0.0081 -0.0018 -0.0112 -0.0175 -0.0056

```

Fig 3-1: Formato archivo .txt de registros de la RENAC. (Instituto Geofísico, 2016)

En la [Tabla 3-3](#) se detallan las coordenadas de las estaciones que registraron los eventos sísmicos que el Instituto Geofísico proveyó de la RENAC y en el [Anexo 1-2](#) se observa la ubicación de cada estación en un mapa.

ESTACIONES RENAC				
Nº	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
1	CIRC	-0,1960	-78,4870	2791
2	EPN	-0,2120	-78,4900	2813
3	QUIT	-0,2960	-78,5480	2907
4	SANFR	-0,2190	-78,5200	2882
5	SADP	-0,0026	-78,4500	2449

*Tabla 3-3: Coordenadas de estaciones RENAC. (Instituto Geofísico, 2016)*

### 3.2 Características de la base de datos

#### 3.2.1 PGA y duración significativa

Los 120 registros reales se ingresaron a MATLAB generando así la base de datos. Para ello se renombró cada archivo *.txt* con el número 1000, 1001, ..., 1120 y así evitar el extenso nombre original de cada uno de ellos. En base a funciones generadas en MATLAB:

- ✓ Se graficaron los acelerogramas ([ver Anexo 2-1 a Anexo 2-4](#)).
- ✓ Se calculó el PGA; se tabuló el valor en la [Tabla 3-4](#) y se graficaron en los [Anexo 2-1 a Anexo 2-4](#). En los [Anexo 1-3 a Anexo 1-12](#) se encuentran los mapas de cada evento sísmico, en los cuales se representa el PGA registrado en cada estación frente al epicentro.
- ✓ Se calculó la duración significativa; se tabuló el valor en la [Tabla 3-5](#) y se graficaron en los [Anexo 3-1 a Anexo 3-4](#).

REGISTROS SÍSMICOS								
No.	ESTACIÓN	COMPONENTES			PGA [g]			
		E	N	Z	E	N	Z	PROM.
1	CIRC	1001	1002	1003	0,06	0,04	0,02	0,04

	EPN	1004	1005	1006	0,02	0,02	0,01	0,02	
	QUIT	1007	1008	1009	0,00	0,01	0,00	0,00	
	SANFR	1010	1011	1012	0,02	0,02	0,01	0,02	
2	CIRC	1013	1014	1015	0,04	0,04	0,02	0,03	
	EPN	1016	1017	1018	0,02	0,02	0,01	0,02	
	QUIT	1019	1020	1021	0,01	0,01	0,00	0,01	
	SANFR	1022	1023	1024	0,02	0,01	0,01	0,01	
3	CIRC	1025	1026	1027	0,02	0,02	0,01	0,02	
	EPN	1028	1029	1030	0,01	0,02	0,01	0,01	
	QUIT	1031	1032	1033	0,00	0,00	0,00	0,00	
	SANFR	1034	1035	1036	0,01	0,01	0,01	0,01	
4	CIRC	1037	1038	1039	0,01	0,02	0,01	0,01	
	EPN	1040	1041	1042	0,01	0,01	0,01	0,01	
	QUIT	1043	1044	1045	0,00	0,00	0,00	0,00	
	SANFR	1046	1047	1048	0,03	0,02	0,01	0,02	
	SADP	1049	1050	1051	0,01	0,01	0,00	0,01	
5	CIRC	1052	1053	1054	0,14	0,06	0,03	0,08	
	EPN	1055	1056	1057	0,06	0,06	0,02	0,05	
	QUIT	1058	1059	1060	0,01	0,01	0,01	0,01	
	SANFR	1061	1062	1063	0,04	0,04	0,03	0,04	
	SADP	1064	1065	1066	0,02	0,02	0,01	0,02	
6	CIRC	1067	1068	1069	0,19	0,08	0,04	0,10	
	<b>No.</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>COMPONENTES</b>			<b>PGA [G]</b>			
			<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>PROM.</b>
		EPN	1070	1071	1072	0,10	0,08	0,03	0,07
		QUIT	1073	1074	1075	0,01	0,02	0,01	0,01
		SANFR	1076	1077	1078	0,05	0,06	0,04	0,05
	7	CIRC	1079	1080	1081	0,01	0,01	0,01	0,01
EPN		1082	1083	1084	0,01	0,01	0,00	0,01	
QUIT		1085	1086	1087	0,00	0,00	0,00	0,00	
SANFR		1088	1089	1090	0,02	0,01	0,01	0,01	
SADP		1091	1092	1093	0,00	0,00	0,00	0,00	
8	CIRC	1094	1095	1096	0,00	0,00	0,00	0,00	
	EPN	1097	1098	1099	0,00	0,00	0,00	0,00	
	SANFR	1100	1101	1102	0,00	0,00	0,00	0,00	
9	CIRC	1103	1104	1105	0,00	0,00	0,00	0,00	
	EPN	1106	1107	1108	0,00	0,00	0,00	0,00	
	SANFR	1109	1110	1111	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	CIRC	1112	1113	1114	0,00	0,00	0,00	0,00	

	EPN	1115	1116	1117	0,00	0,00	0,00	0,00
	SANFR	1118	1119	1120	0,00	0,00	0,00	0,00
							<b>PROM.=</b>	0,02

Tabla 3-4: PGA de la base de datos. (Elaboración propia)

REGISTROS SÍSMICOS								
No.	ESTACIÓN	COMPONENTES			DUR. SIGNIFICATIVA [s]			
		E	N	Z	E	N	Z	PROM.
1	CIRC	1001	1002	1003	6,95	7,69	8,20	7,61
	EPN	1004	1005	1006	8,33	9,08	9,83	9,08
	QUIT	1007	1008	1009	18,28	14,23	20,70	17,74
	SANFR	1010	1011	1012	8,07	7,92	9,97	8,65
2	CIRC	1013	1014	1015	15,31	18,86	19,16	17,78
	EPN	1016	1017	1018	20,81	22,88	23,25	22,31
	QUIT	1019	1020	1021	46,32	49,88	65,24	53,81
	SANFR	1022	1023	1024	24,00	24,73	22,61	23,78
3	CIRC	1025	1026	1027	13,83	11,09	14,45	13,12
	EPN	1028	1029	1030	14,04	12,95	14,08	13,69
	QUIT	1031	1032	1033	30,35	34,62	44,31	36,43
	SANFR	1034	1035	1036	17,84	17,95	23,16	19,65
4	CIRC	1037	1038	1039	8,56	7,40	7,27	7,74
	EPN	1040	1041	1042	9,85	11,23	10,57	10,55
	QUIT	1043	1044	1045	10,67	12,97	13,53	12,39
	<b>ESTACIÓN</b>	<b>COMPONENTES</b>			<b>DUR. SIGNIFICATIVA</b>			
		<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>PROM.</b>
	SANFR	1046	1047	1048	6,58	6,86	6,51	6,65
SADP	1049	1050	1051	22,66	25,86	18,31	22,28	
5	CIRC	1052	1053	1054	8,13	11,76	12,75	10,88
	EPN	1055	1056	1057	7,91	9,34	12,73	9,99
	QUIT	1058	1059	1060	16,33	15,82	15,98	16,04
	SANFR	1061	1062	1063	10,56	11,32	12,97	11,62
	SADP	1064	1065	1066	22,74	20,38	15,78	19,63
6	CIRC	1067	1068	1069	3,92	6,94	7,47	6,11
	EPN	1070	1071	1072	4,68	5,44	10,47	6,86
	QUIT	1073	1074	1075	17,65	17,82	21,18	18,88
	SANFR	1076	1077	1078	8,68	9,18	11,29	9,72
7	CIRC	1079	1080	1081	11,08	12,89	11,66	11,88
	EPN	1082	1083	1084	14,38	13,91	14,09	14,13
	QUIT	1085	1086	1087	17,13	17,62	19,00	17,92
	SANFR	1088	1089	1090	8,45	9,18	8,82	8,82

	SADP	1091	1092	1093	40,24	42,82	36,77	39,94
<b>8</b>	CIRC	1094	1095	1096	11,91	12,92	14,46	13,10
	EPN	1097	1098	1099	15,04	17,46	17,15	16,55
	SANFR	1100	1101	1102	10,98	11,73	13,96	12,22
<b>9</b>	CIRC	1103	1104	1105	9,70	11,03	11,59	10,77
	EPN	1106	1107	1108	19,44	19,41	18,71	19,19
	SANFR	1109	1110	1111	13,86	16,16	18,08	16,03
<b>10</b>	CIRC	1112	1113	1114	11,07	11,25	11,88	11,40
	EPN	1115	1116	1117	10,02	14,51	13,83	12,79
	SANFR	1118	1119	1120	17,42	17,27	17,72	17,47
							<b>PROM.=</b>	15,88

Tabla 3-5: Duración significativa de la base de datos. (Elaboración propia)

### 3.2.2 Espectros de respuesta

En base a la respuesta en el tiempo mediante la técnica Beta de Newmark, se calcularon los espectros de respuesta durante la duración significativa de la base de datos para periodos desde  $T = 0.00$  [seg] hasta  $T = 4.00$  [seg]. Además, se calculó el espectro máximo y mínimo en función del pico máximo para periodos entre los intervalos  $T = 0.00 - 0.50$  [seg] y  $T = 0.51 - 2.51$  [seg] (ver Anexo 4-1).

### 3.2.3 Espectros de diseño elástico

En la presente investigación debido a las características de los registros y del terreno, se optó por usar periodos de retorno de 25, 35, 50, 75 años y suelo tipo “C”. La tasa anual excedencia es inversa al periodo de retorno y en base a la Fig 3-2 se tiene que:

$$Tasa\ anual\ de\ excedencia_1 = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{25} = 0.0400 / Z_1 = 0.14g$$

$$\eta_1 = \frac{0.29}{0.14} = 2.07$$

$$Tasa\ anual\ de\ excedencia_2 = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{35} = 0.0286 / Z_2 = 0.16g$$

$$\eta_2 = \frac{0.351}{0.16} = 2.19$$

$$Tasa\ anual\ de\ excedencia_3 = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{50} = 0.0200 / Z_3 = 0.18g$$

$$\eta_3 = \frac{0.43}{0.18} = 2.39$$

$$Tasa\ anual\ de\ excedencia_4 = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{75} = 0.0133 / Z_4 = 0.24g$$

$$\eta_4 = \frac{0.555}{0.24} = 2.31$$

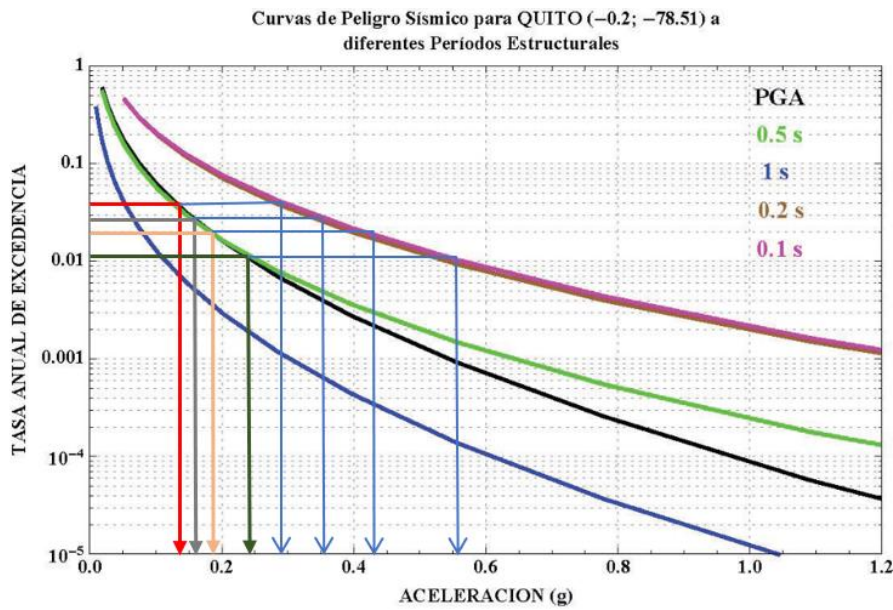


Fig 3-2: Curvas de peligro sísmico,  $Z$  y  $\eta$  para varios periodos de retorno. (Elaboración propia)

Los valores de los factores  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$  se obtienen mediante la interpolación lineal en función de las [Tabla 2-3](#), [Tabla 2-4](#) y [Tabla 2-5](#), respectivamente, y se indican en la [Tabla 3-6](#):

	$F_a$	$F_d$	$F_s$
25 años	1,40	1,36	0,85
35 años	1,39	1,35	0,86
50 años	1,37	1,34	0,88
75 años	1,31	1,29	0,93

Tabla 3-6:  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$  para diferentes periodos de retorno. (Elaboración propia)

Además,  $r = 1$ , por lo mencionado anteriormente. En el Anexo 5-1 se grafican los espectros de diseño elástico en base a las características mencionadas.

3.2.4 Espectros de Fourier

Se calcularon los espectros de Fourier suavizados de la base de datos, mediante la [Ecuación 2-32](#) propuesta por Konno & Ohmachi con un ancho de banda  $b = 250$ . Cada espectro de Fourier fue dividido en 8 ventanas de igual tamaño y se obtuvo la frecuencia correspondiente a la máxima amplitud en cada ventana. Se normalizaron estas amplitudes y se calculó el porcentaje de cada una de ellas, obteniendo así los gráficos que se observan en las Fig 3-3 y Fig 3-4.

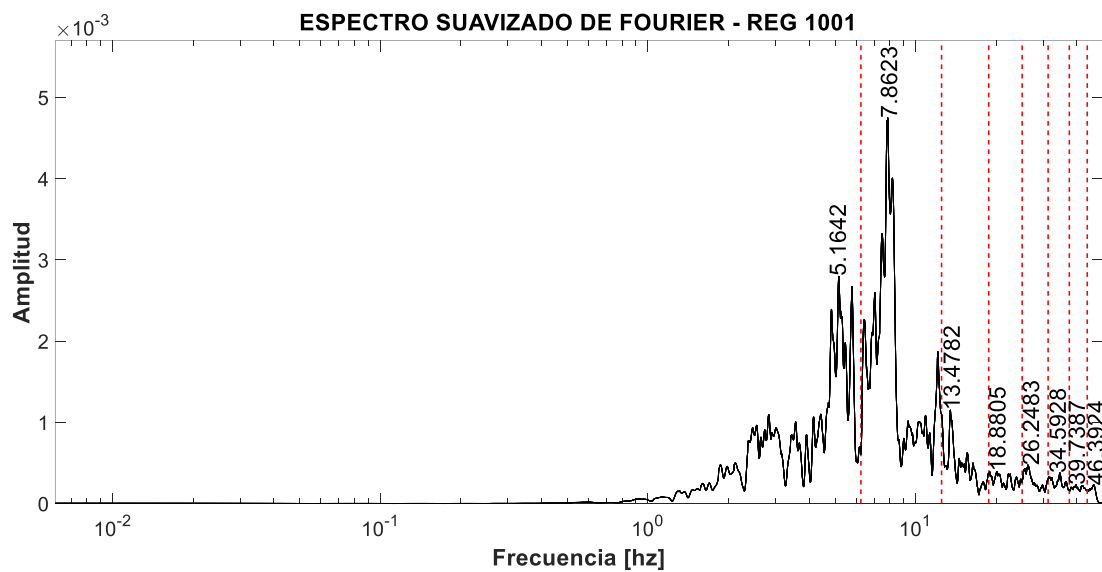


Fig 3-3: Espectro suavizado de Fourier del Registro 1001. (Elaboración propia)

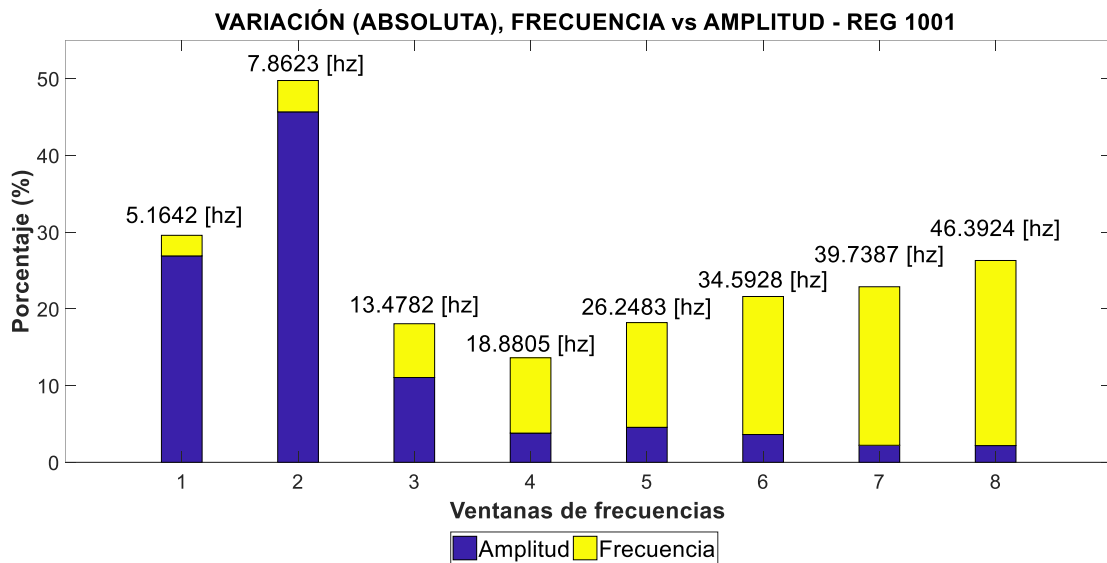


Fig 3-4: Variación de la frecuencia vs amplitud del espectro de Fourier de la Fig 3-3. (Elaboración propia)

En los [Anexo 6-1](#) a Anexo 6-24 se observan todos los espectros de Fourier frente a la variación absoluta de la frecuencia vs amplitud de la base de datos.

### 3.2.5 Periodos predominantes

Una vez calculadas las frecuencias correspondientes a las amplitudes máximas en cada ventana de la base de datos, se calcularon los periodos predominantes hasta que las amplitudes normalizadas alcanzan como mínimo el 60% y máximo el 80% de su valor acumulado en cada ventana. En el [Anexo 7-1](#) se observan los periodos predominantes máximo, medio (+/- desviación estándar) y mínimo de la base de datos.

Como se observa en la [Tabla 3-4](#), el PGA de las componentes Z de la base de datos es insignificante en comparación de las componentes N y E, por lo que, las componentes verticales se desecharon para optimizar el proceso de cálculo de la rutina generada. En el [Anexo 7-2](#) se observan los periodos predominantes máximo, medio (+/- desviación estándar) y mínimo de las componentes N y E de la base de datos.

### 3.2.6 Variación espectral

Se fijó que los registros que se emplearán para generar acelerogramas sintéticos cumplan con una variación de 1 a 7 [en la meseta del espectro, ya que este rango de periodos es común de las estructuras] entre el espectro de diseño elástico [para el periodo de retorno seleccionado] y el espectro de respuesta del registro. ([ver Anexo 8-1 a Anexo 8-4](#))

En los [Anexo 9-1 a Anexo 9-4](#) se observan los acelerogramas válidos para generar acelerogramas sintéticos para cada periodo de retorno seleccionado y en los [Anexo 10-1 a Anexo 10-4](#) los respectivos espectros de respuesta.

## 3.3 Generación de Acelerogramas Sintéticos

A continuación, se detalla el proceso empleado para la generación de acelerogramas sintéticos en base a los acelerogramas de válidos de la base de datos.

Se generó una rutina en la cual, una vez cargados los registros originales válidos, se debe ingresar los siguientes inputs:

- ✓ Registros para combinar [entre corchetes].
- ✓ Número de partes a usar de cada registro, inicialmente cada registro fue dividido en 10 partes o ventanas iguales. Puede ser 3 o 4, ya que la duración significativa está comprendida entre este número de partes.
- ✓ Desde que ventana se desea unir el primer registro.
- ✓ Desde que ventana se desea unir el segundo registro.

A manera de ejemplo, se detalla el procedimiento de generación de acelerogramas sintéticos a partir de los registros originales válidos 1001 y 1052:

- ✓ Primer input: Registros a combinar, [1001 y 1052] ([ver Anexo 11-1](#)).
- ✓ Segundo input: Número de partes a combinar de cada registro, 3.
- ✓ Tercer input: Del registro 1001, la duración significativa comienza en la ventana 3.
- ✓ Cuarto input: Del registro 1052, la duración significativa comienza en la ventana 2.
- ✓ Se generan los 11 acelerogramas sintéticos del Anexo 11-2.
- ✓ Ídem, esta vez usando 4 partes de cada registro, se generan los 18 acelerogramas sintéticos del Anexo 11-3. Es decir, por cada combinación de registros, se generan  $11+18=29$  acelerogramas sintéticos.

En resumen, las partes empleadas de cada registro real [1001 y 1052] para la generación de los acelerogramas sintéticos, se observa en la [Tabla 3-7](#).

COMBINACIÓN 1001-1052																																																																																	
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																																																																																	
<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Comb-1</td><td style="padding: 2px;">Comb-2</td><td style="padding: 2px;">Comb-3</td><td style="padding: 2px;">Comb-4</td><td style="padding: 2px;">Comb-5</td><td style="padding: 2px;">Comb-6</td><td style="padding: 2px;">Comb-7</td><td style="padding: 2px;">Comb-8</td><td style="padding: 2px;">Comb-9</td> </tr> </table>	Comb-1	Comb-2	Comb-3	Comb-4	Comb-5	Comb-6	Comb-7	Comb-8	Comb-9	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Comb-10</td><td style="padding: 2px;">Comb-11</td> </tr> </table>	Comb-10	Comb-11																																																																					
Comb-1	Comb-2	Comb-3	Comb-4	Comb-5	Comb-6	Comb-7	Comb-8	Comb-9																																																																									
Comb-10	Comb-11																																																																																
<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1052</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td></td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td> </tr> </table>	Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1052	3	2	2	3	2	2	3	2	2		4	4	3	4	4	3	4	4	3	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001 / 1052</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1052 / 1001</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001 / 1052</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td> </tr> </table>	Partes de Sg 1001 / 1052	3	2	Partes de Sg 1052 / 1001	3	4	Partes de Sg 1001 / 1052	5	4																																									
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5																																																																								
Partes de Sg 1052	3	2	2	3	2	2	3	2	2																																																																								
	4	4	3	4	4	3	4	4	3																																																																								
Partes de Sg 1001 / 1052	3	2																																																																															
Partes de Sg 1052 / 1001	3	4																																																																															
Partes de Sg 1001 / 1052	5	4																																																																															
<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Comb-12</td><td style="padding: 2px;">Comb-13</td><td style="padding: 2px;">Comb-14</td><td style="padding: 2px;">Comb-15</td><td style="padding: 2px;">Comb-16</td><td style="padding: 2px;">Comb-17</td><td style="padding: 2px;">Comb-18</td><td style="padding: 2px;">Comb-19</td><td style="padding: 2px;">Comb-20</td><td style="padding: 2px;">Comb-21</td><td style="padding: 2px;">Comb-22</td><td style="padding: 2px;">Comb-23</td><td style="padding: 2px;">Comb-24</td><td style="padding: 2px;">Comb-25</td><td style="padding: 2px;">Comb-26</td><td style="padding: 2px;">Comb-27</td> </tr> </table>	Comb-12	Comb-13	Comb-14	Comb-15	Comb-16	Comb-17	Comb-18	Comb-19	Comb-20	Comb-21	Comb-22	Comb-23	Comb-24	Comb-25	Comb-26	Comb-27	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Comb-28</td><td style="padding: 2px;">Comb-29</td> </tr> </table>	Comb-28	Comb-29																																																														
Comb-12	Comb-13	Comb-14	Comb-15	Comb-16	Comb-17	Comb-18	Comb-19	Comb-20	Comb-21	Comb-22	Comb-23	Comb-24	Comb-25	Comb-26	Comb-27																																																																		
Comb-28	Comb-29																																																																																
<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">6</td><td style="padding: 2px;">6</td><td style="padding: 2px;">6</td><td style="padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1052</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td></td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">3</td> </tr> <tr> <td></td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">4</td> </tr> </table>	Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	Partes de Sg 1052	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2		4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3		5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	4	4	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001 / 1052</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1052 / 1001</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1001 / 1052</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">4</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Partes de Sg 1052 / 1001</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">6</td> </tr> </table>	Partes de Sg 1001 / 1052	3	2	Partes de Sg 1052 / 1001	3	4	Partes de Sg 1001 / 1052	5	4	Partes de Sg 1052 / 1001	5	6
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6																																																																	
Partes de Sg 1052	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2																																																																	
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3																																																																	
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	4	4																																																																	
Partes de Sg 1001 / 1052	3	2																																																																															
Partes de Sg 1052 / 1001	3	4																																																																															
Partes de Sg 1001 / 1052	5	4																																																																															
Partes de Sg 1052 / 1001	5	6																																																																															

Tabla 3-7: Acelerogramas sintéticos, representado por combinaciones de cada registro real. (Elaboración propia)

Del total de 10 registros reales válidos para periodo de retorno de 25 años, se pueden generar un total de combinaciones (sin repetir) dada por la Ecuación 3-1:

$$C_{m,n} = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}$$

Ecuación 3-1: Combinaciones sin repetir.

Donde:

- $m$  = número de registros.
- $n$  = número de registros dentro de cada combinación.

Por lo tanto:

$$C_{10,2} = \frac{10!}{2!(10-2)!} = 45$$

Las bases de datos de acelerogramas sintéticos generadas a partir de registros originales válidos, tienen:

- ✓ Para periodo de retorno de 25 años, es de  $29 \times 45 = 1305$  acelerogramas sintéticos.
- ✓ Para periodo de retorno de 35 años, es de  $29 \times 10 = 290$  acelerogramas sintéticos.
- ✓ Para periodo de retorno de 50 años, es de  $29 \times 6 = 174$  acelerogramas sintéticos.
- ✓ Para periodo de retorno de 75 años, es de  $29 \times 1 = 29$  acelerogramas sintéticos.

En los Anexo 11-4 a Anexo 11-18 se observan las combinaciones usadas de cada registro real para la generación de acelerogramas sintéticos y en los Anexo 11-19 a Anexo 11-63 la representación gráfica de estos.

### 3.3.1 Espectro de respuesta de la base de Acelerogramas Sintéticos

En base a la técnica Beta de Newmark, se calcularon los espectros de respuesta de cada acelerograma sintético para cada periodo de retorno ([ver Anexo 12-1 a Anexo 12-4](#)).

### 3.3.2 Variación espectral de los Acelerogramas Sintéticos

En los Anexo 13-1 a Anexo 13-4, se observa la variación espectral de los espectros de respuesta de los Acelerogramas Sintéticos frente al Espectro de diseño elástico NEC en la meseta, para cada periodo de retorno.

### 3.3.3 Acelerogramas Sintéticos Válidos

Se filtraron los acelerogramas sintéticos cuyos espectros de respuesta estén en relación de 1.0 a 4.0 frente al espectro de diseño elástico NEC en la meseta, para cada periodo de retorno. Los acelerogramas que cumplan con esta relación, se observan en los Anexo 14-1 a Anexo 14-14 y sus espectros de respuesta en los Anexo 15-1 a Anexo 15-4.

### 3.3.4 Análisis de Fourier de los Acelerogramas Sintéticos Válidos

Se calcularon los espectros de Fourier para los acelerogramas sintéticos válidos, se dividió cada espectro en 8 ventanas y se calculó las frecuencias correspondientes a las amplitudes máximas en cada ventana. Posteriormente, se normalizaron estas amplitudes. Finalmente, se calcularon los periodos predominantes (inverso de la frecuencia) hasta que las amplitudes normalizadas acumuladas sean como máximo el 80% del total. El proceso se repite para cada periodo de retorno ([ver Anexo 16-1 a Anexo 16-4](#)).

## 4. CONCLUSIONES

- ✓ Se observa que la metodología para la generación de acelerogramas sintéticos propuesta en la presente investigación, mantiene el carácter no estacionario de un registro real. Esta metodología no afecta a los parámetros: aceleración pico del terreno [PGA], amplitudes del espectro de Fourier, frecuencias máximas y periodos predominantes de los registros reales.

### 4.1 Registros reales

- ✓ El PGA promedio de la base de datos es de 0,02 [g] (ver Tabla 3-4).
- ✓ La duración significativa promedio de los registros de la base de datos generada a partir de los registros reales, tiene un valor de 15.88 [seg] (ver Tabla 3-5).
- ✓ Los periodos predominantes de la base de datos se encuentran entre 0,05 – 0,45 [seg], con una media aritmética de 0,13 [seg] cuya desviación estándar es de +/- 0,03 [seg] (ver Anexo 7-1).
- ✓ En función de los periodos predominantes, las frecuencias correspondientes a las amplitudes máximas obtenidas mediante Análisis de Fourier de la base de datos se encuentran entre 2,22 – 20,00 [hz], con una media aritmética de 7,69 [hz].

### 4.2 Registros reales válidos

- ✓ El PGA promedio de la base de datos de acelerogramas sintéticos es de 0,09 [g] (ver Tabla 4-1).
- ✓ La duración significativa promedio de los registros de la base de datos generada a partir de los registros reales, tiene un valor de 7,43 [seg] (ver Tabla 4-1).

	No.	PGA [g]	Dur. Sign [s]
<b>REGISTROS</b>	1001	0,06	6,95
	1052	0,14	8,13

<b>REALES VÁLIDOS</b>	1053	0,06	11,76
	1055	0,06	7,91
	1056	0,06	9,34
	1067	0,19	3,92
	1068	0,08	6,94
	1070	0,10	4,68
	1071	0,08	5,44
	1077	0,06	9,18
	<b>PROM=</b>	0,09	7,43

Tabla 4-1: PGA y Dur. Significativa de registros reales válidos. (Elaboración propia)

- ✓ Los periodos predominantes de los registros reales válidos para la generación de acelerogramas sintéticos se encuentran entre 0,07 – 0,23 [seg], con una media aritmética de 0,16 [seg] cuya desviación estándar es de +/- 0,05 [seg] (ver Tabla 4-2).

<b>PERIODOS PREDOMINANTES [s]</b>			
	<b>Máx.</b>	<b>Med.</b>	<b>Mín.</b>
	0,19	0,13	0,05
	0,20	0,15	0,05
	0,21	0,13	0,05
	0,28	0,15	0,05
	0,29	0,29	0,29
	0,24	0,15	0,05
	0,23	0,13	0,05
	0,17	0,15	0,05
	0,28	0,15	0,05
	0,24	0,14	0,05
	<b>PROM=</b>	0,16	0,07
	<b>DESV. ESTÁNDAR=</b>	0,05	

Tabla 4-2: Periodos predominantes de los registros válidos para generación de acelerogramas sintéticos. (Elaboración propia)

- ✓ Las frecuencias correspondientes a las amplitudes máximas obtenidas mediante Análisis de Fourier de los registros válidos para la generación de acelerogramas sintéticos, se encuentran entre 4,35 – 14,29 [hz], con una media aritmética de 6,25 [hz].

### 4.3 Acelerogramas sintéticos válidos

- ✓ El PGA promedio de acelerogramas sintéticos válidos es de 0,14 [g] (ver Anexo 14-1 a Anexo 14-14).
- ✓ Los periodos predominantes de los acelerogramas sintéticos válidos están entre 0,03 – 0,25 [seg], con una media aritmética de 0,15 [seg] cuya desviación estándar es de +/- 0,01 [seg] (ver Anexo 16-1 a Anexo 16-4).
- ✓ Las frecuencias correspondientes a las amplitudes máximas obtenidas mediante Análisis de Fourier de los acelerogramas sintéticos válidos se encuentran entre 4,00 – 33,33 [hz], con una media aritmética de 6,66 [hz].

## 5. BIBLIOGRAFÍA

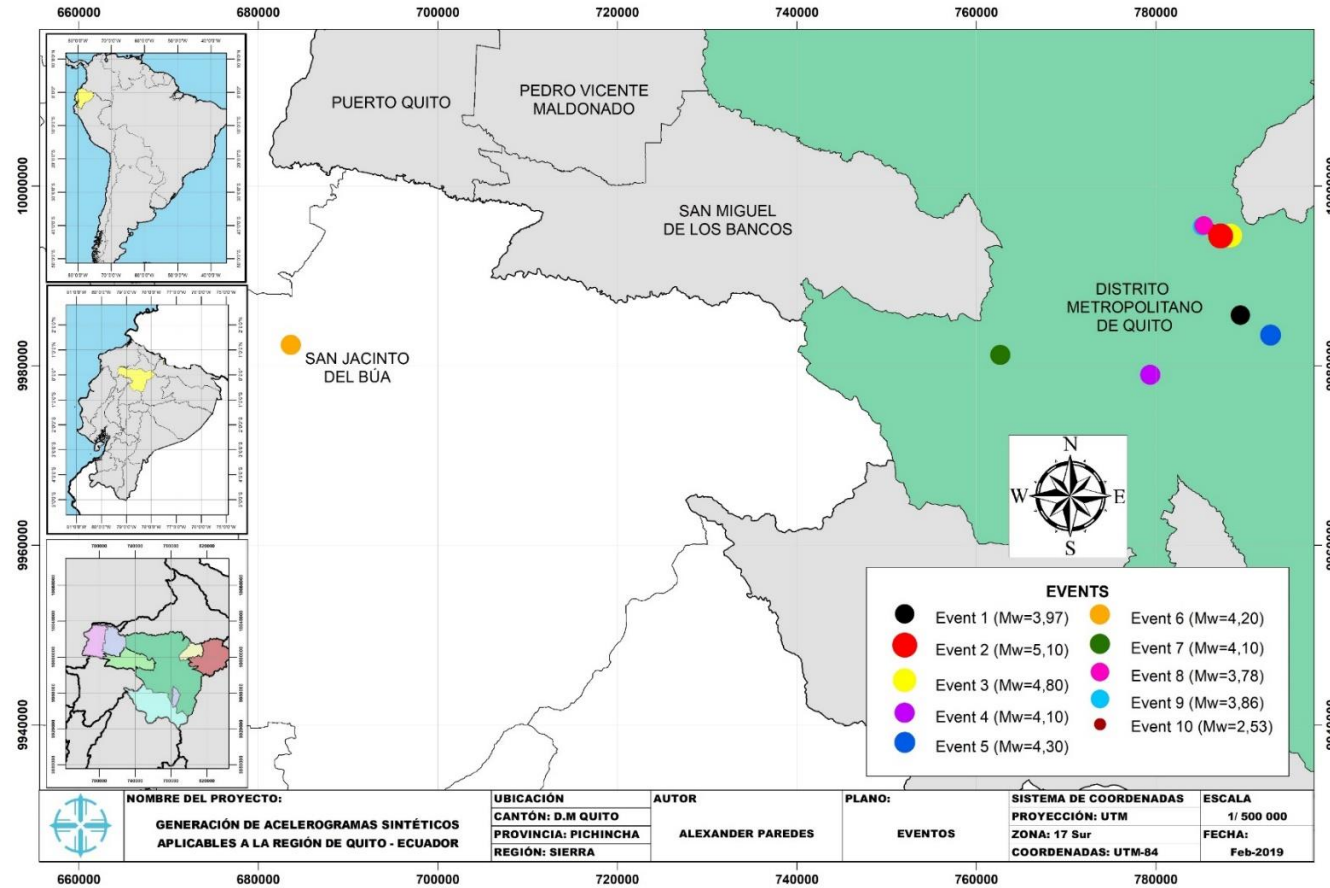
- Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J. - M., Alvarado, A., ... Jomard, H. (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*. <https://doi.org/10.1785/0120170259>
- Carreño, E., Bravo, B., Suárez, a., & Tordesillas, J. M. (1999). Registro y Tratamiento de Acelerogramas. *Física de La Tierra*, 81–111.
- Celi, C., & Arellano, R. (2014). Fiabilidad del Modelamiento Sísmico, en el Rango No Lineal, en Función de la Longitud de las Zonas Plásticas Asumidas Para Vigas. *Revista Politécnica*, 33, 138–147.
- Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2017). *FINAL REPORT: CAPACITY CURVES AND FRAGILITY CURVES OF RESIDENTIAL BUILDINGS FOR THE CITY OF QUITO*. Quito. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28046.46402>
- Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2018). SEISMIC VULNERABILITY OF QUITO ECUADOR, PHASE 1: CAPACITY CURVES OF STRUCTURAL TIPOLOGIES, PROJECT GEM -SARA. *Revista PUCCE*, 0(106), 43–80. Retrieved from <http://www.revistapuce.edu.ec/index.php/revpuce/article/view/130>
- Celi, Carlos, & Moyano, J. (2017). Final Report: Capacity Curves and Fragility Curves of Residential Buildings for the City of Quito., (May), 39. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28046.46402>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamic of Structures* (Berkeley C, Vol. 4). Ber: Prentice Hall.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras. The British Journal of Psychiatry* (4ta edició, Vol. 112). Estado de México. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Flores, F., & Ayes, J. C. (2018). GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS MEDIANTE EL USO DE WAVELETS , ORIENTADOS A APLICACIONES GEOTÉCNICO. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 24(98), 1–24. Retrieved from <http://www.smis.mx/index.php/RIS>
- Geofísico, I. (2019). Instituto Geofísico. Retrieved from <https://www.igepn.edu.ec/>
- Instituto Geofísico. (2016). Informe Sísmico Especial N. 12 - 2016 - Instituto Geofísico

- EPN. Retrieved April 16, 2018, from <http://igepn.edu.ec/servicios/noticias/1316-informe-sismico-especial-n-12-2016>

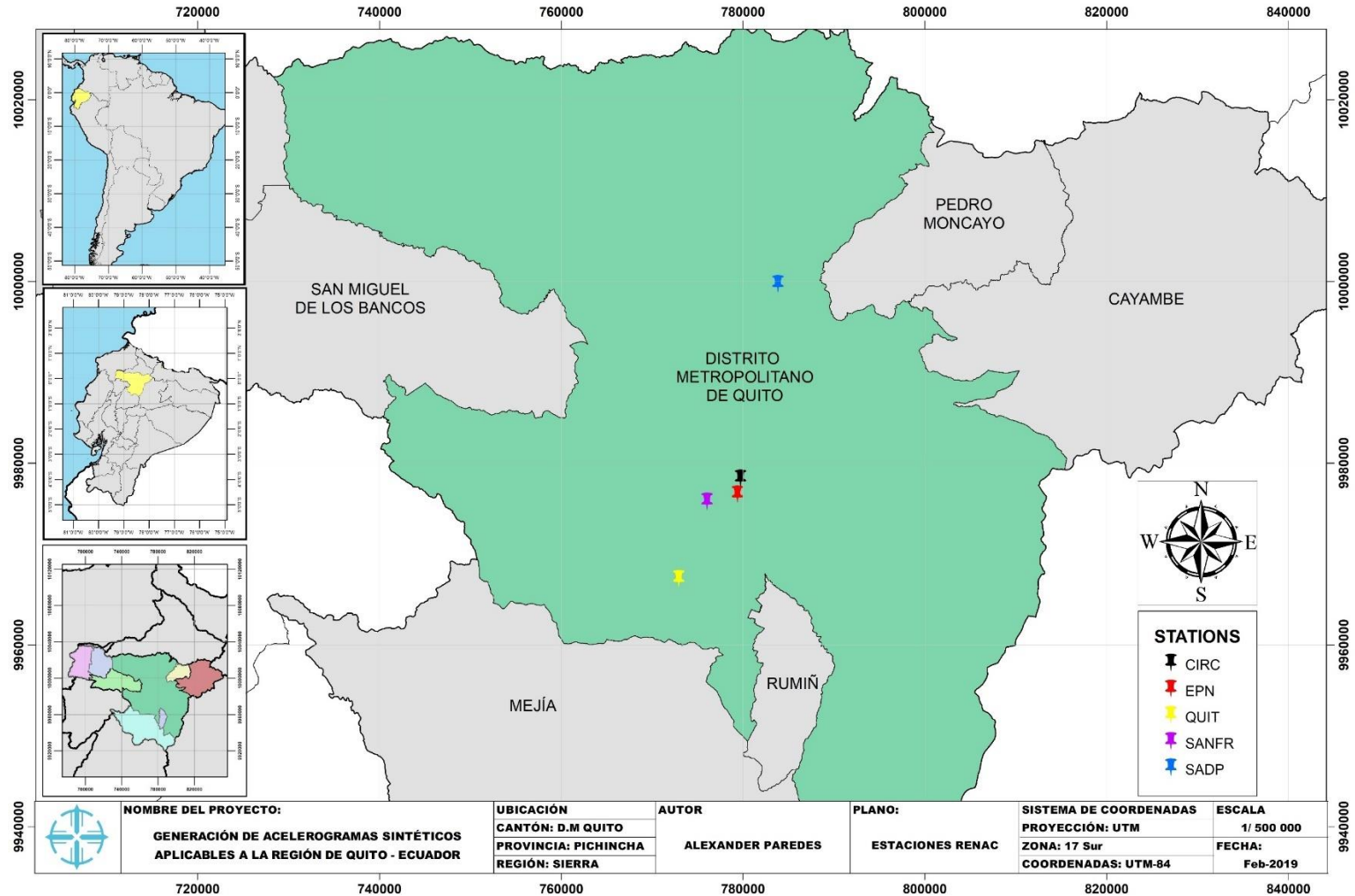
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228–241.
- NEC Committee. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC: NEC-SE-DS - Peligro Sísmico/Diseño Sismo Resistente*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962013000200001>
- Okamoto, S. (1984). *INTRODUCTION TO EARTHQUAKE ENGINEERING* (Second Edi). Japan: UNIVERSITY OF TOKYO PRESS.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias De La Tierra: Una introducción a la geología física. Biology* (8va Edició, Vol. 30). Madrid: Pearson Educación S.A.
- USGS. (2019). USGS. <https://doi.org/privacy@ios.doi.gov>
- Vielma, J. C. (2017). Fragility analysis of the nave macro-element of the Cathedral of Santiago, Chile. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0292-6>
- Vielma, J. C., Alfaro, A., & Barrios, A. (2014). Determinación de curvas de fragilidad mediante análisis incremental dinámico. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estructural*, 11(1), 135–154. <https://doi.org/10.5335/rsee.v11i1.4463>
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering. Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*. New York: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439883112>

## 6. ANEXOS

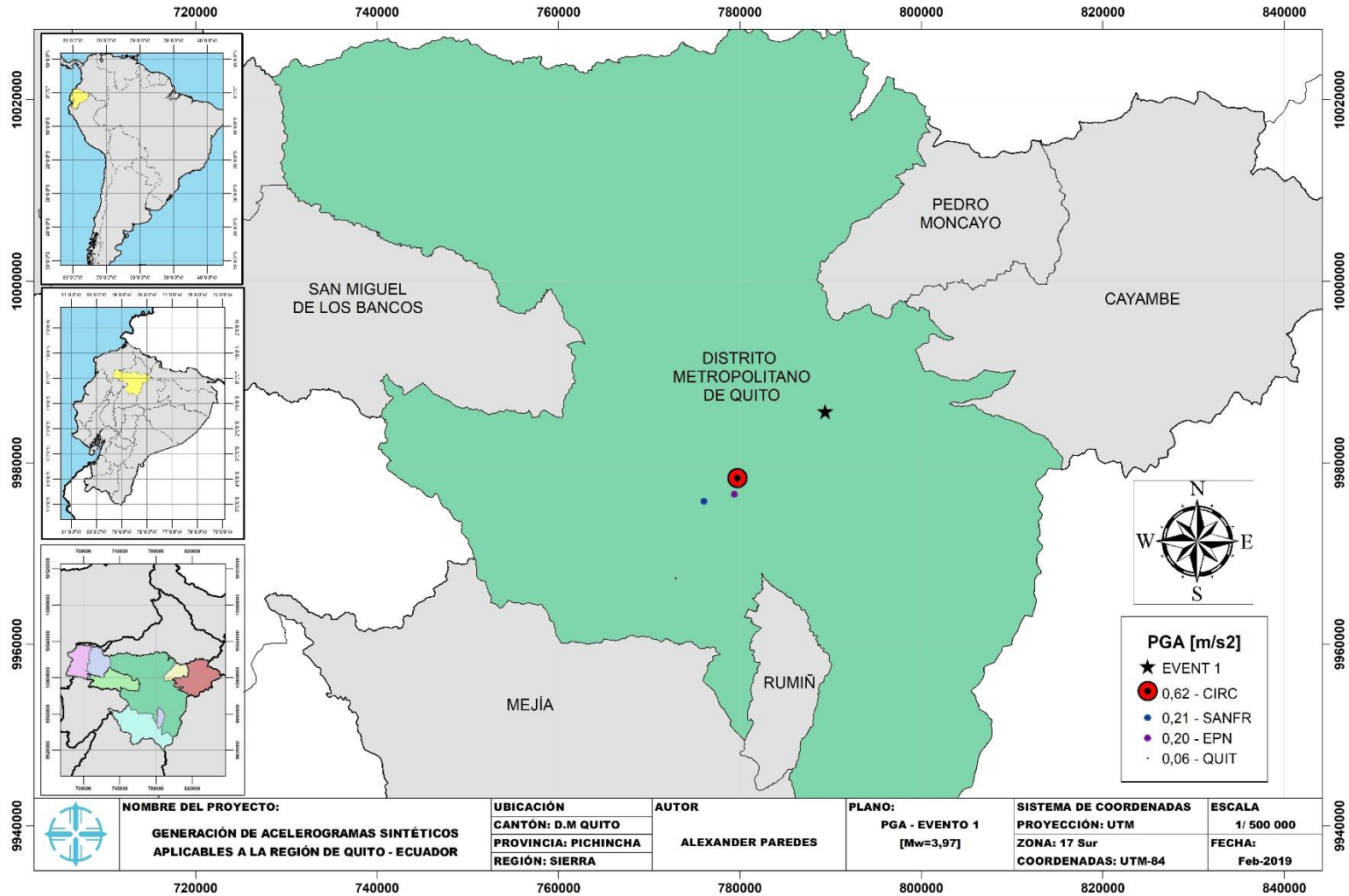
### 6.1 Mapas



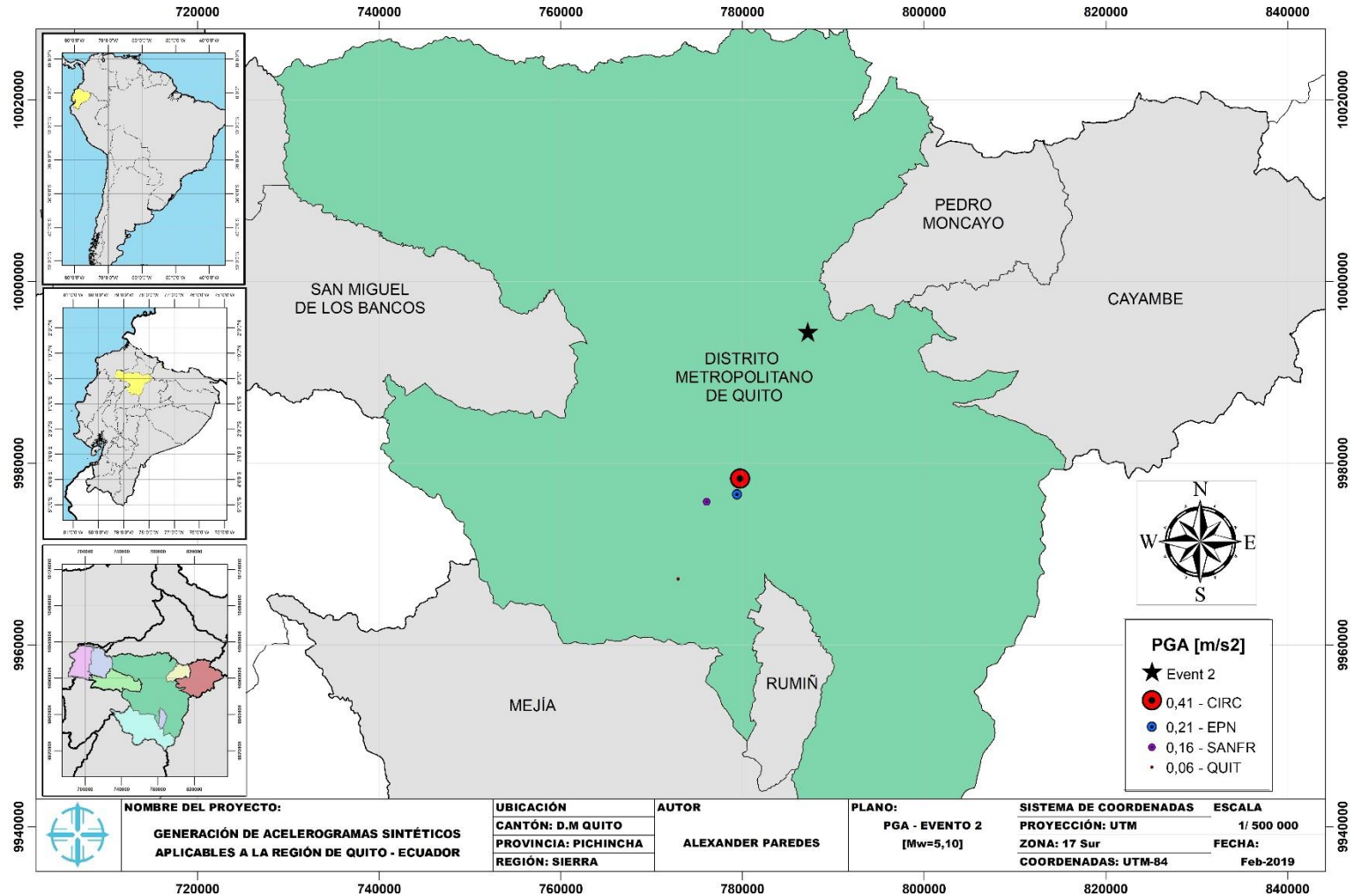
Anexo 1-1: Epicentro de los registros de la RENAC. (Elaboración propia)



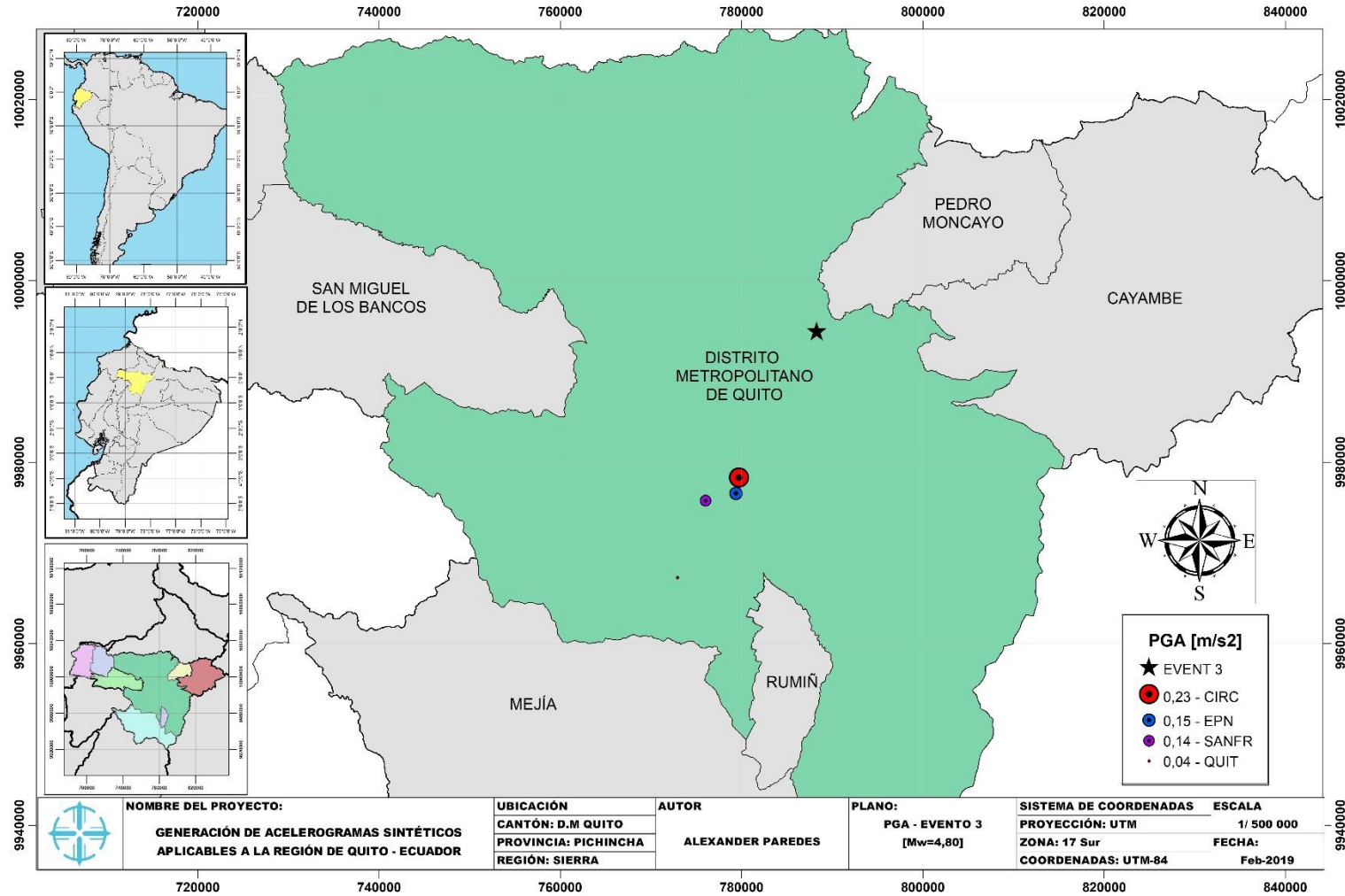
Anexo 1-2: Ubicación de las estaciones de la RENAC. (Elaboración propia)



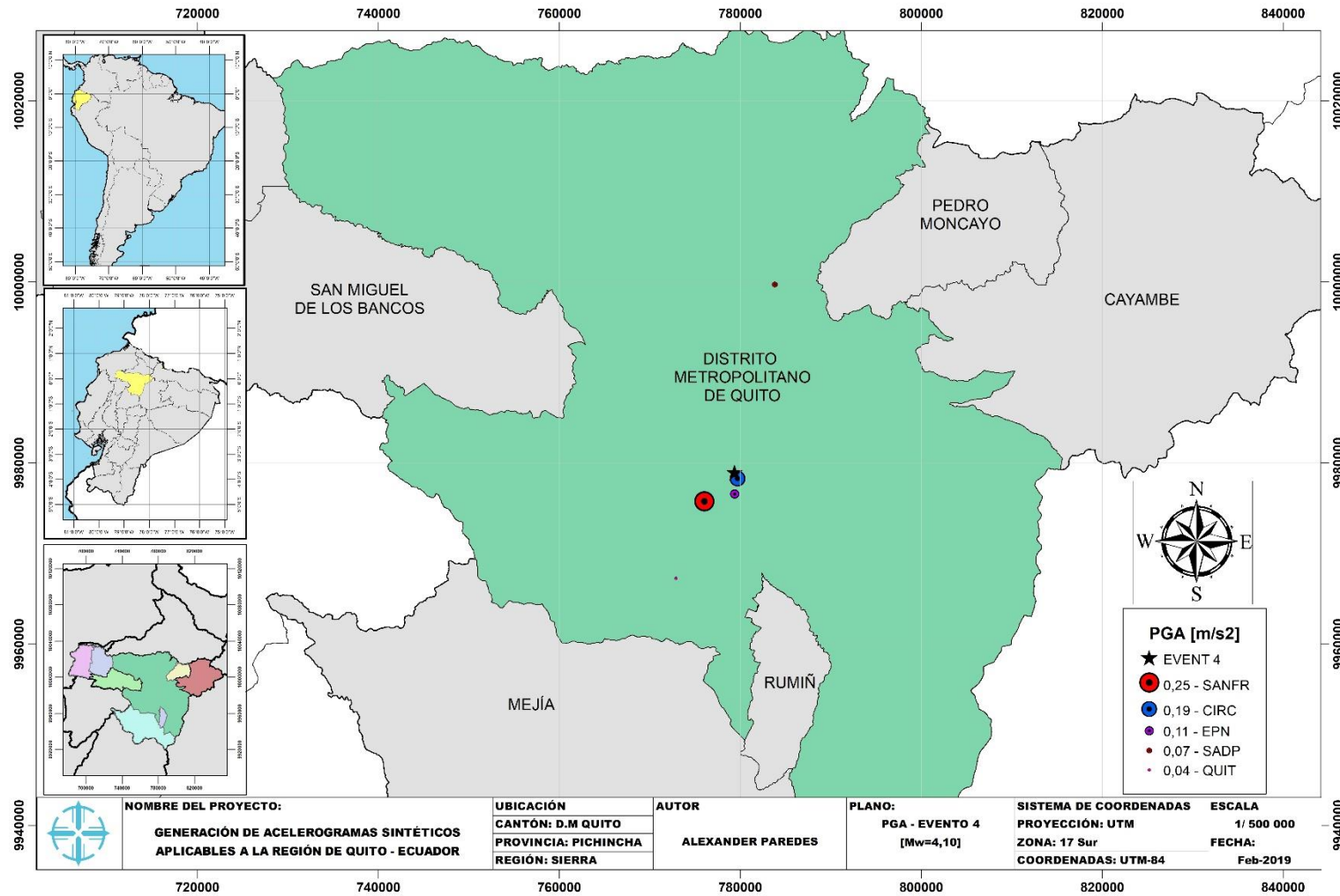
Anexo 1-3: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 1. (Elaboración propia)



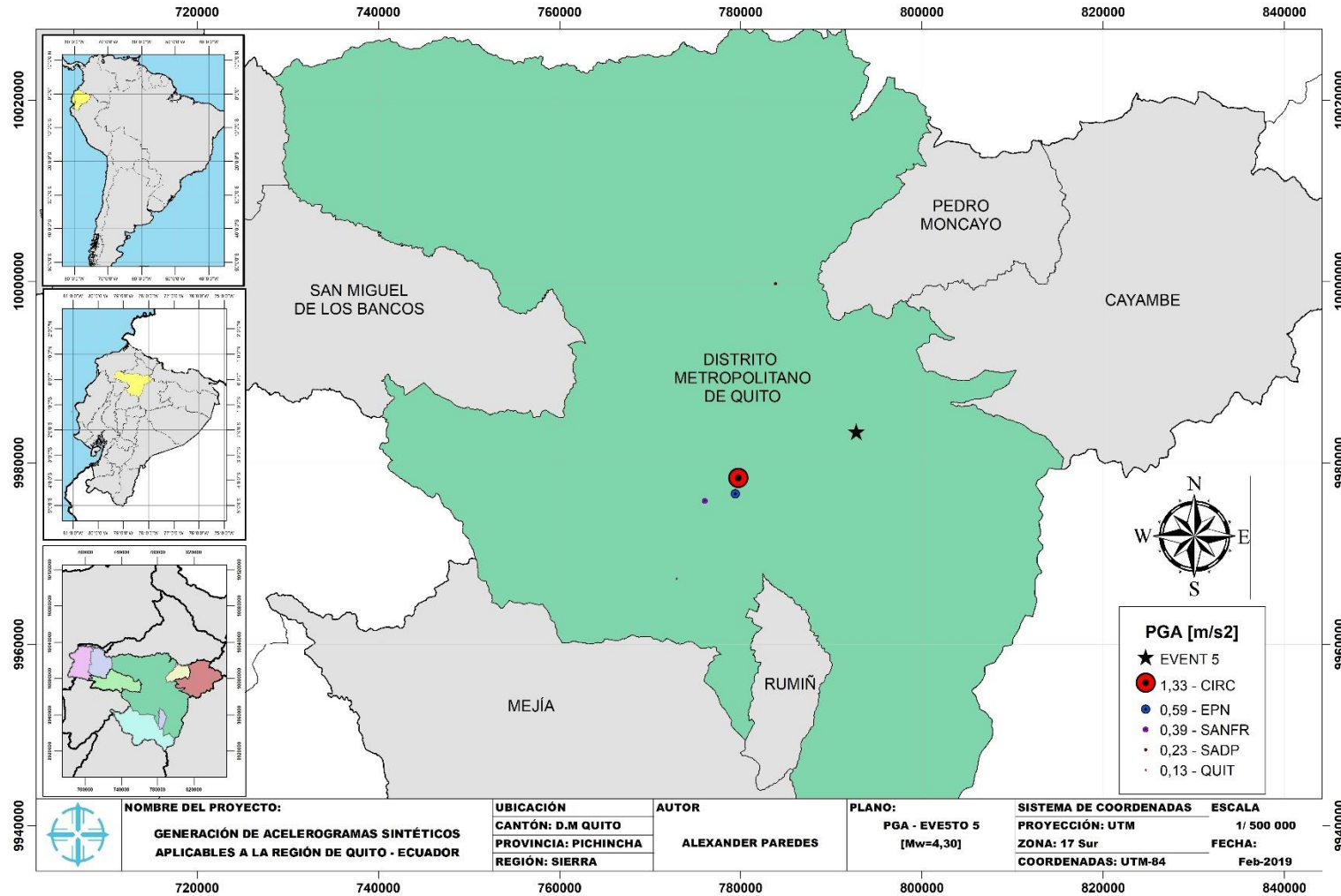
Anexo 1-4: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 2. (Elaboración propia)



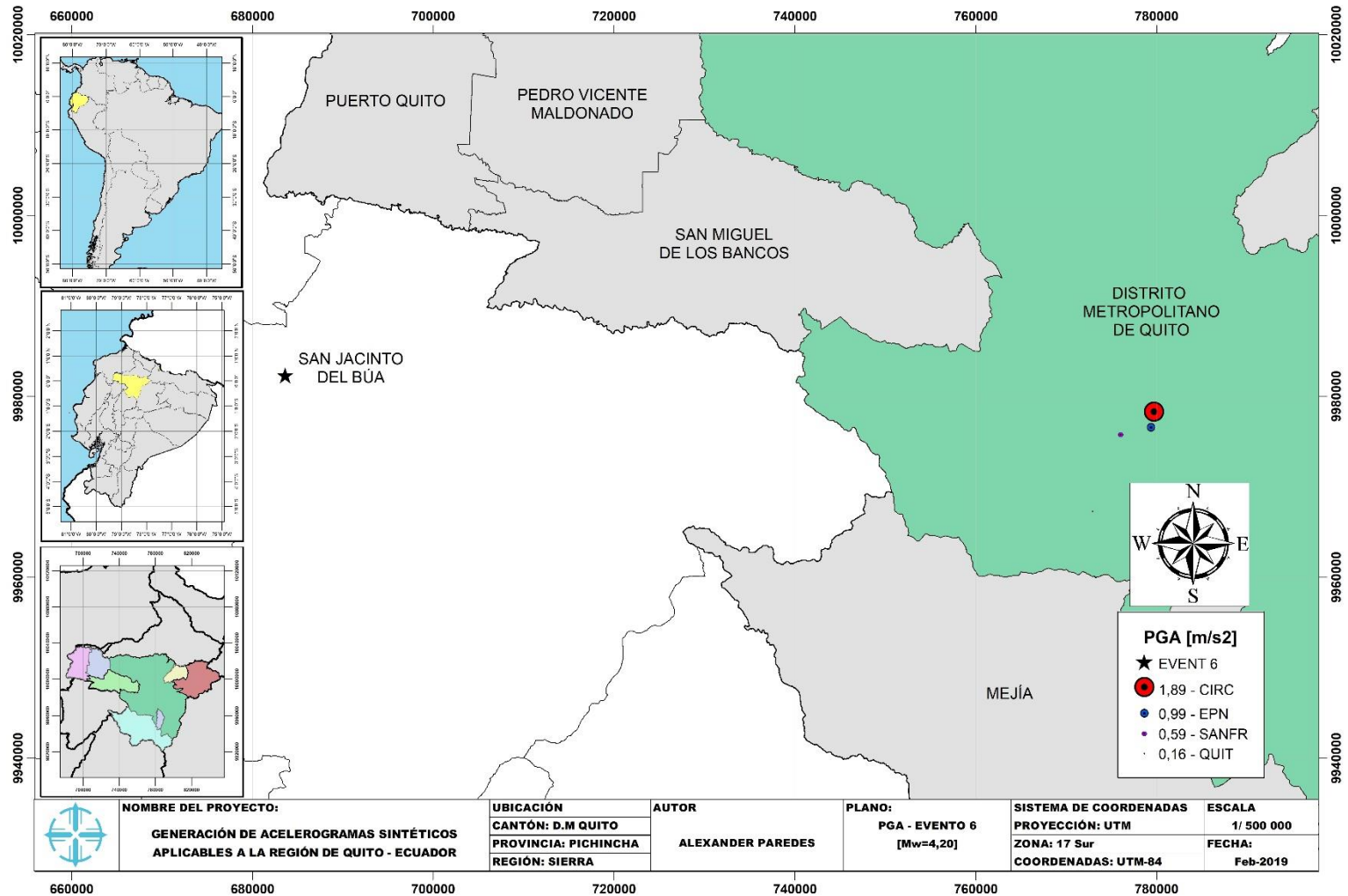
Anexo 1-5: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 3. (Elaboración propia)



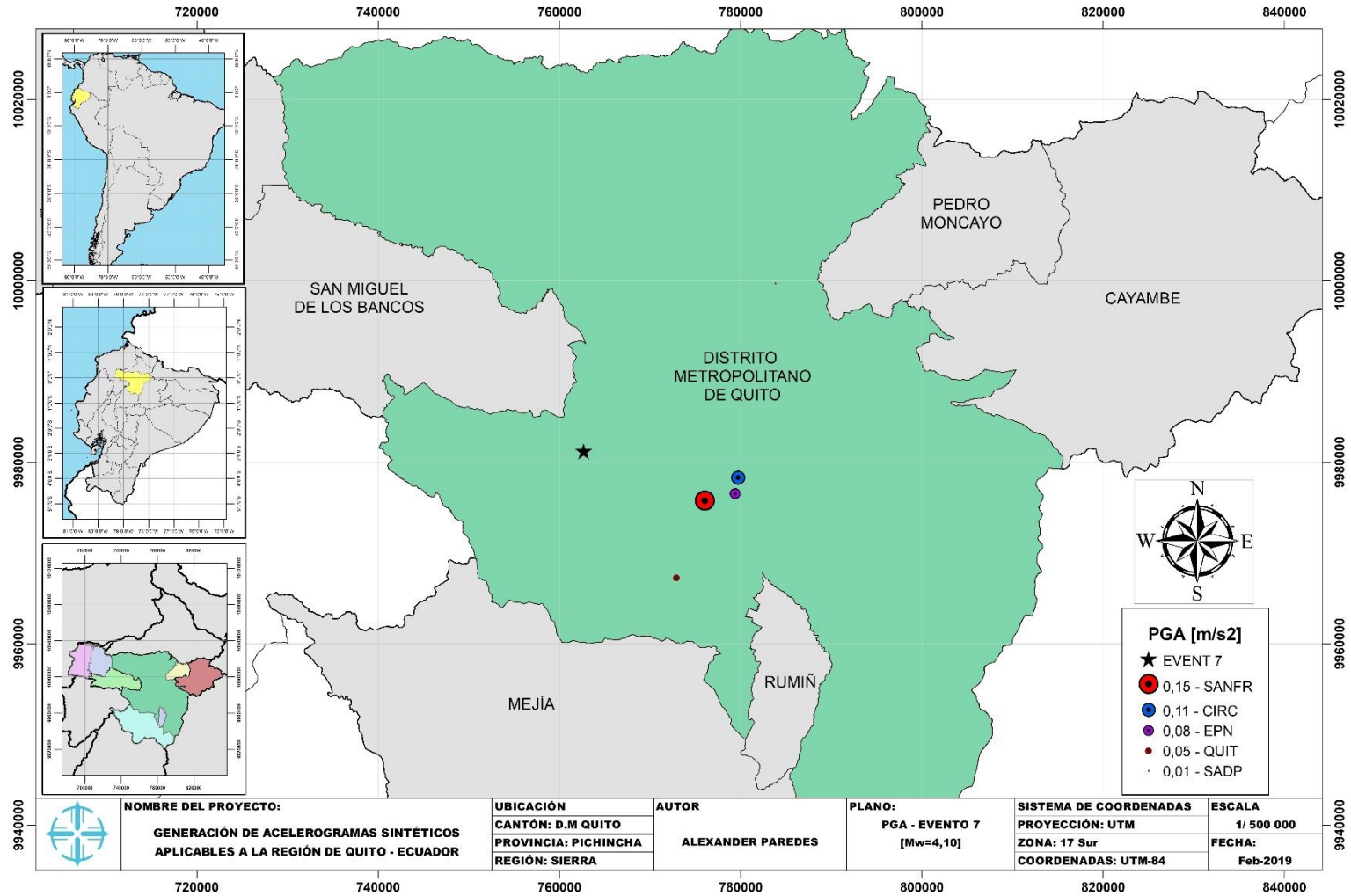
Anexo 1-6: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 4. (Elaboración propia)



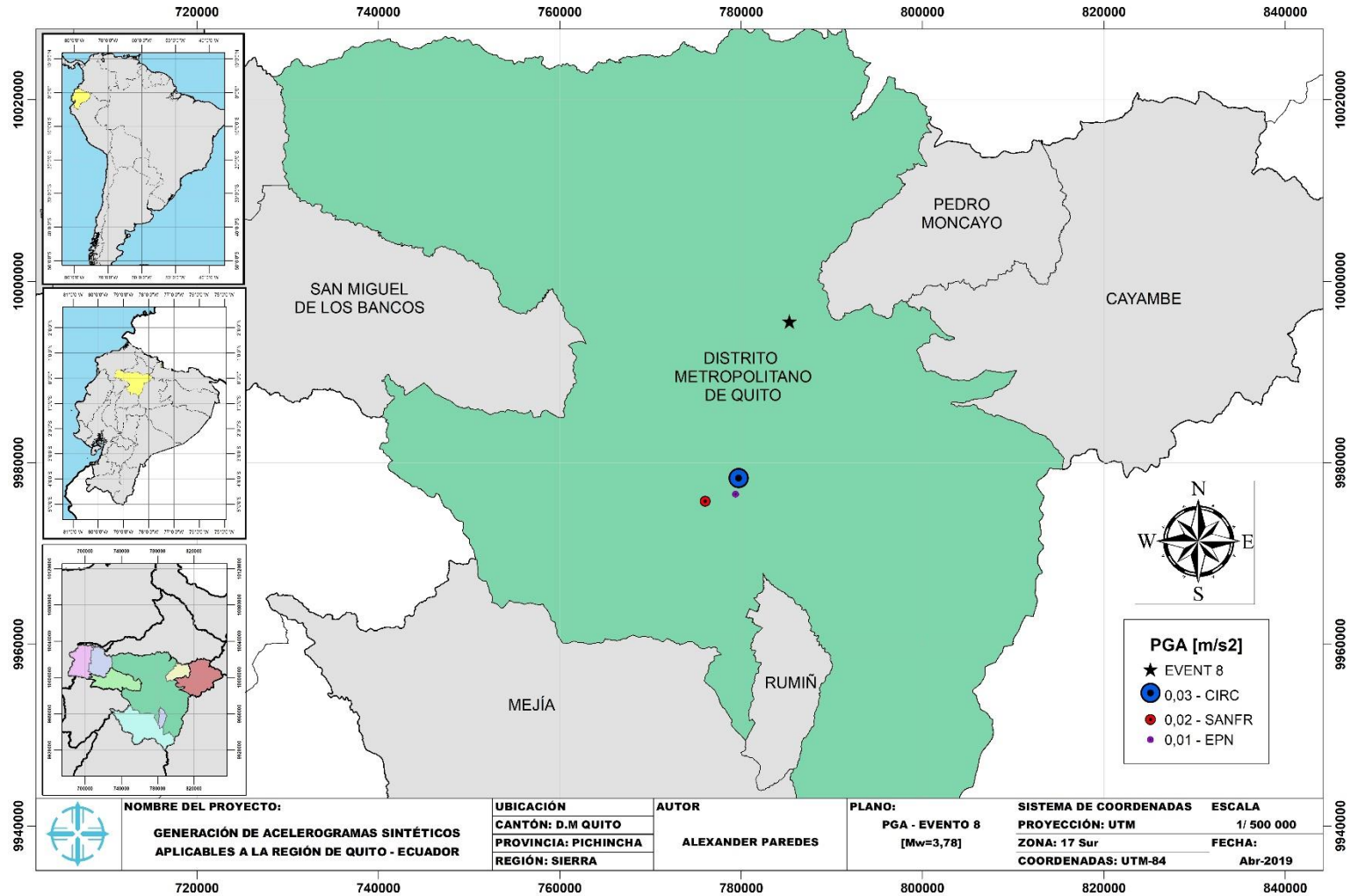
Anexo 1-7: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 5. (Elaboración propia)



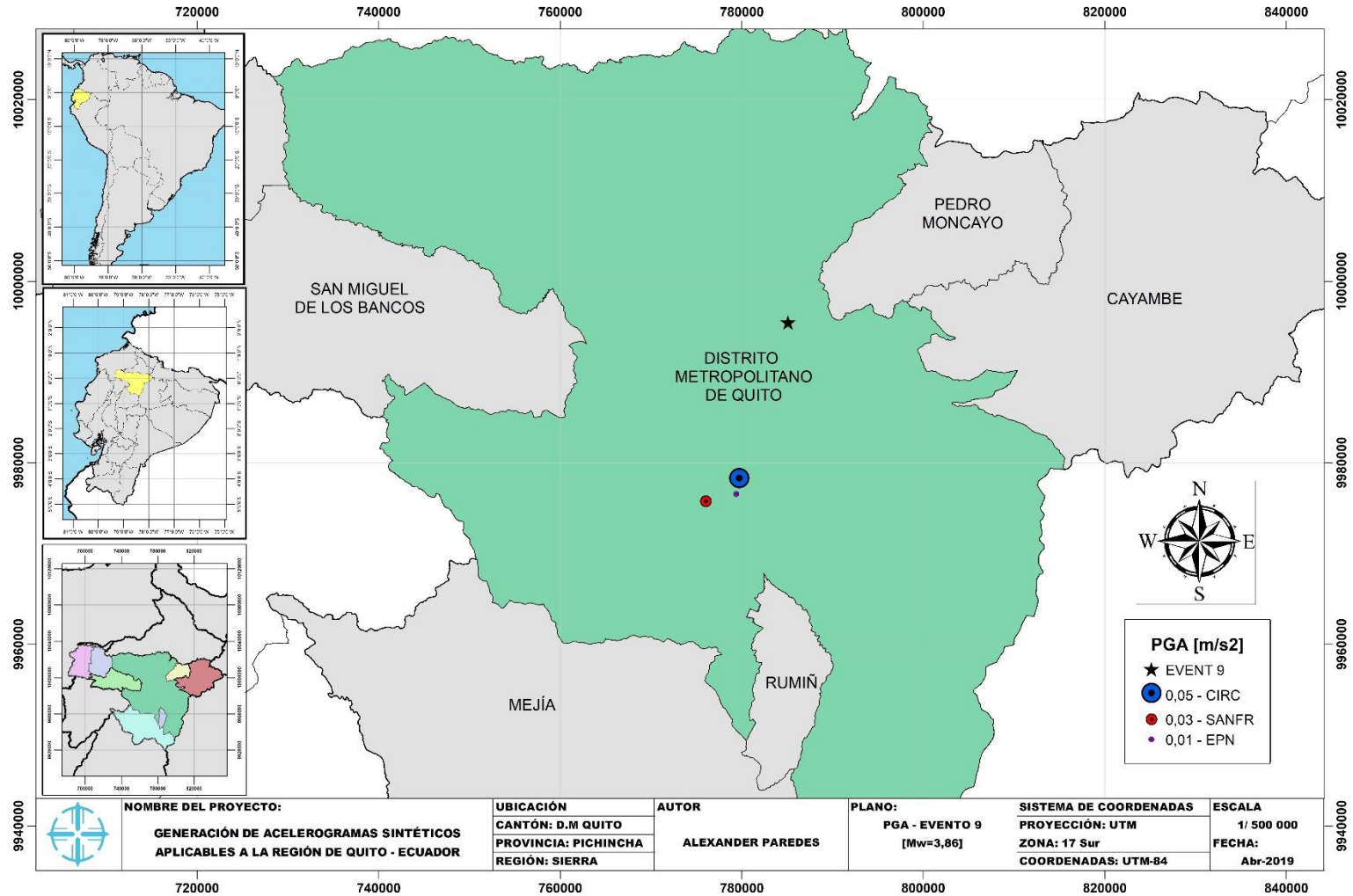
Anexo 1-8: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 6. (Elaboración propia)



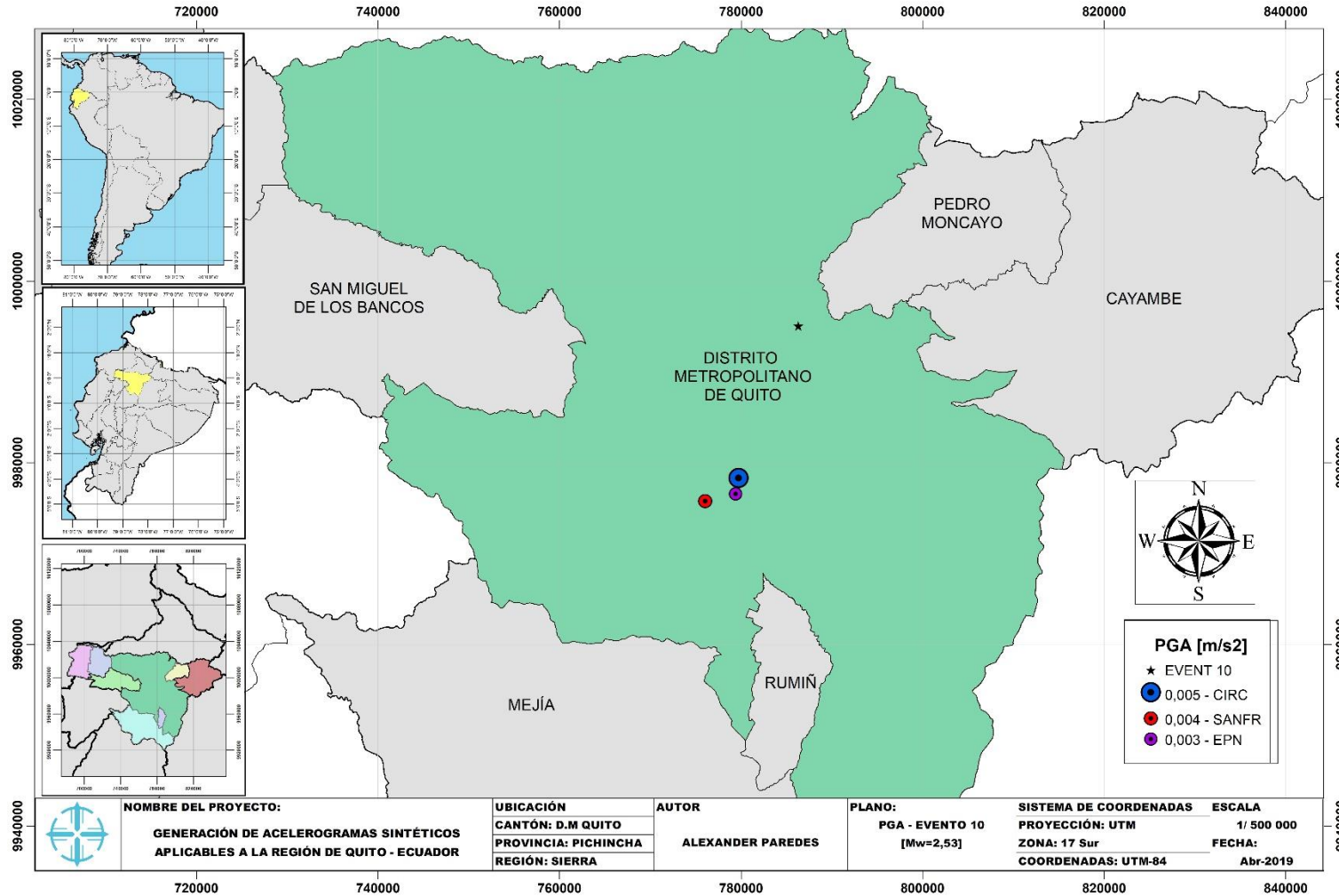
Anexo 1-9: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 7. (Elaboración propia)



Anexo 1-10: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 8. (Elaboración propia)



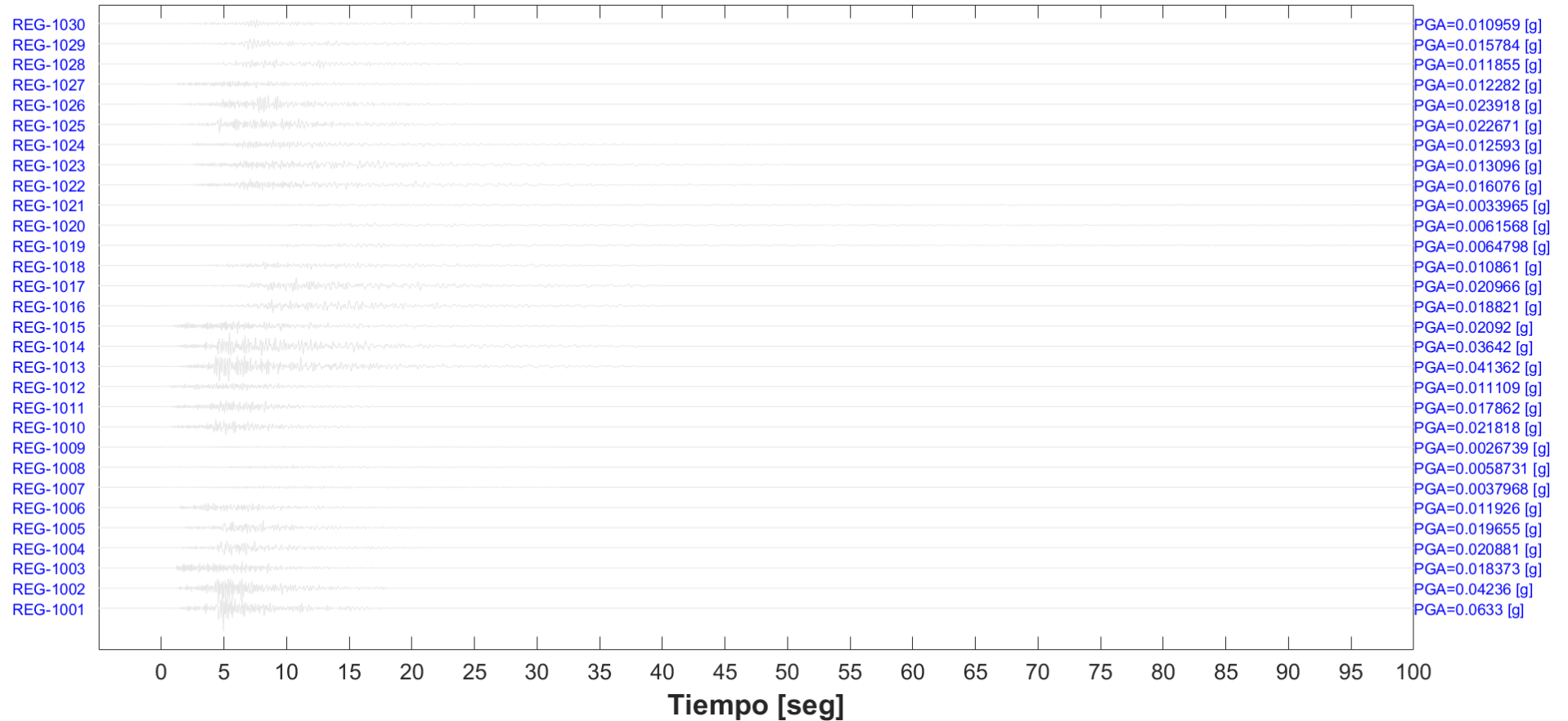
Anexo I-11: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 9. (Elaboración propia)



Anexo 1-12: PGA registrado en cada estación frente a epicentro del evento sísmico 10. (Elaboración propia)

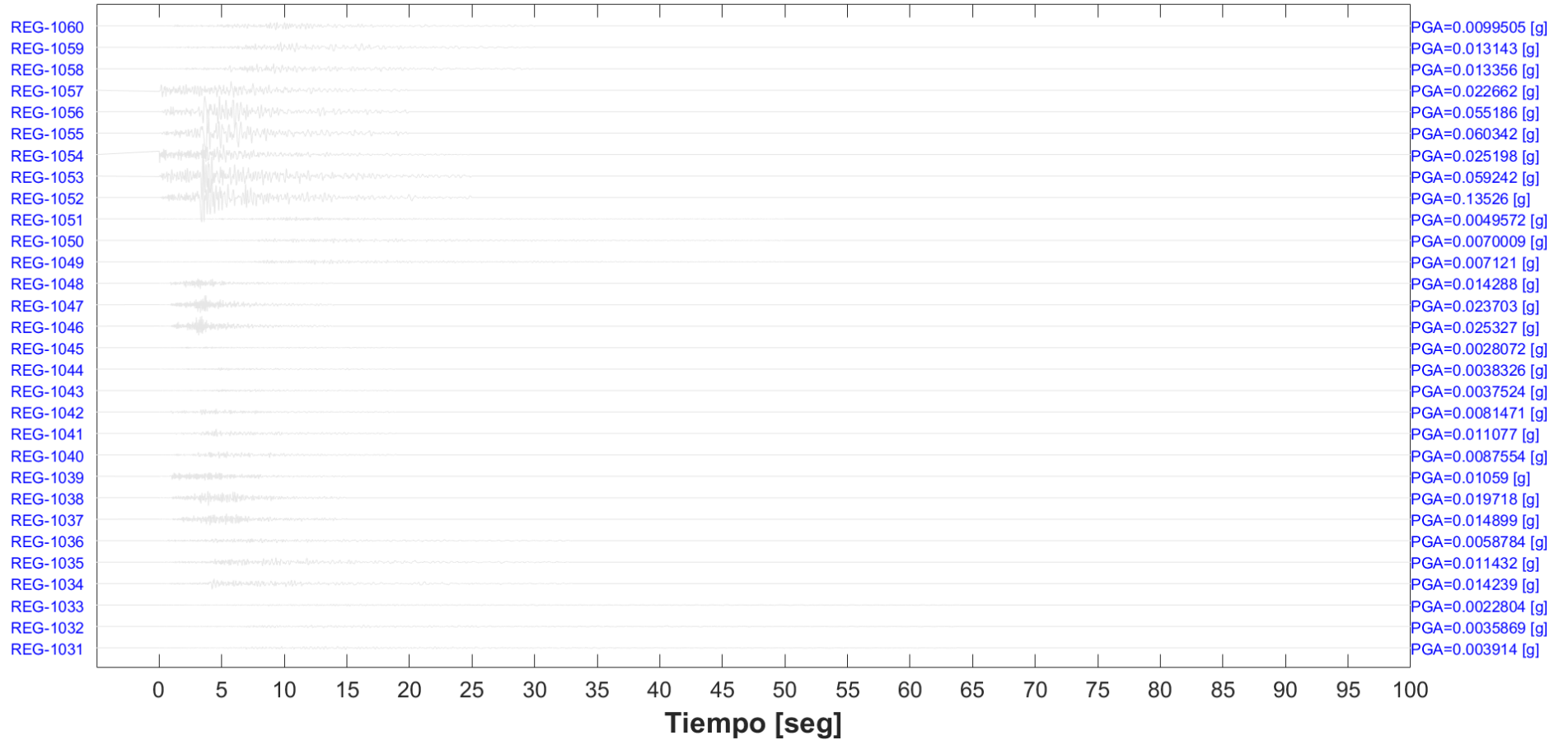
6.2 Acelerogramas reales

**ACELEROGRAMAS DE LA BASE DE DATOS RENAC**



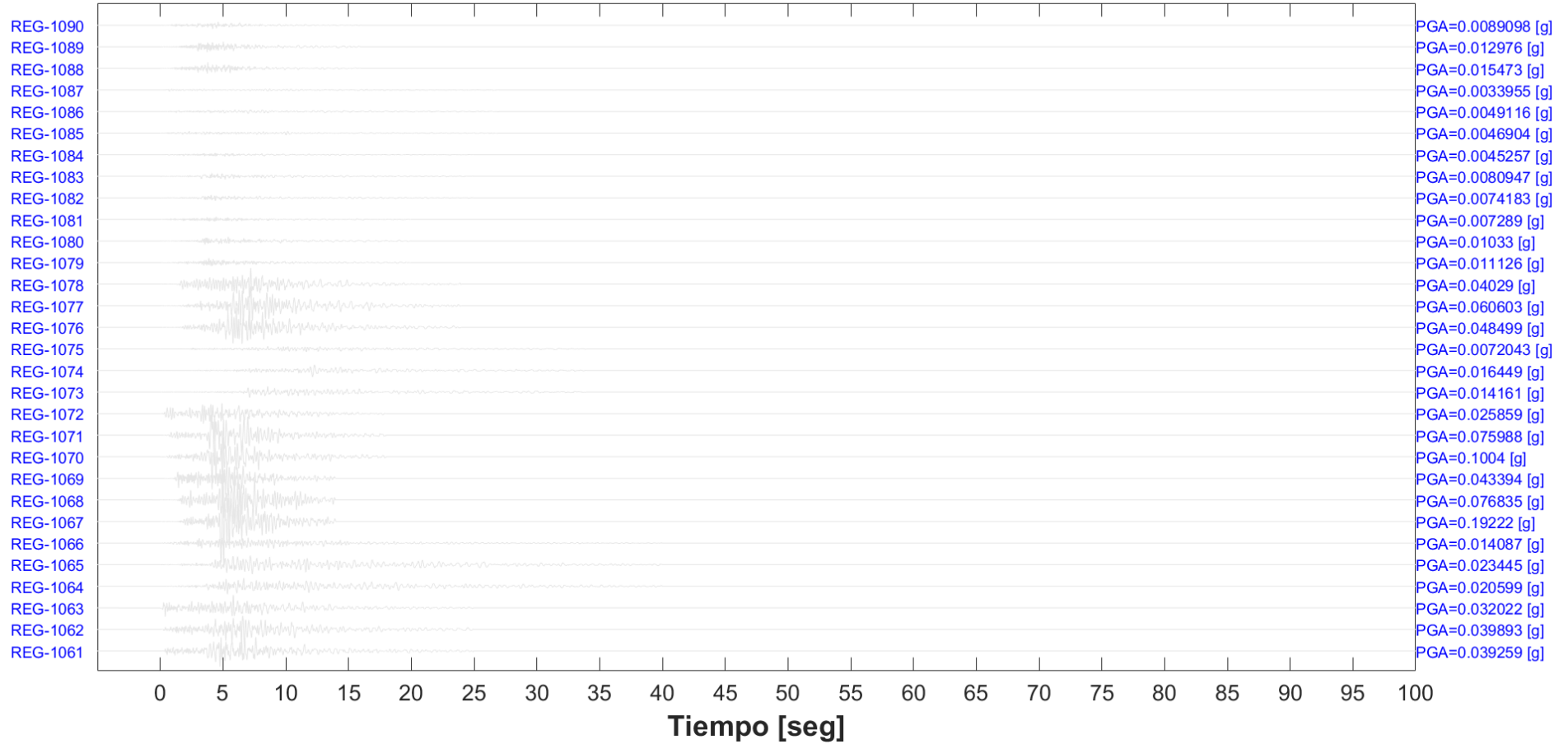
Anexo 2-1: Acelerogramas base de datos RENAC (1-30). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS DE LA BASE DE DATOS RENAC



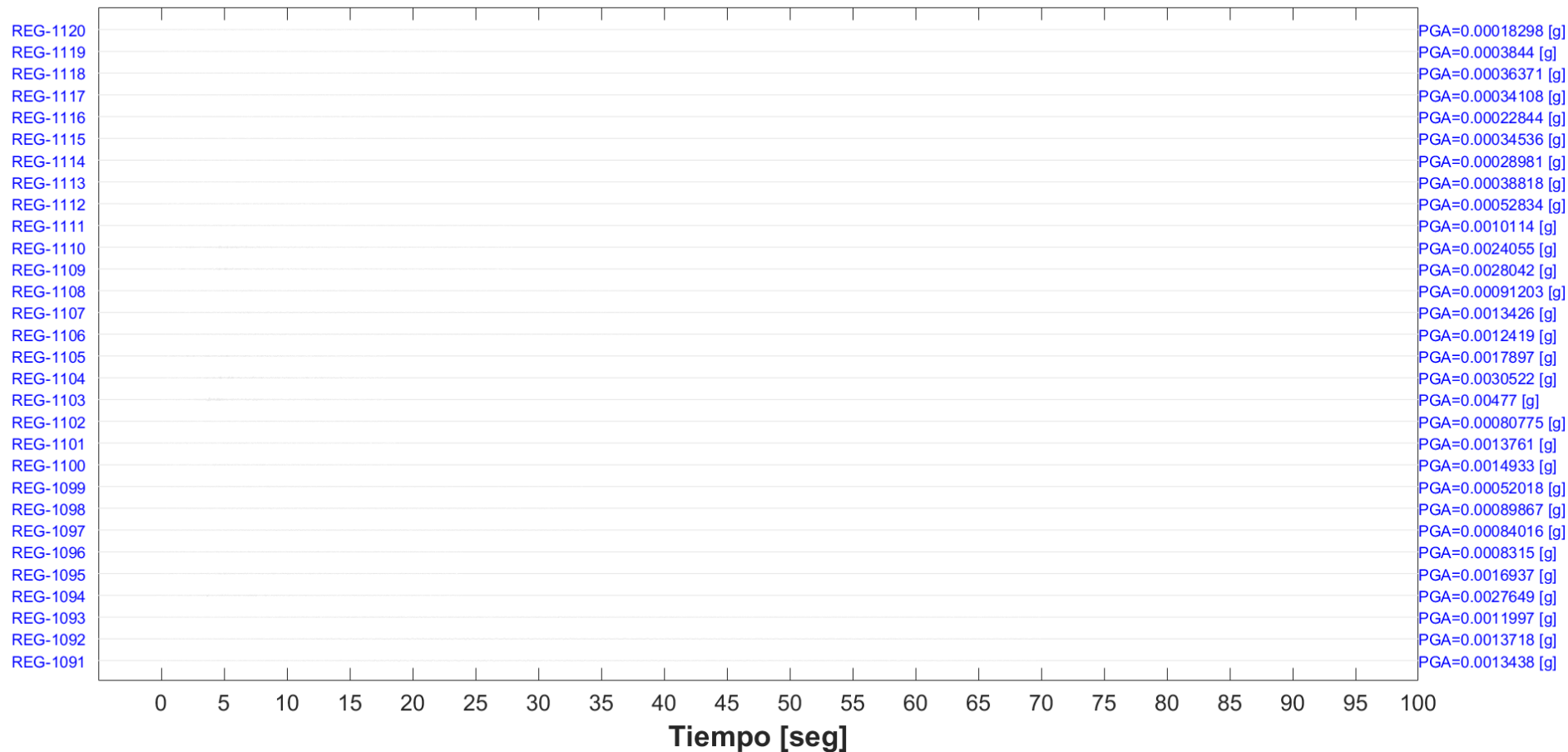
Anexo 2-2: Acelerogramas base de datos RENAC (31-60). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS DE LA BASE DE DATOS RENAC



Anexo 2-3: Acelerogramas base de datos RENAC (61-90). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS DE LA BASE DE DATOS RENAC

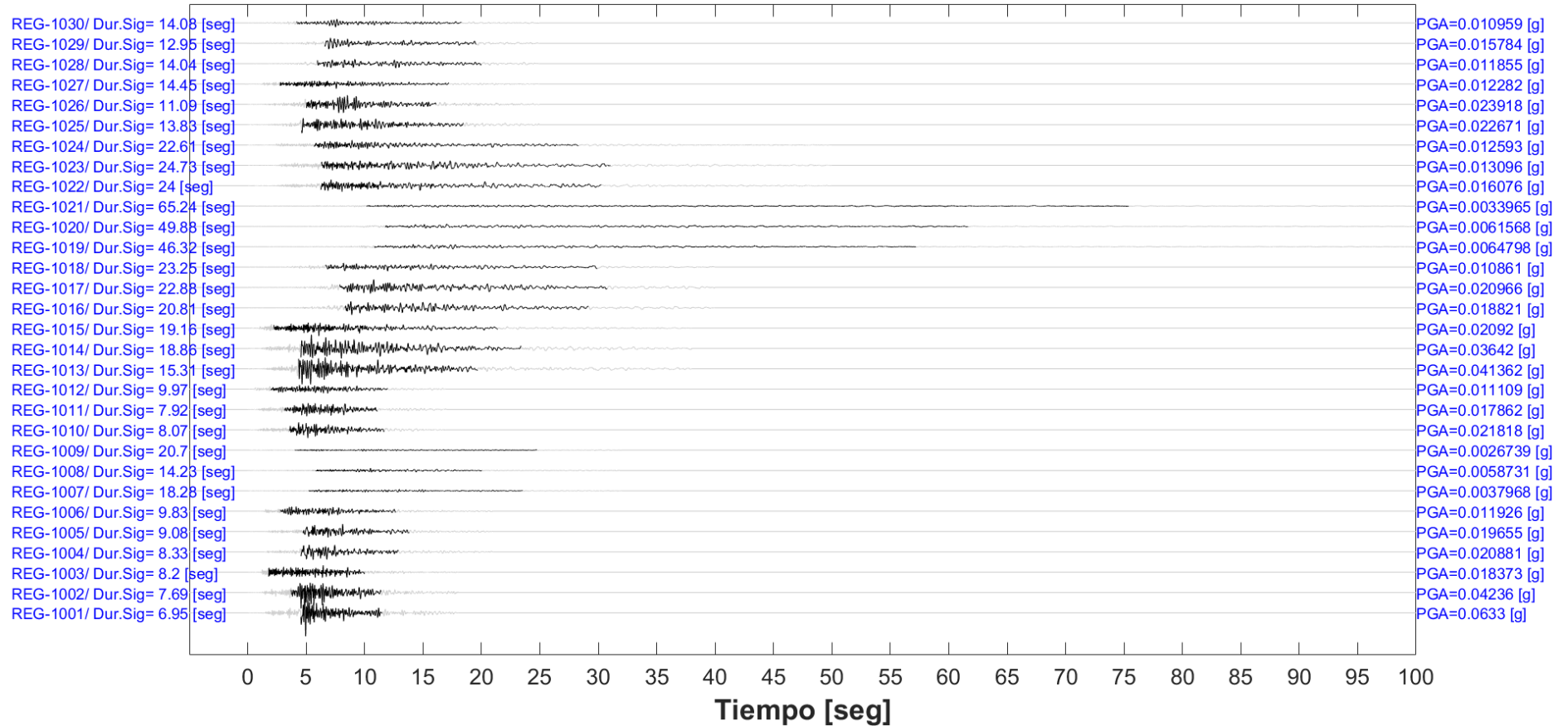


Anexo 2-4: Acelerogramas base de datos RENAC (91-120). (Elaboración propia)

**Nota:** Todos los acelerogramas se graficaron a la misma escala.

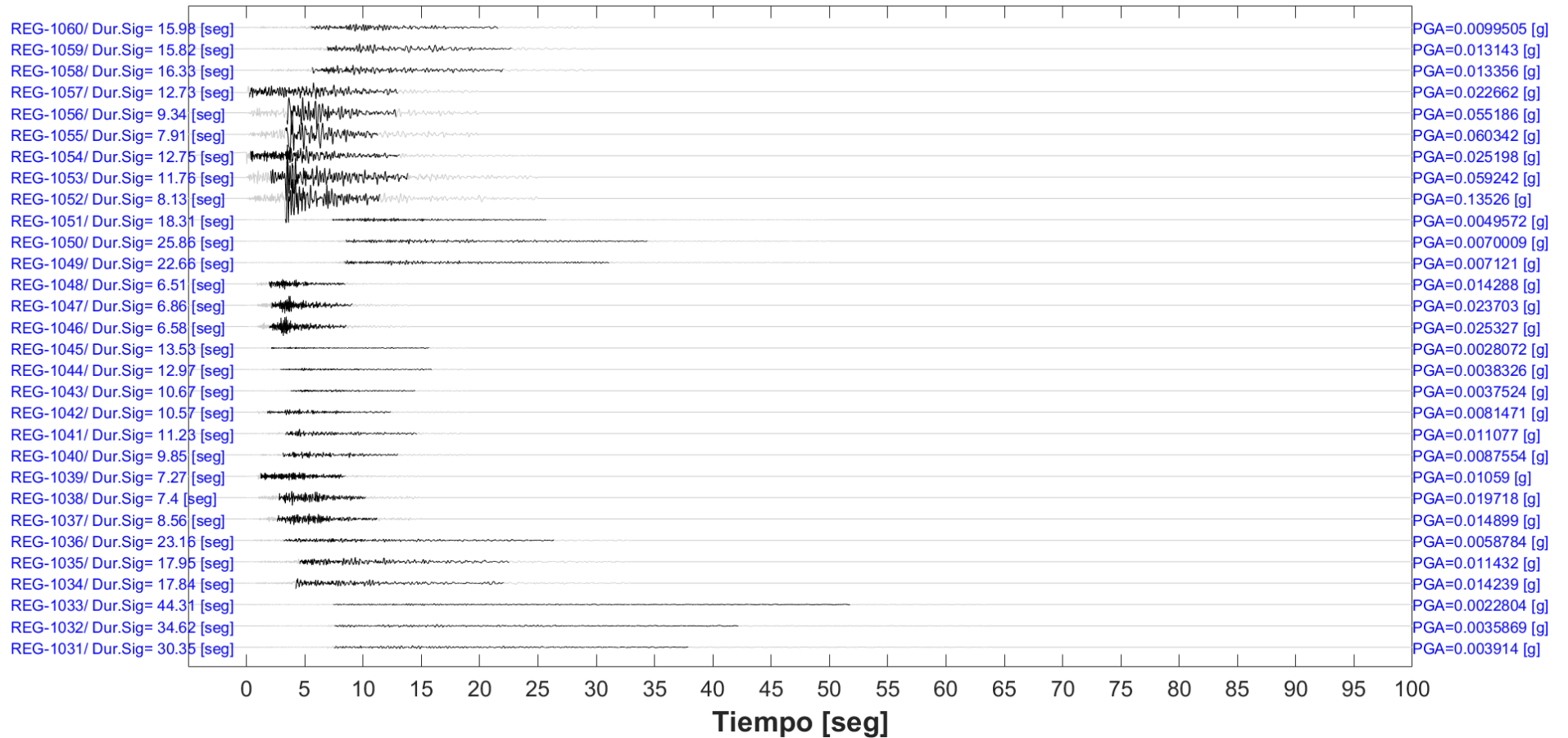
### 6.3 Duración significativa de los acelerogramas reales

#### ACELEROGRAMAS EN LA DURACIÓN SIGNIFICATIVA



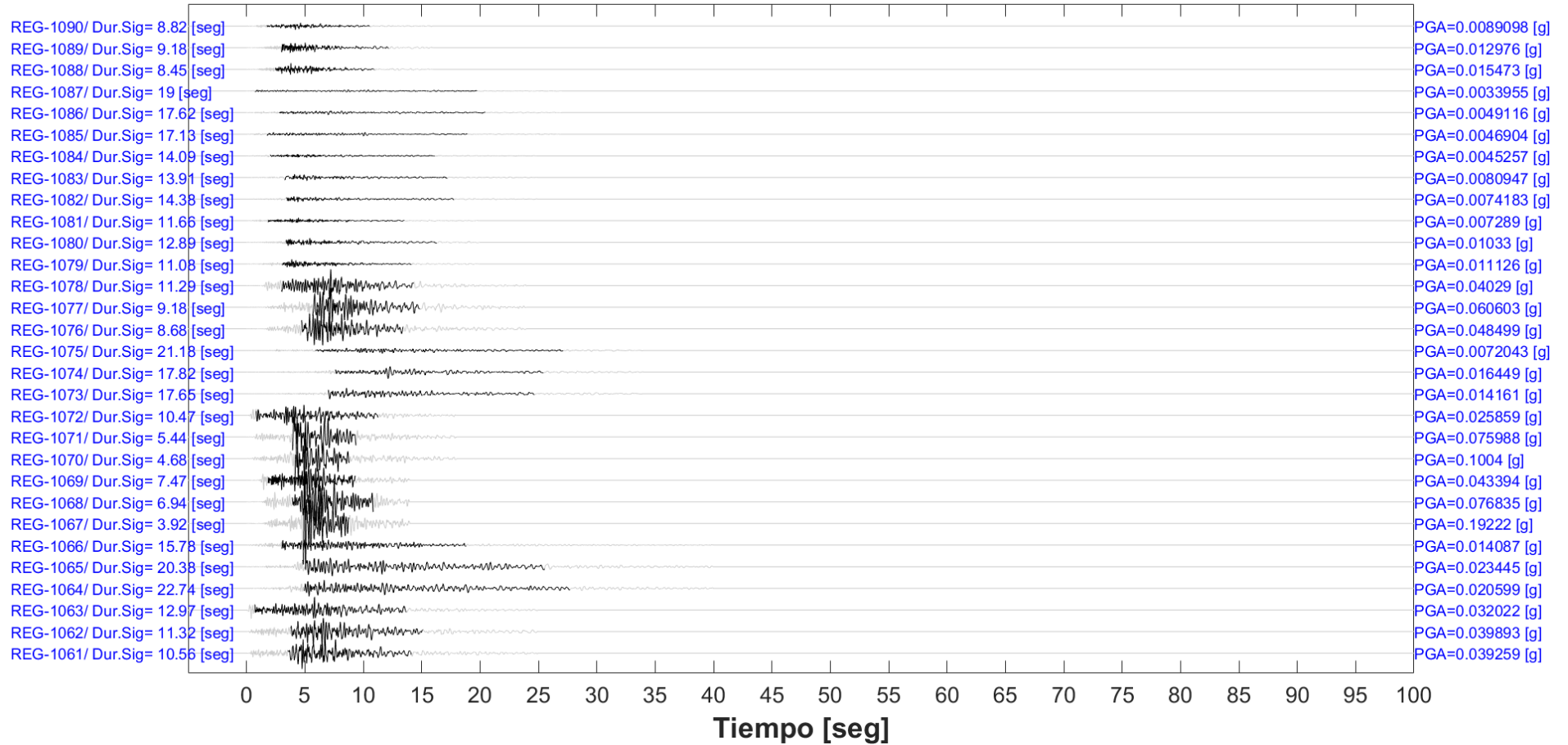
Anexo 3-1: Duración significativa de los acelerogramas de la base de datos RENAC (1000-1030). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS EN LA DURACIÓN SIGNIFICATIVA



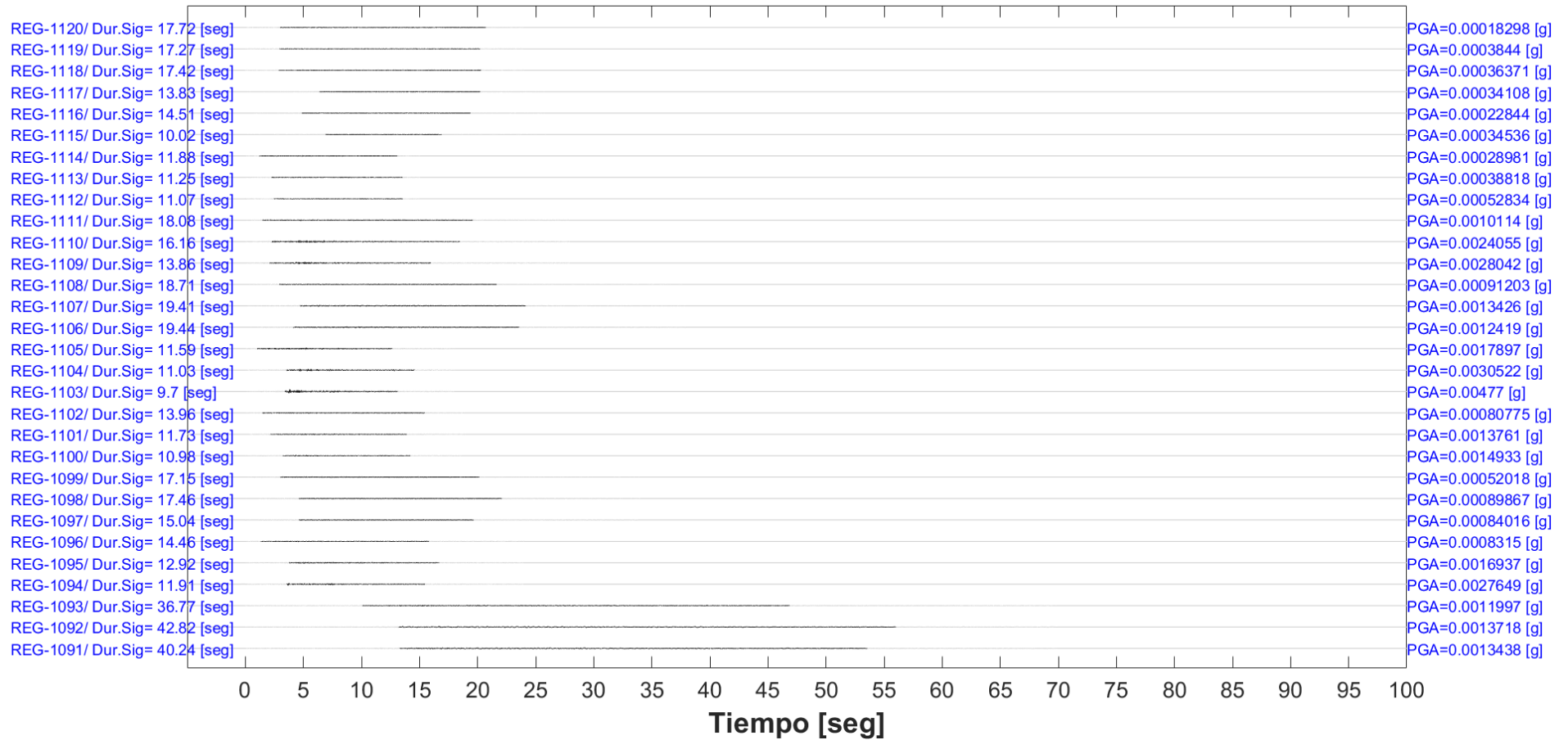
Anexo 3-2: Duración significativa de los acelerogramas de la base de datos RENAC (1031-1061). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS EN LA DURACIÓN SIGNIFICATIVA



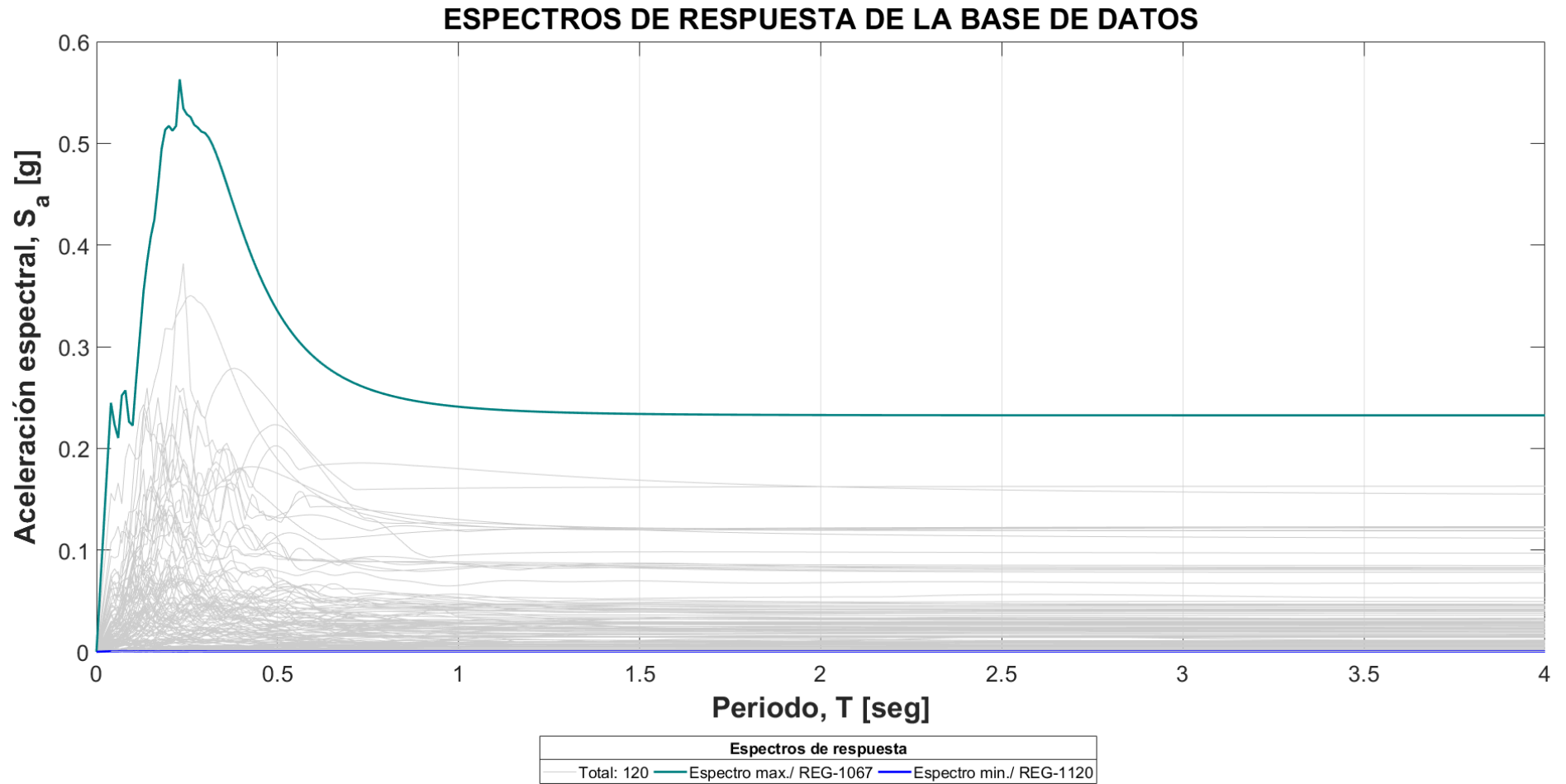
Anexo 3-3: Duración significativa de los acelerogramas de la base de datos RENAC (1061-1091). (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS EN LA DURACIÓN SIGNIFICATIVA



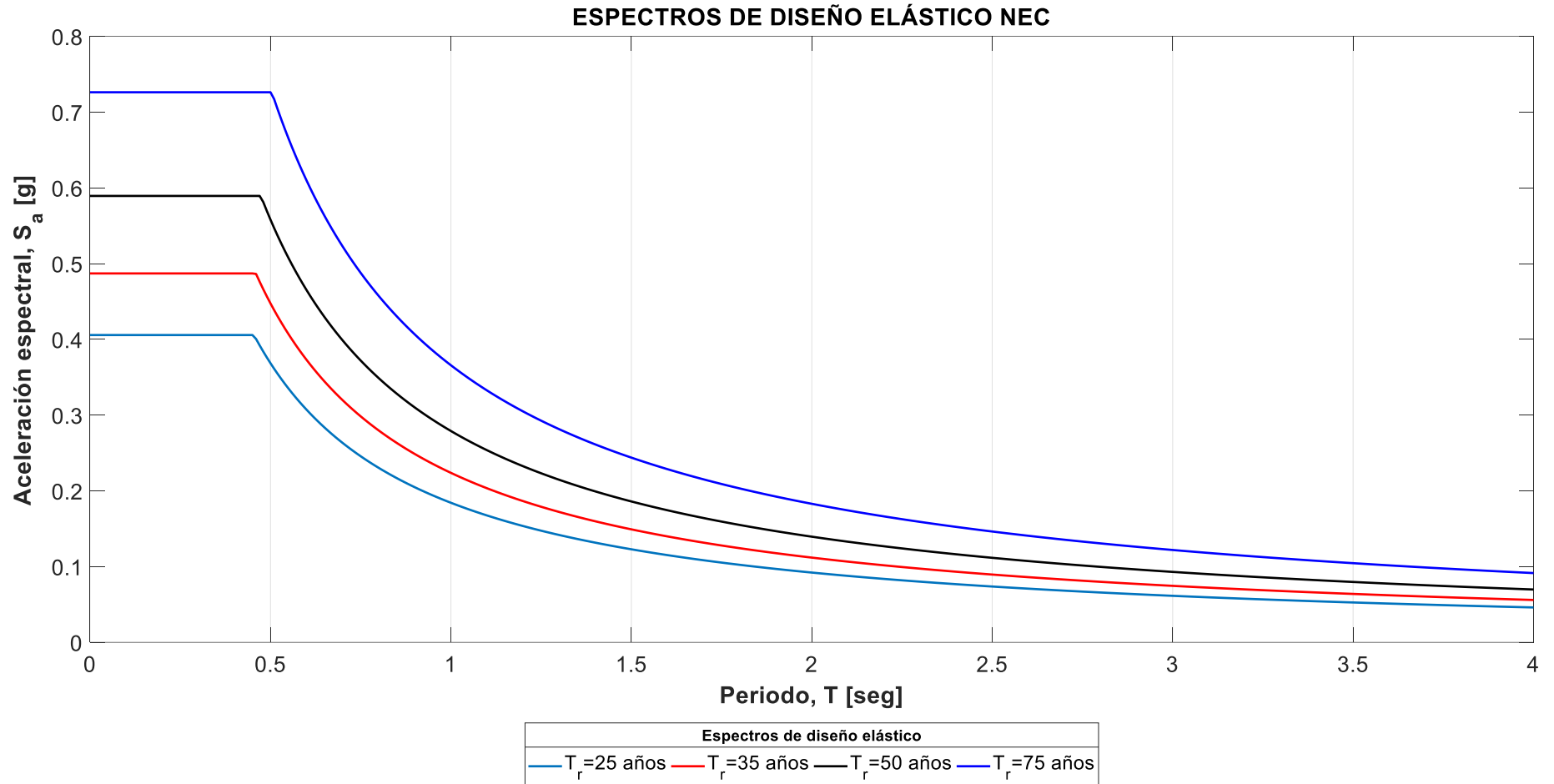
Anexo 3-4: Duración significativa de los acelerogramas de la base de datos RENAC (1091-1120). (Elaboración propia)

6.4 Espectros de respuesta del acelerogramas reales



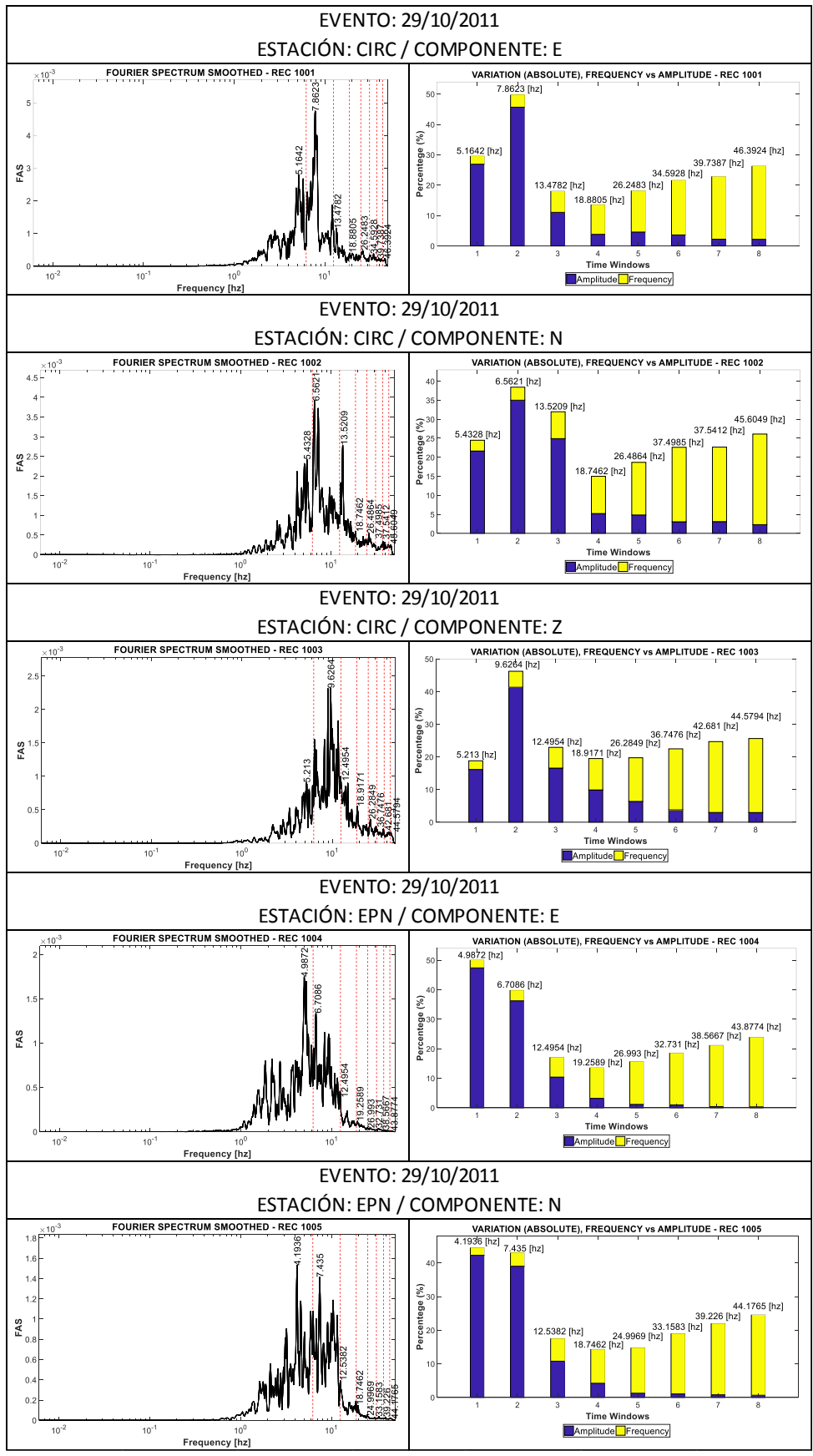
Anexo 4-1: Espectros de respuesta de la base de datos. (Elaboración propia)

6.5 Espectros de diseño elástico NEC

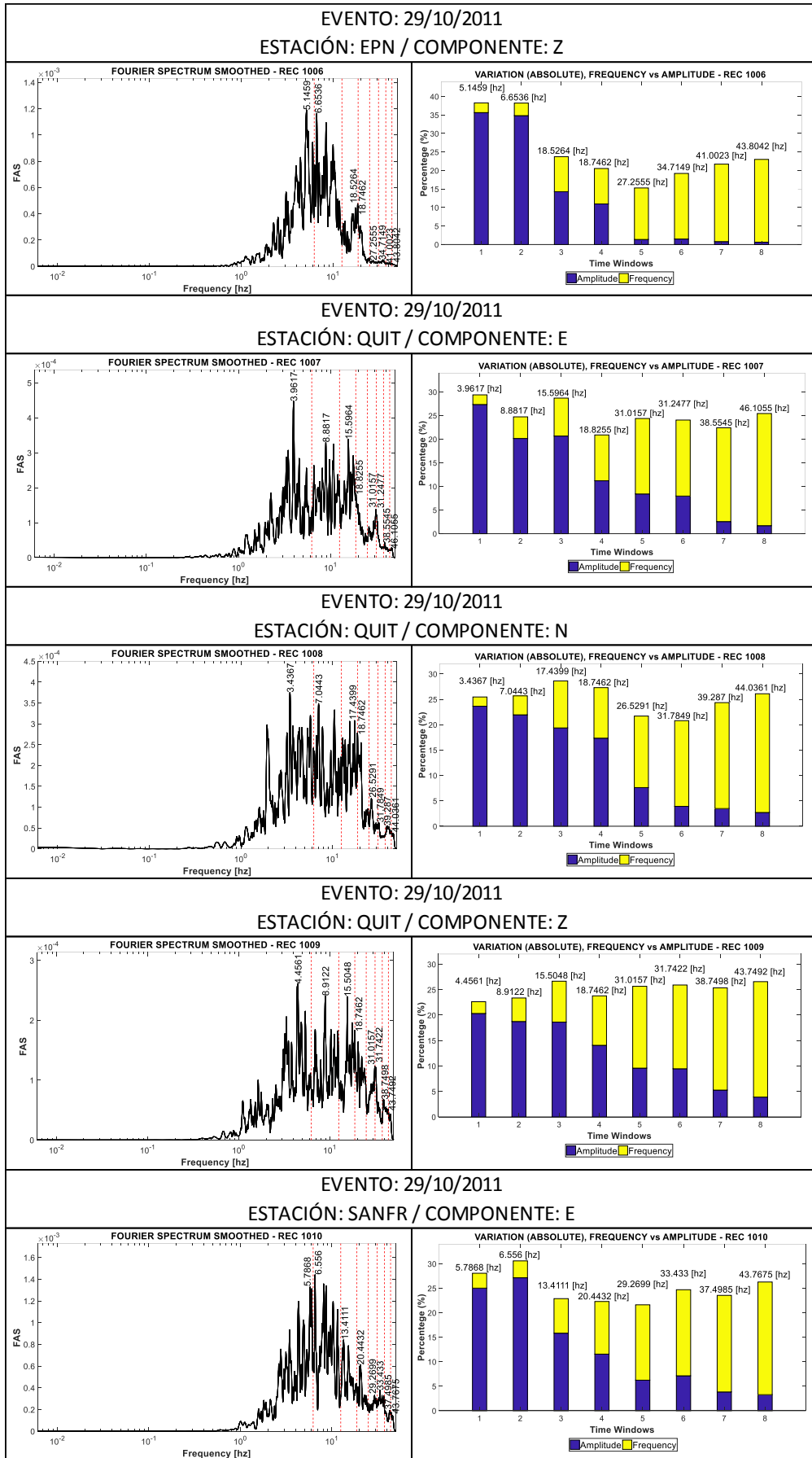


Anexo 5-1: Espectros NEC para varios periodos de retorno. (Elaboración propia)

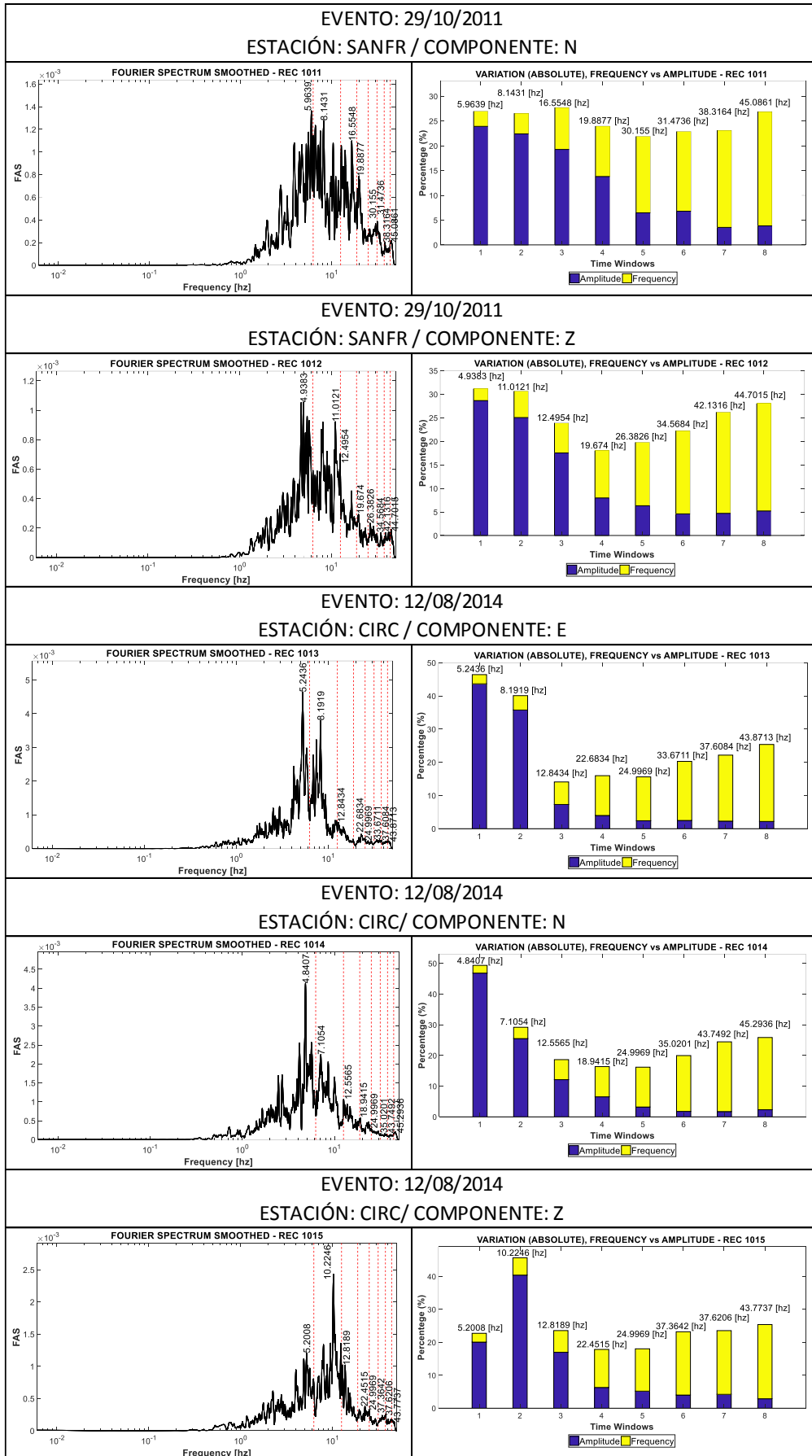
6.6 Análisis de Fourier



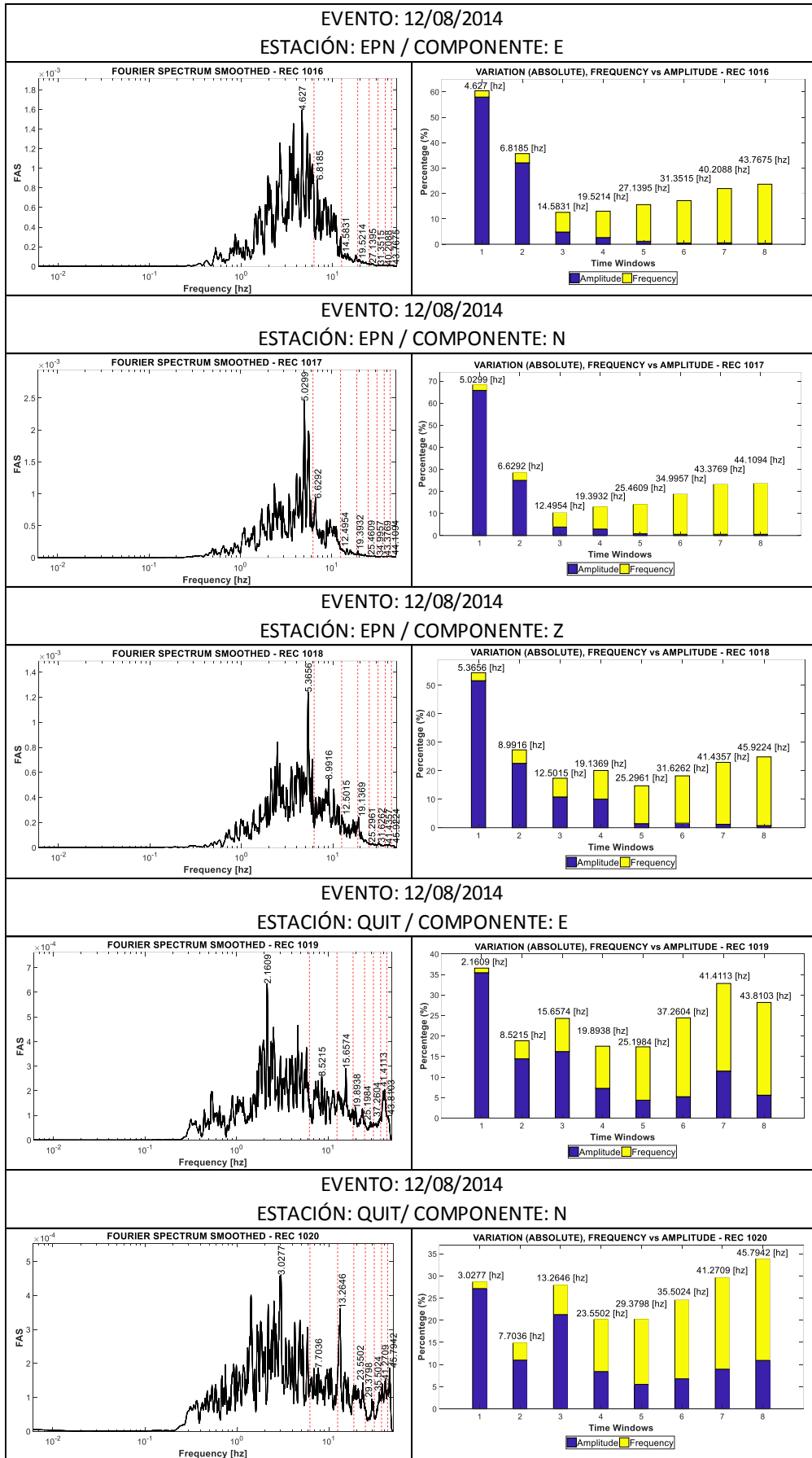
Anexo 6-1: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1001-1005. (Elaboración propia)



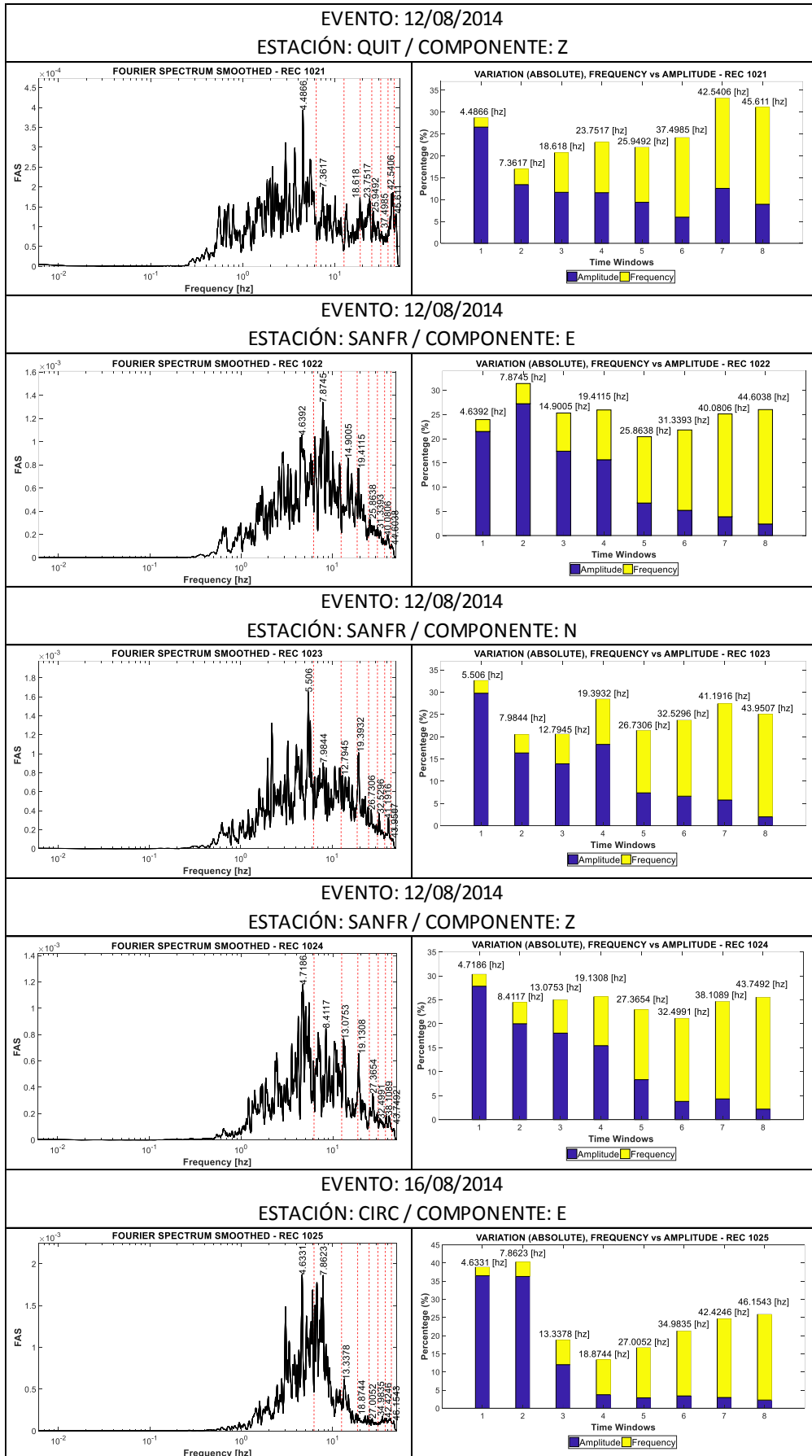
Anexo 6-2: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1006-1010. (Elaboración propia)



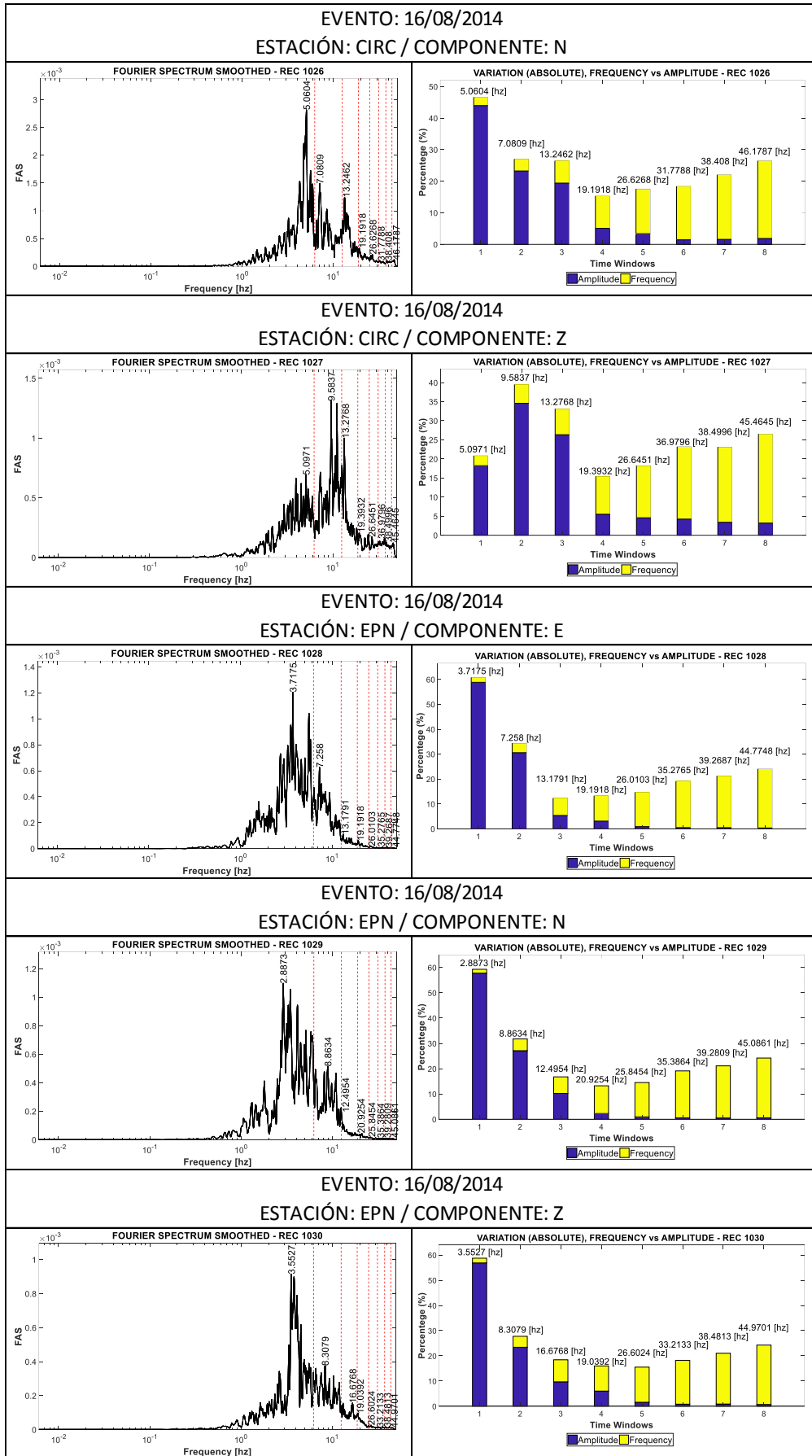
Anexo 6-3: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1011-1015. (Elaboración propia)



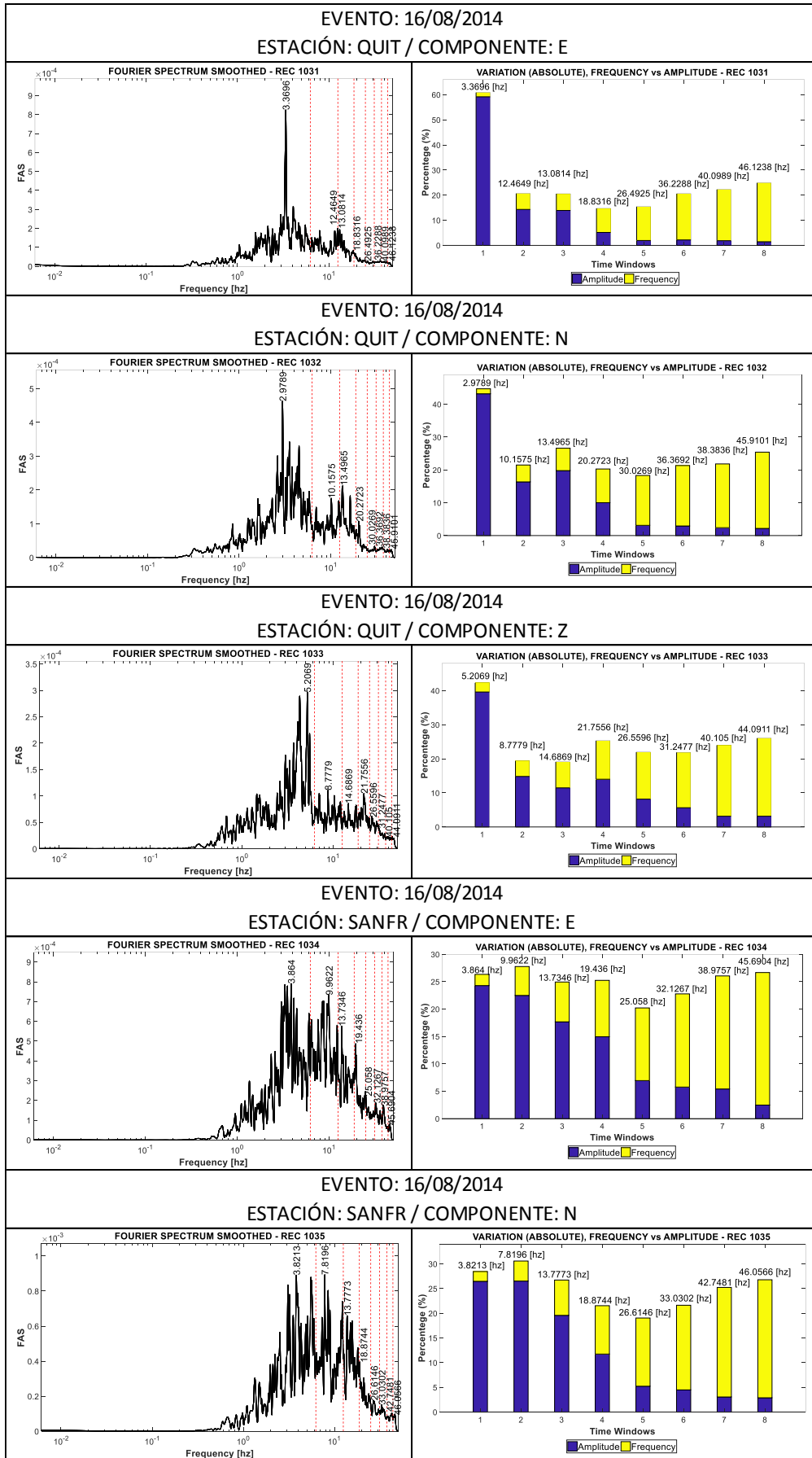
Anexo 6- 4: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1016-1020. (Elaboración propia)



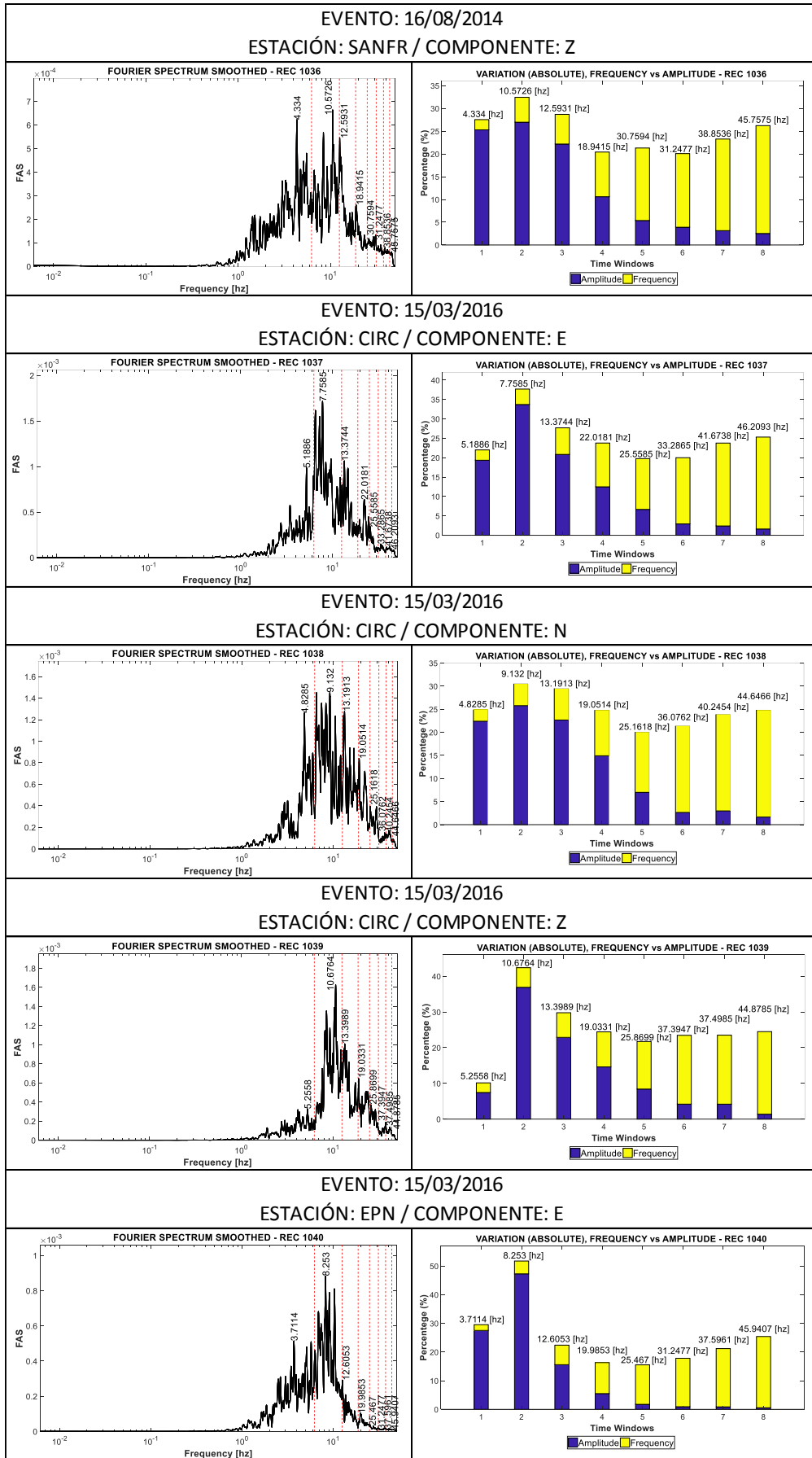
Anexo 6-5: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1021-1025. (Elaboración propia)



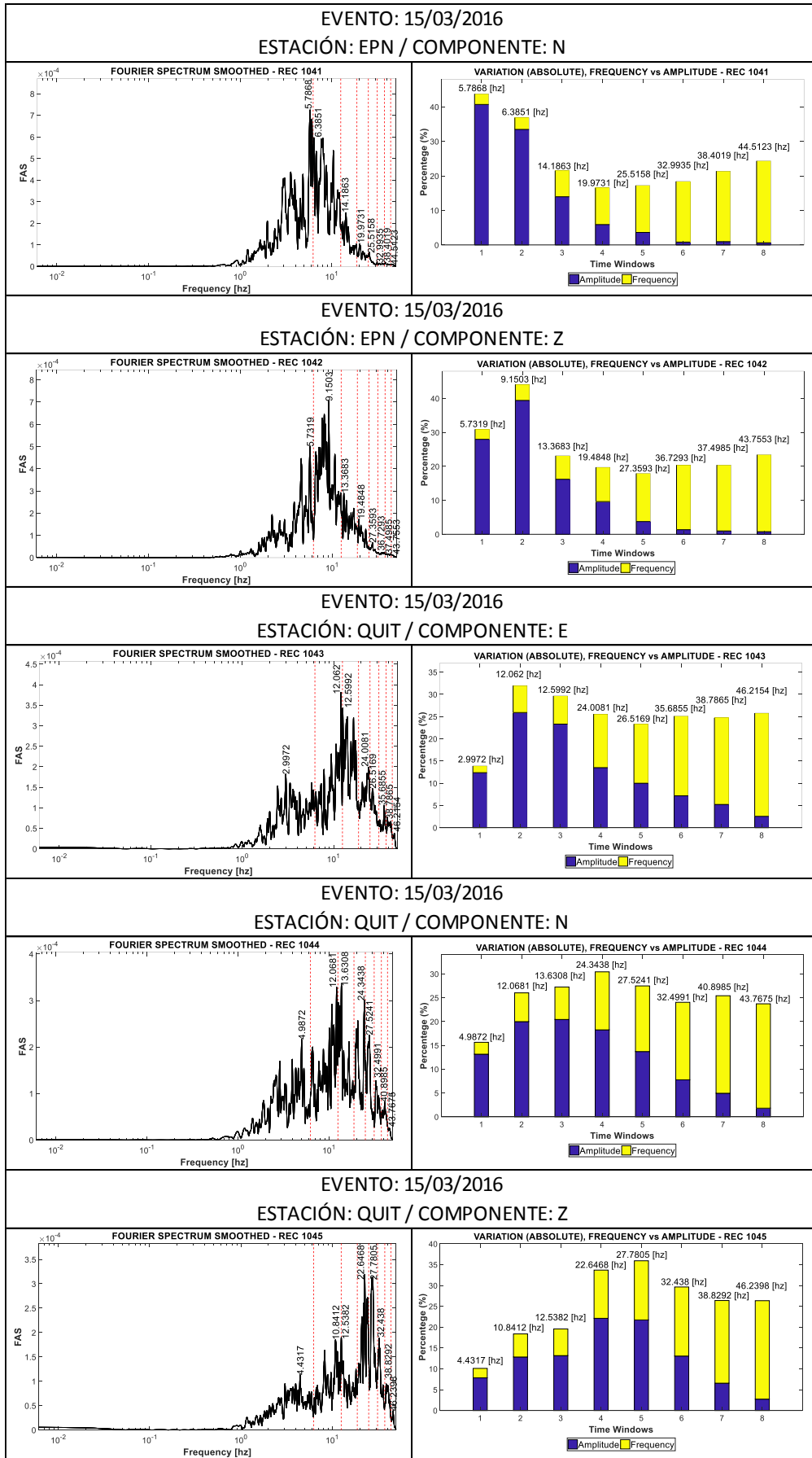
Anexo 6-6: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1026-1030. (Elaboración propia)



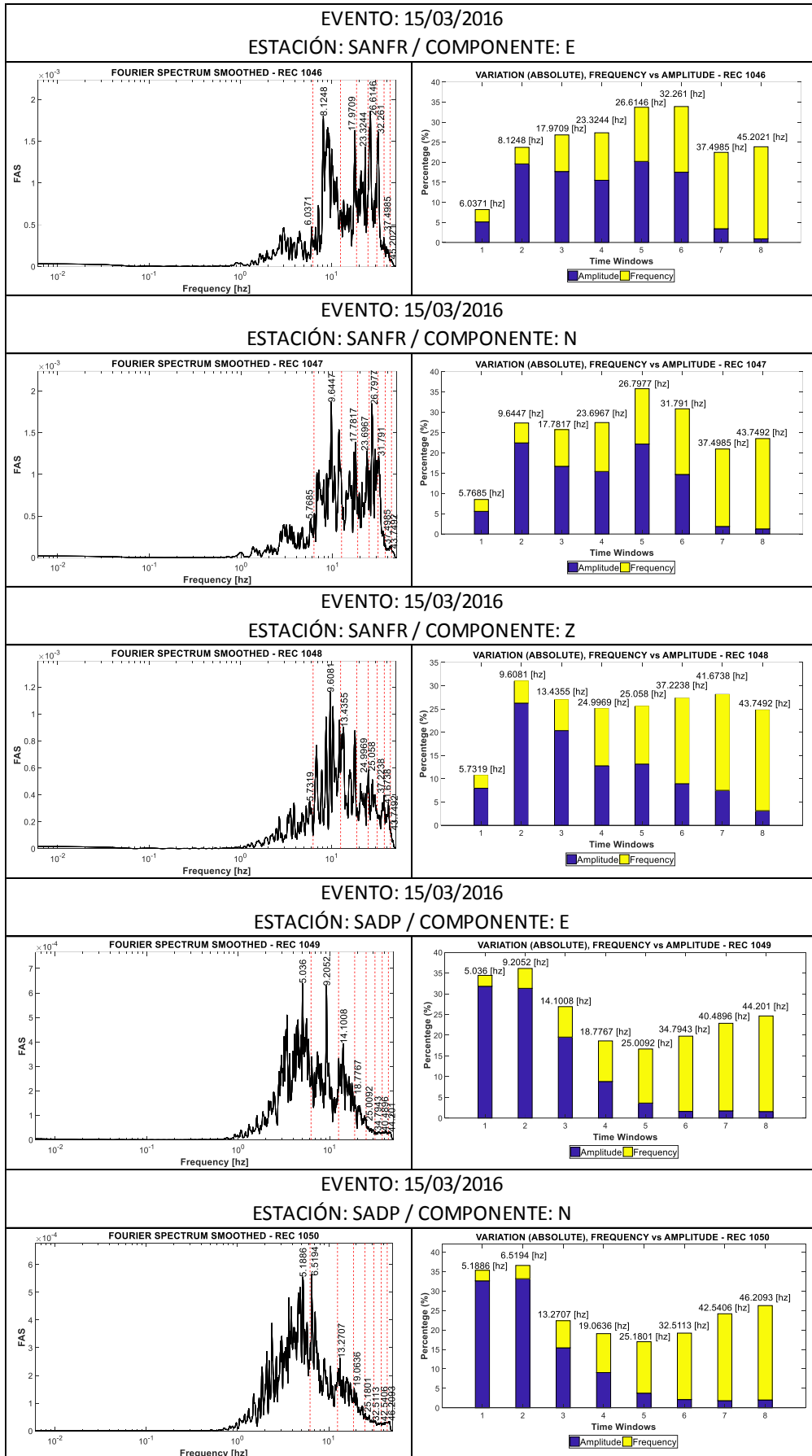
Anexo 6-7: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1031-1035. (Elaboración propia)



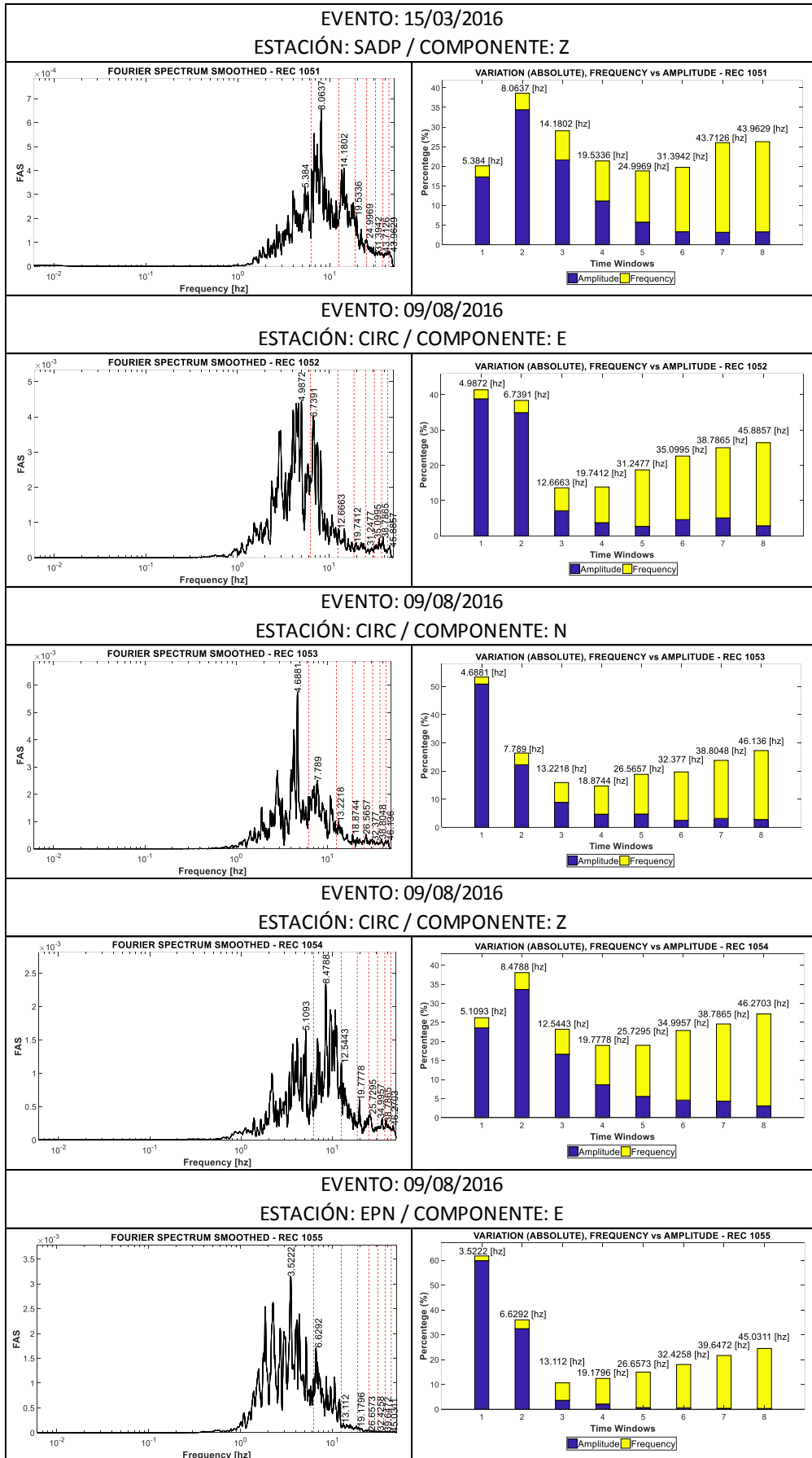
Anexo 6-8: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1036-1040. (Elaboración propia)



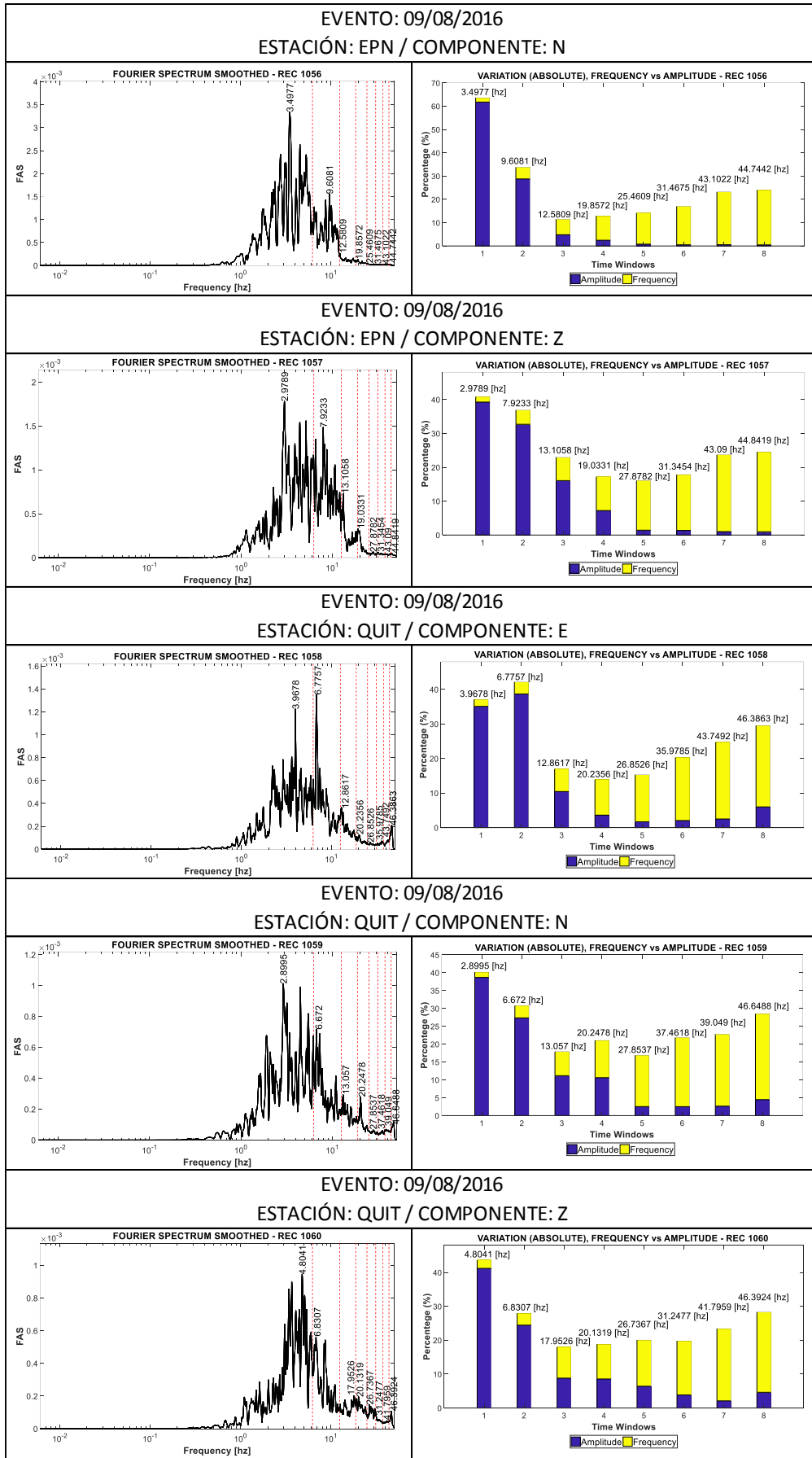
Anexo 6-9: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1041-1045. (Elaboración propia)



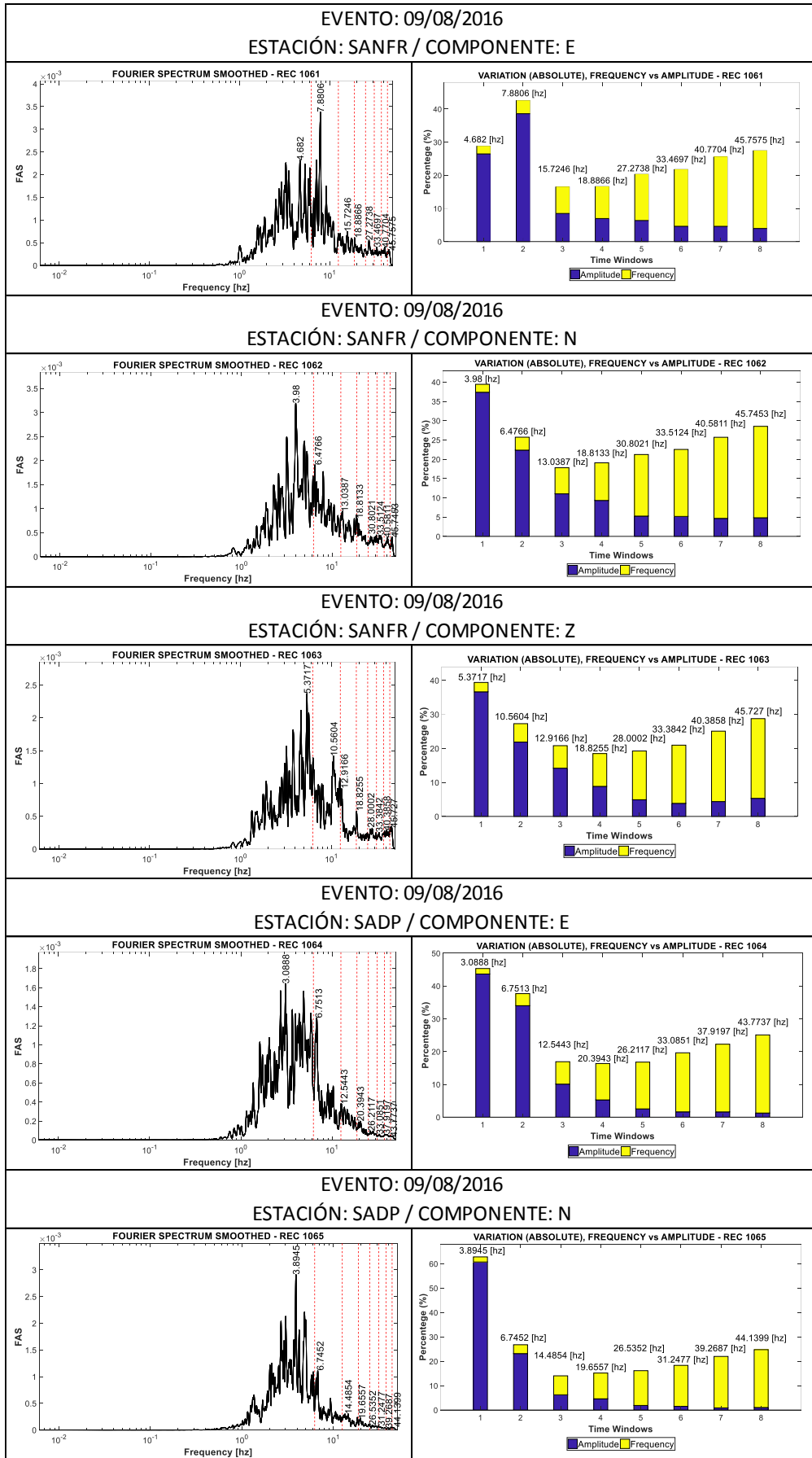
Anexo 6-10: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1046-1050. (Elaboración propia)



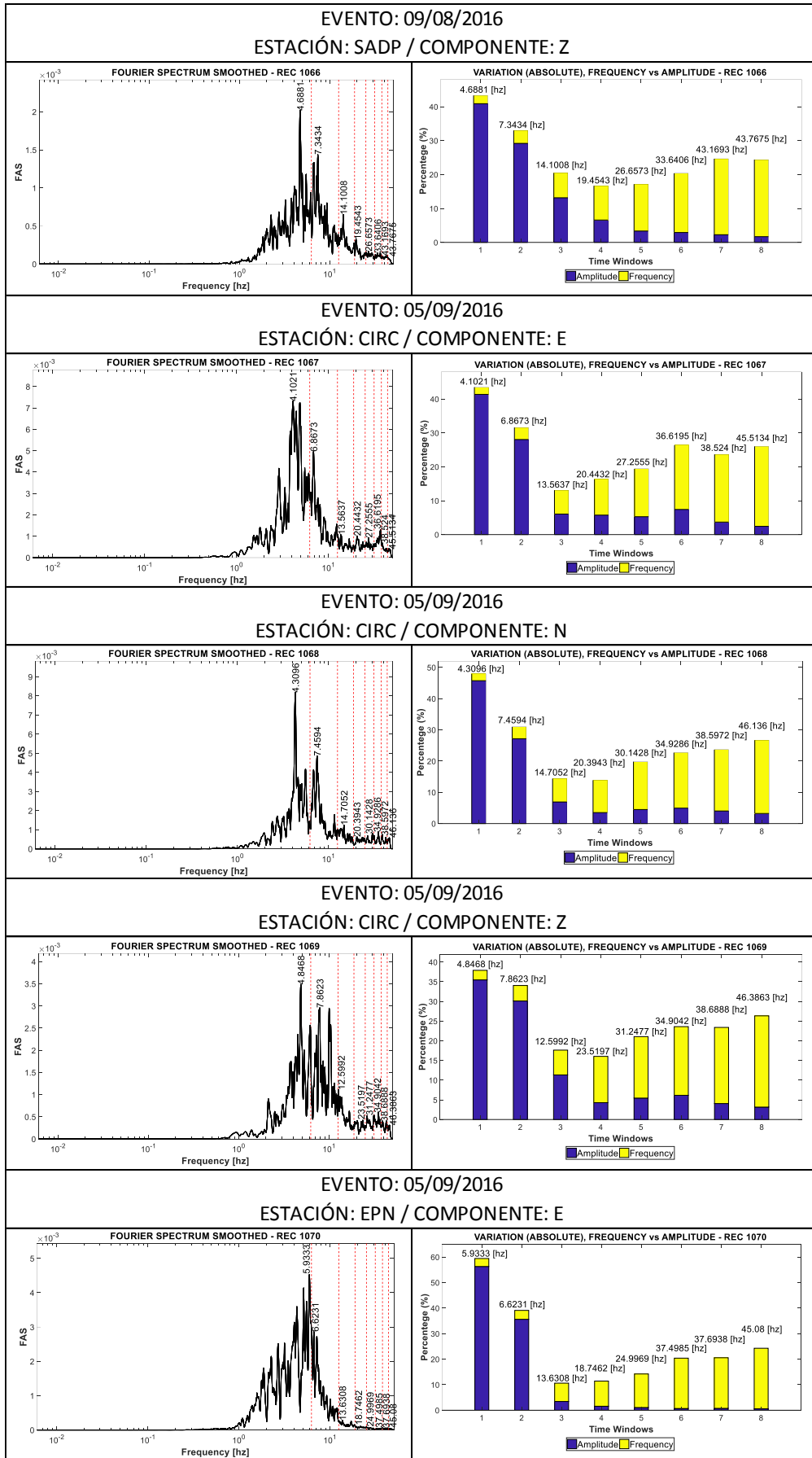
Anexo 6-11: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1051-1055. (Elaboración propia)



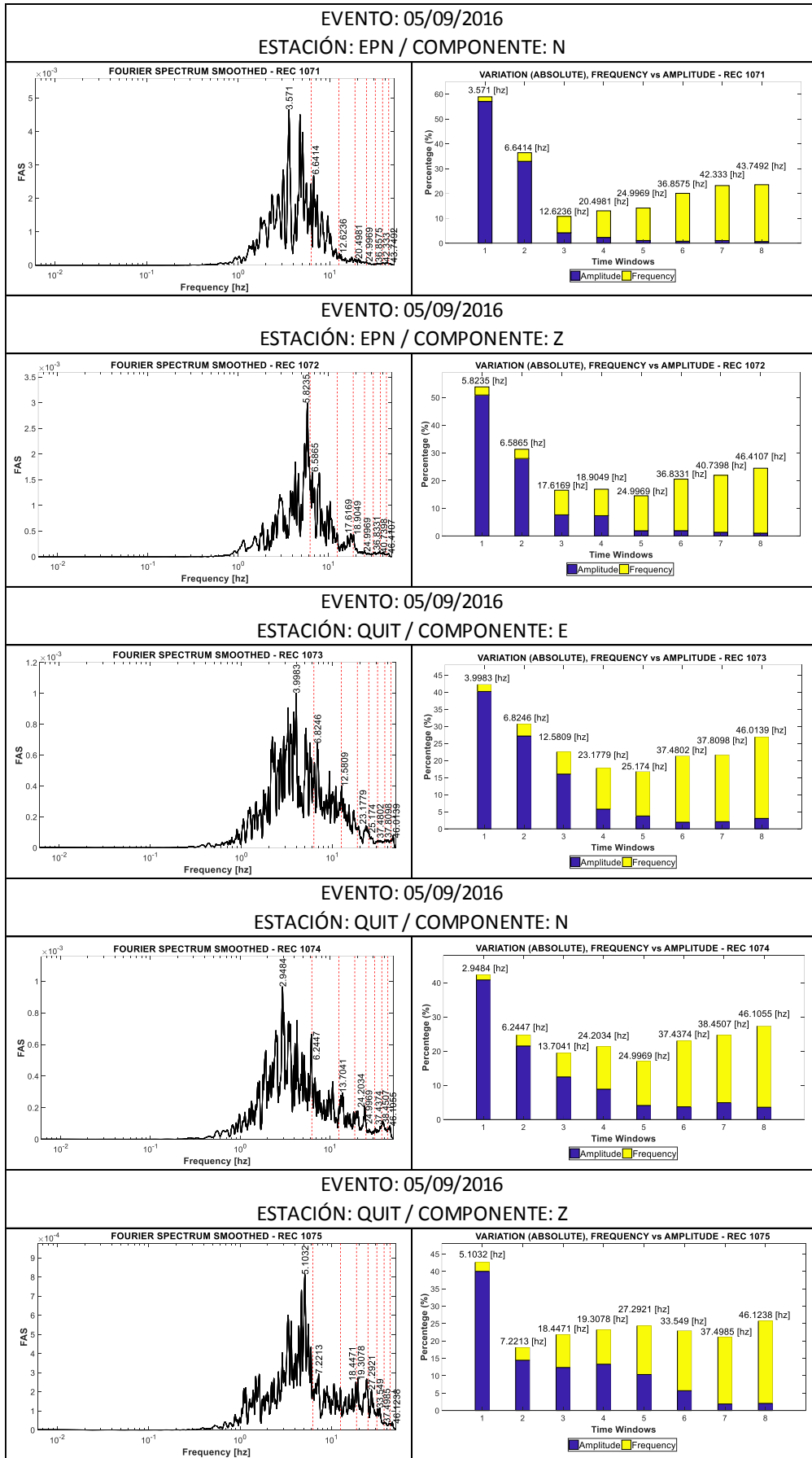
Anexo 6-12: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1056-1060. (Elaboración propia)



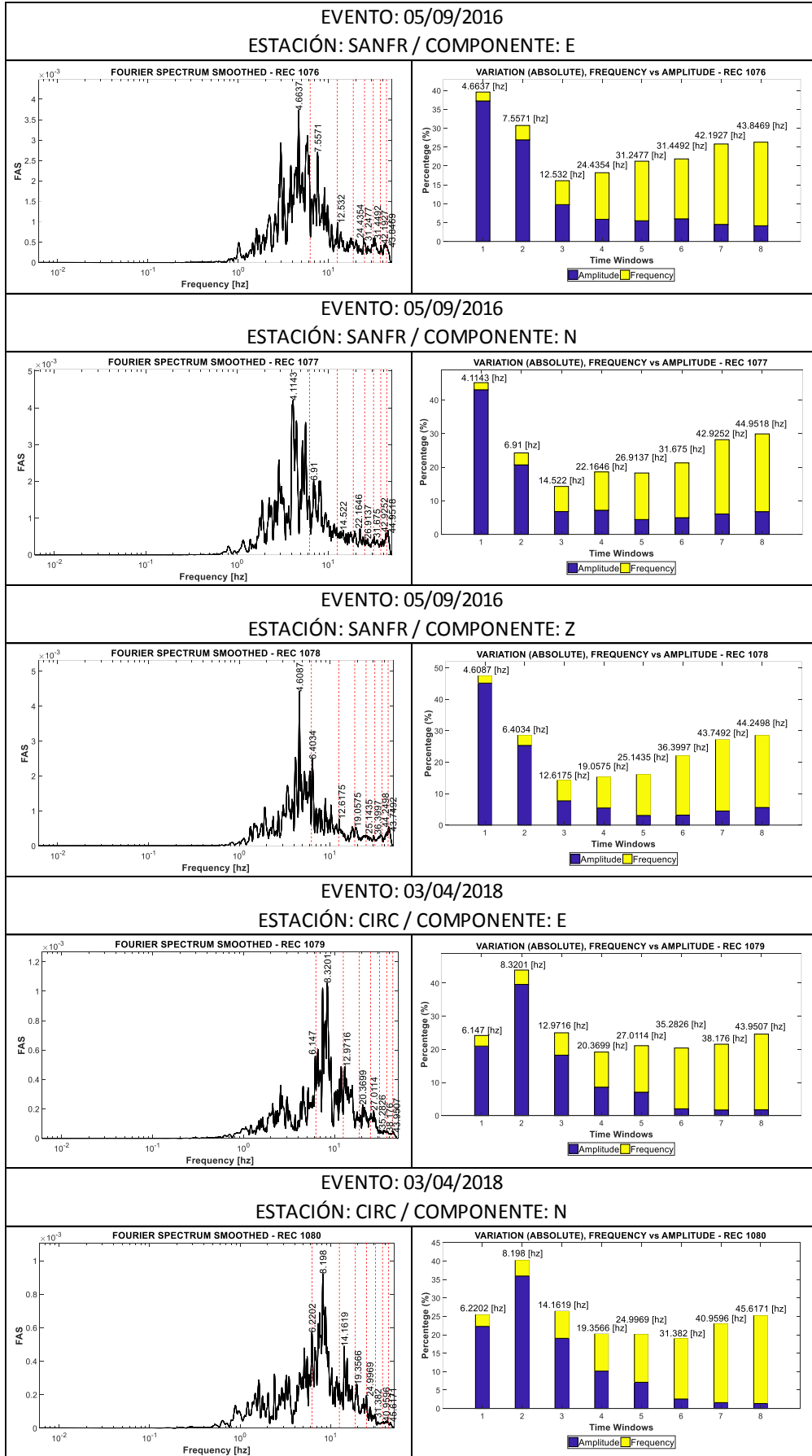
Anexo 6-13: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1061-1065. (Elaboración propia)



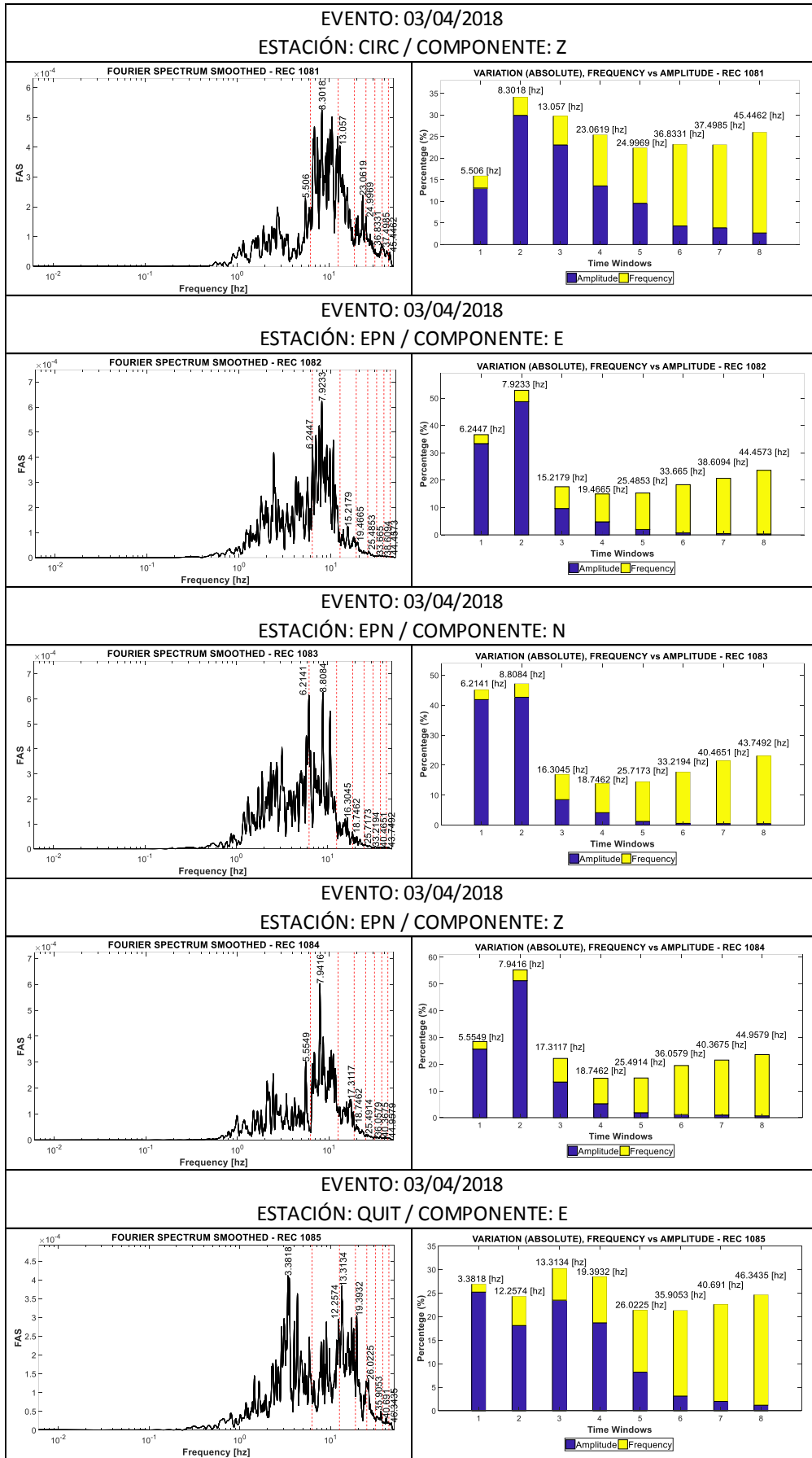
Anexo 6-14: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1066-1070. (Elaboración propia)



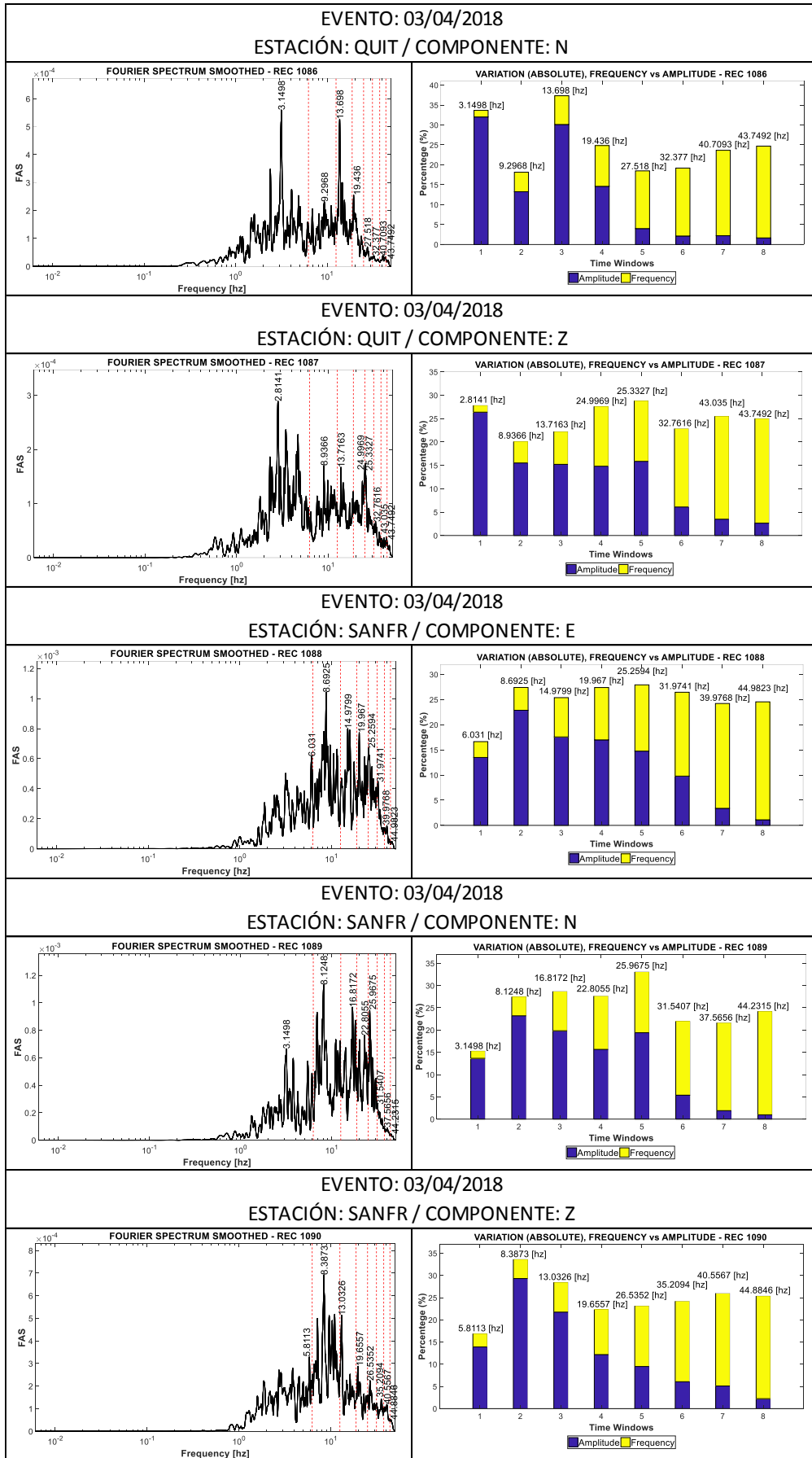
Anexo 6-15: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1071-1075. (Elaboración propia)



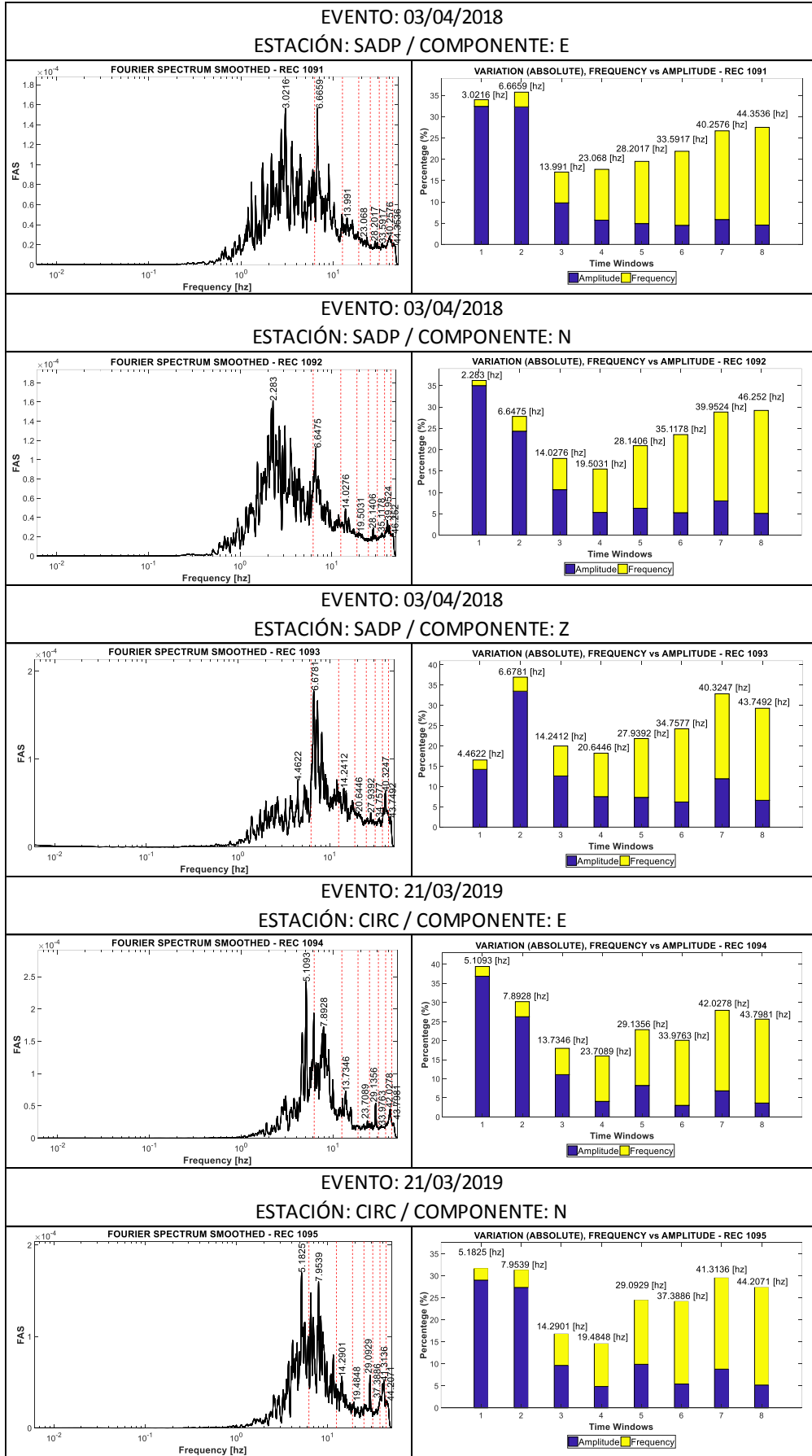
Anexo 6-16: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1076-1080. (Elaboración propia)



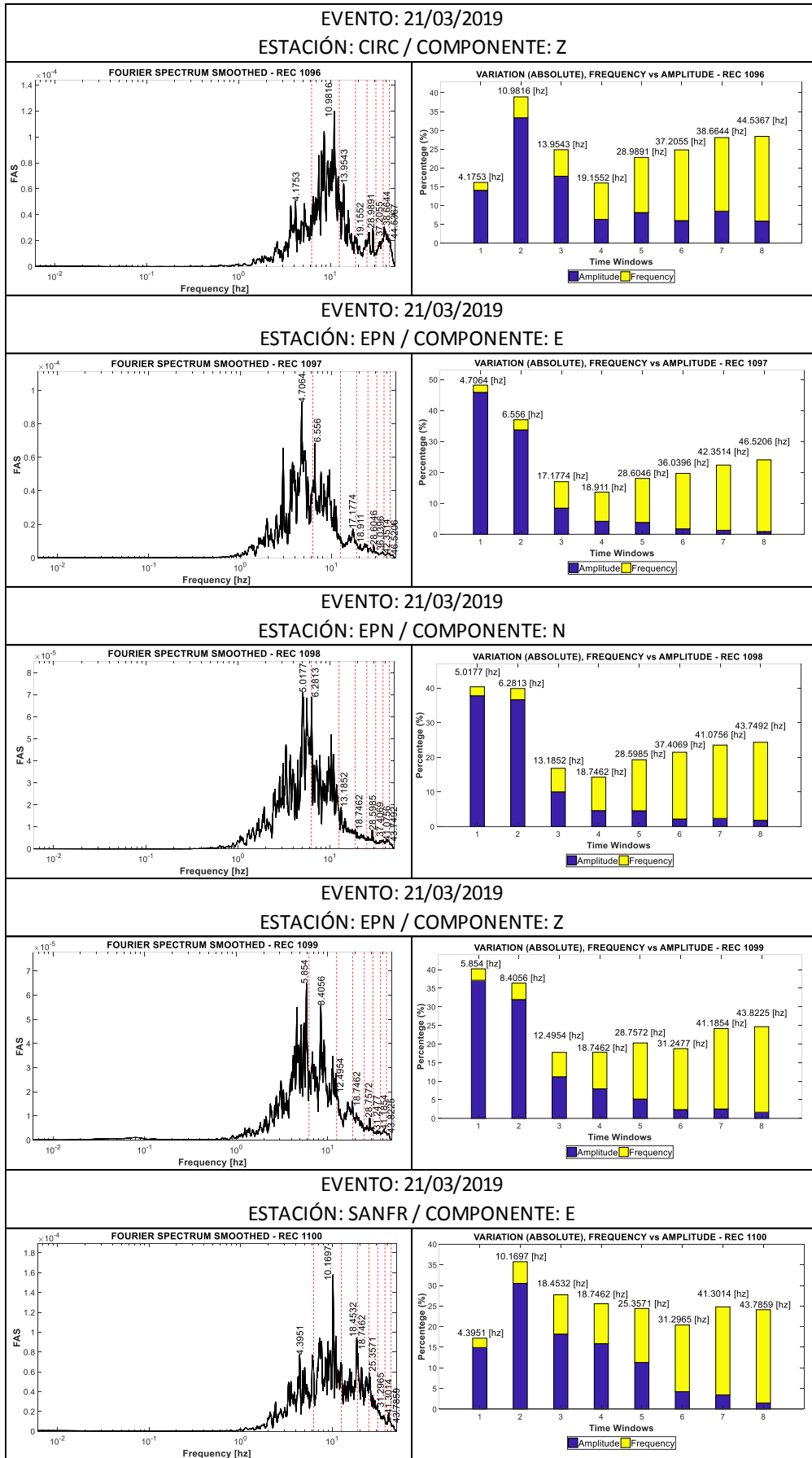
Anexo 6-17: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1081-1085. (Elaboración propia)



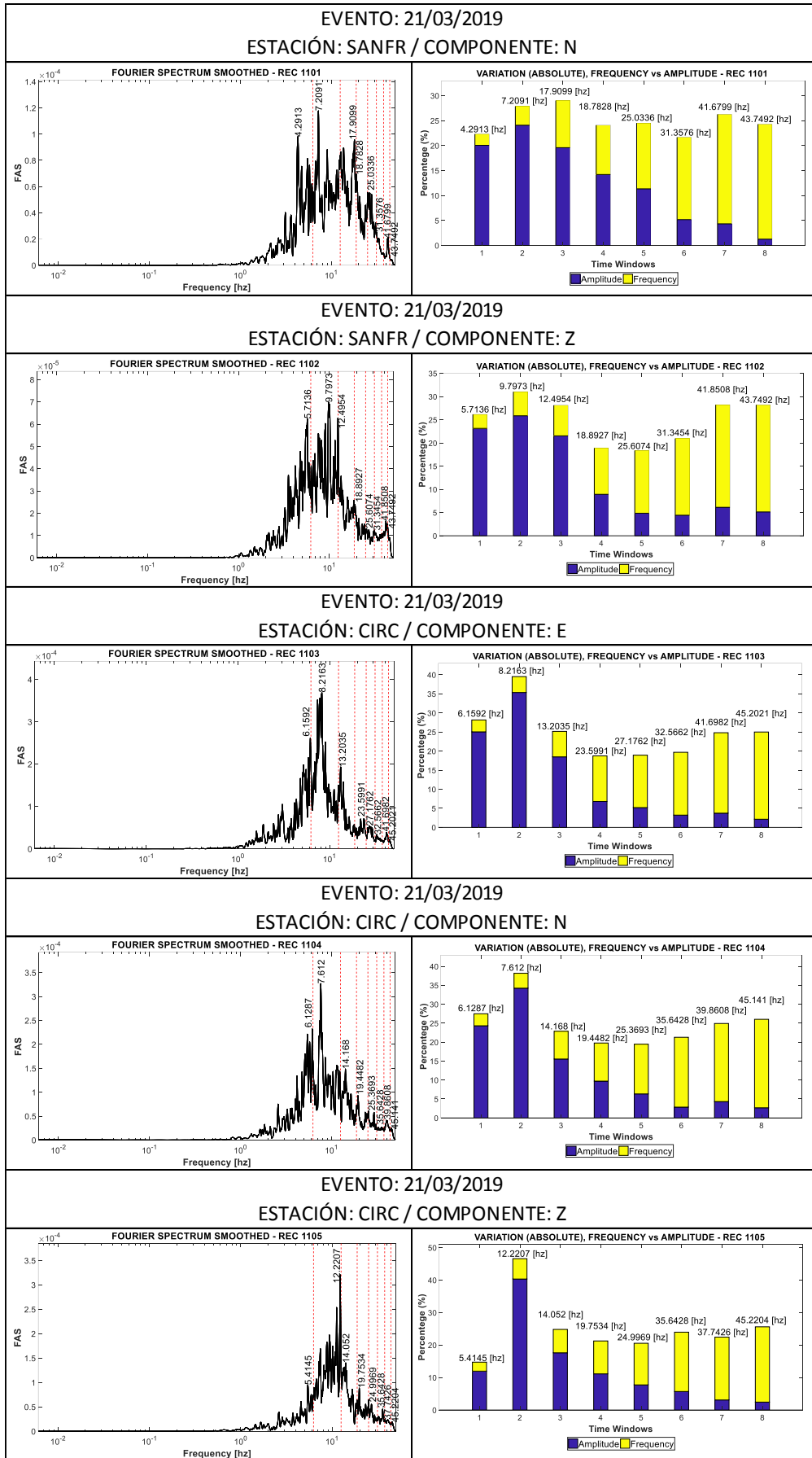
Anexo 6-18: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1086-1090. (Elaboración propia)



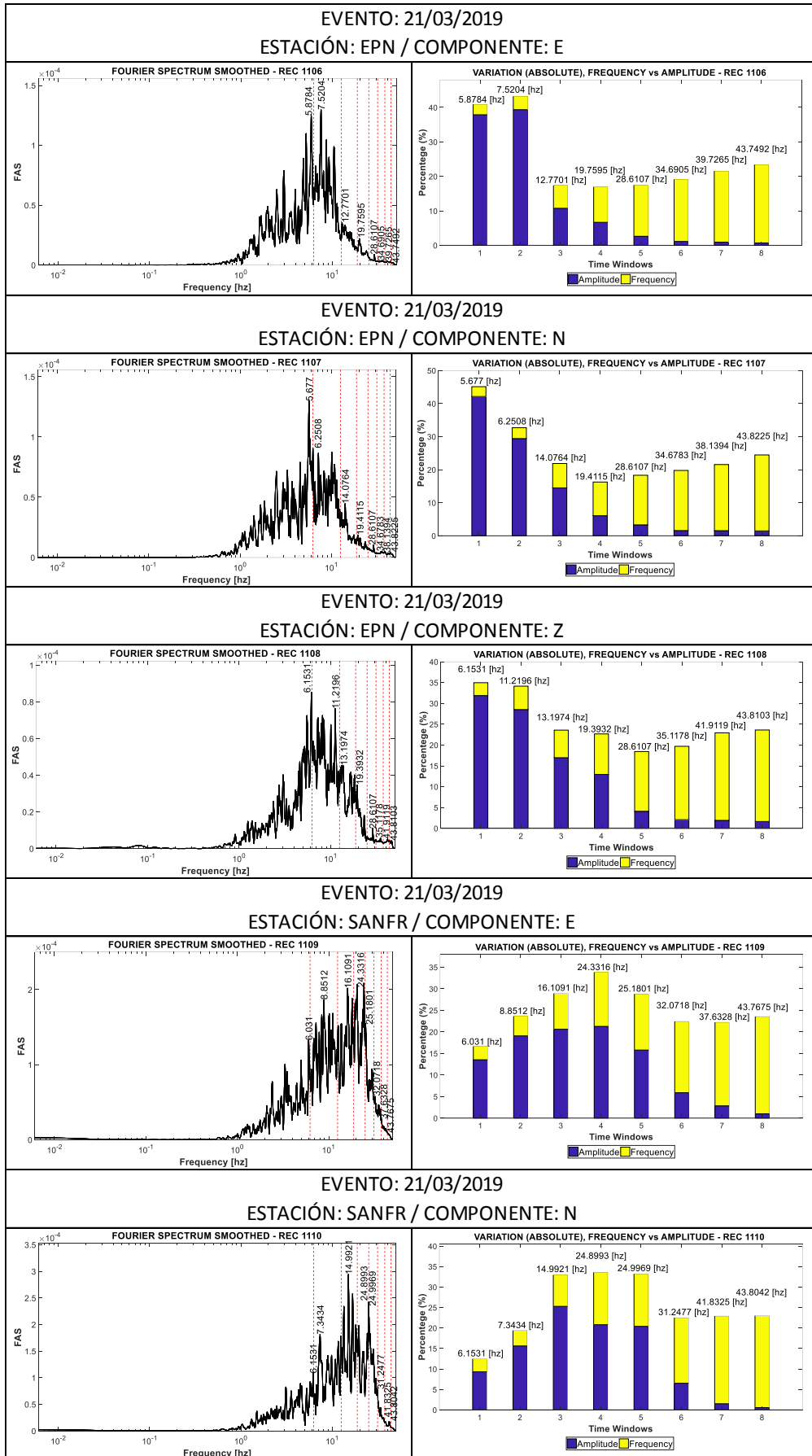
Anexo 6-19: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1091-1095. (Elaboración propia)



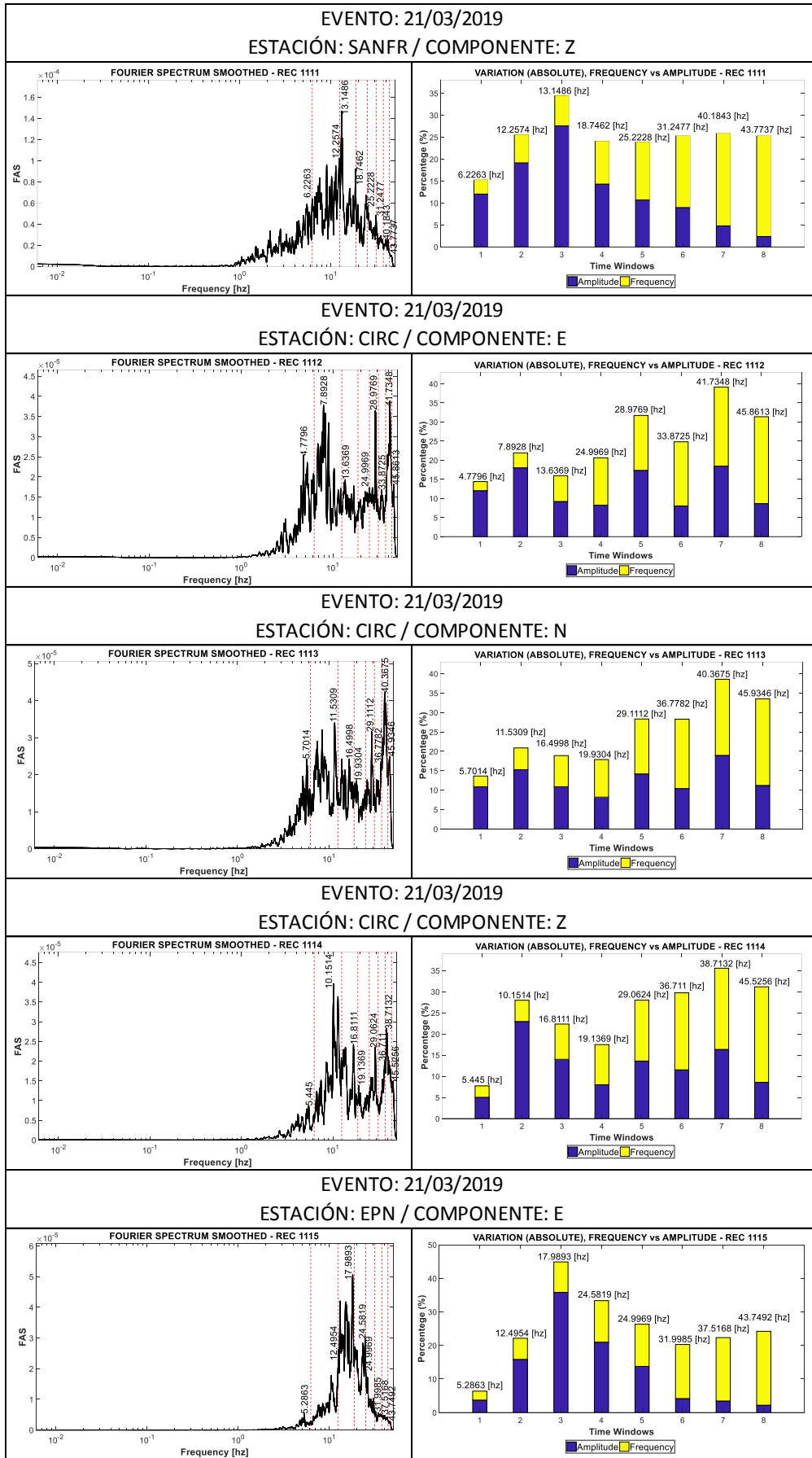
Anexo 6-20: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1096-1100. (Elaboración propia)



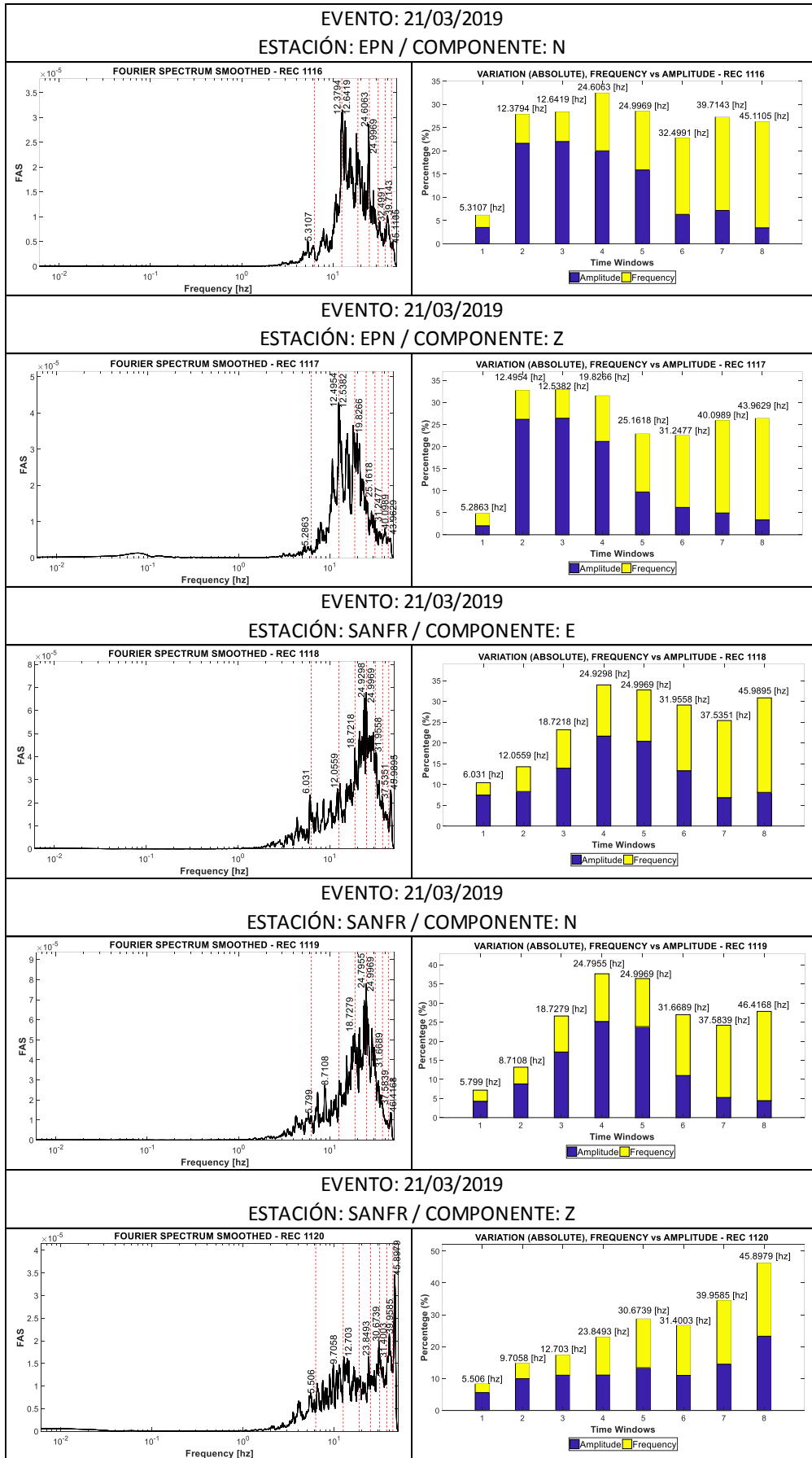
Anexo 6-21: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1101-1105. (Elaboración propia)



Anexo 6-22: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1106-1110. (Elaboración propia)

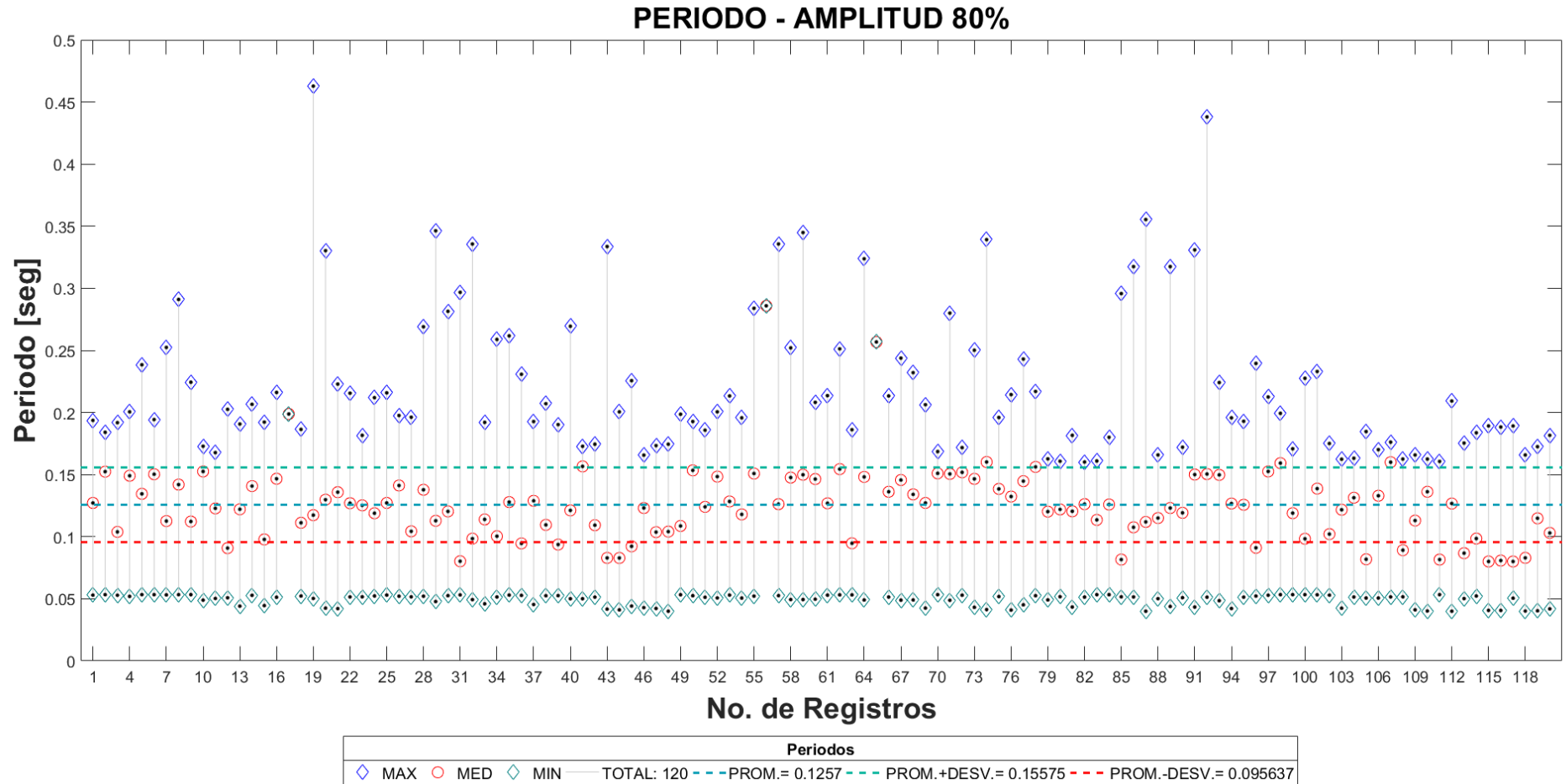


Anexo 6-23: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1111-1116. (Elaboración propia)



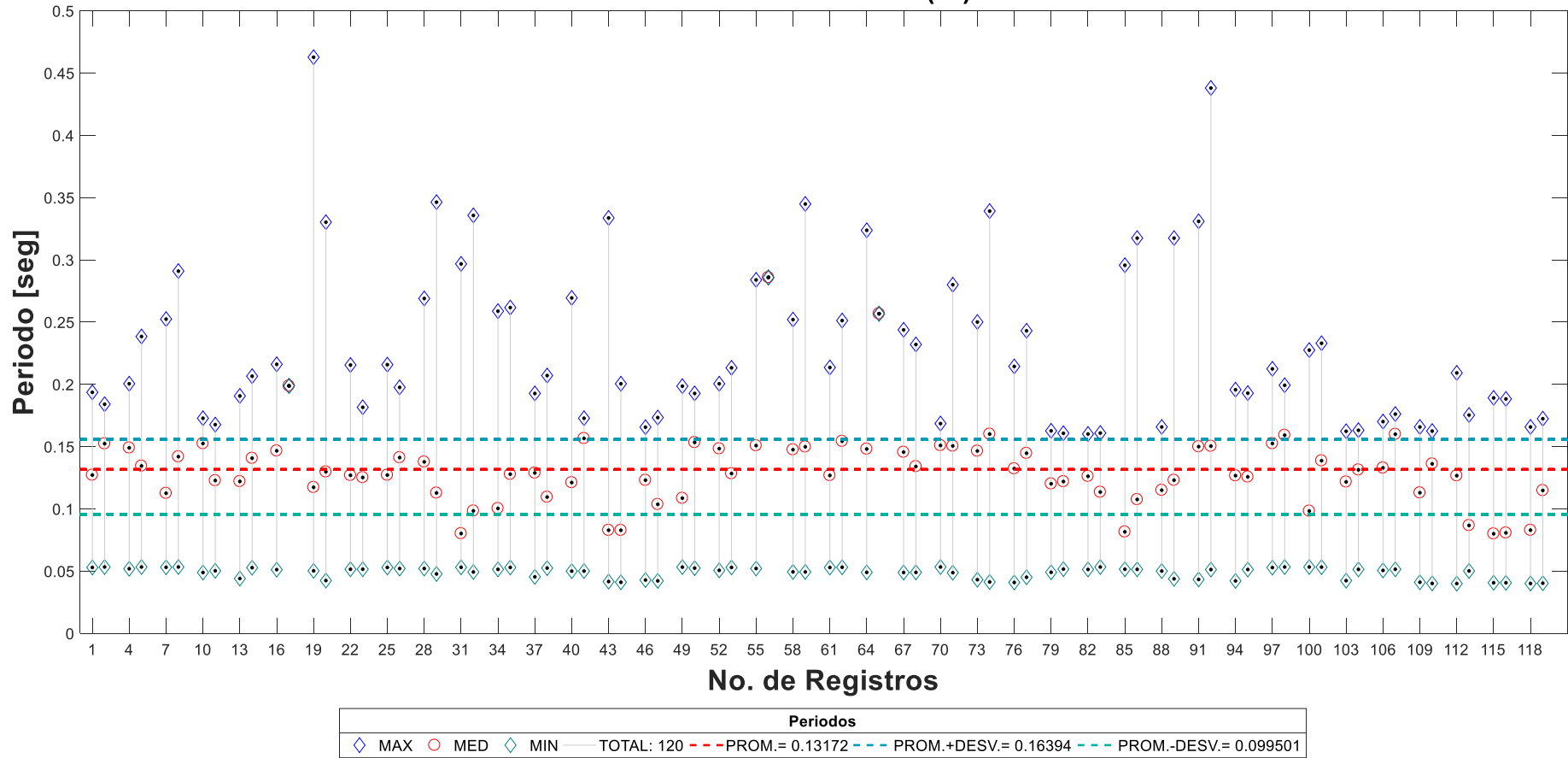
Anexo 6-24: Espectro de Fourier, Variación absoluta frecuencia vs amplitud Reg. 1116-1120. (Elaboración propia)

6.7 Periodos de la base de datos



Anexo 7-1: Periodos predominantes de la base de datos. (Elaboración propia)

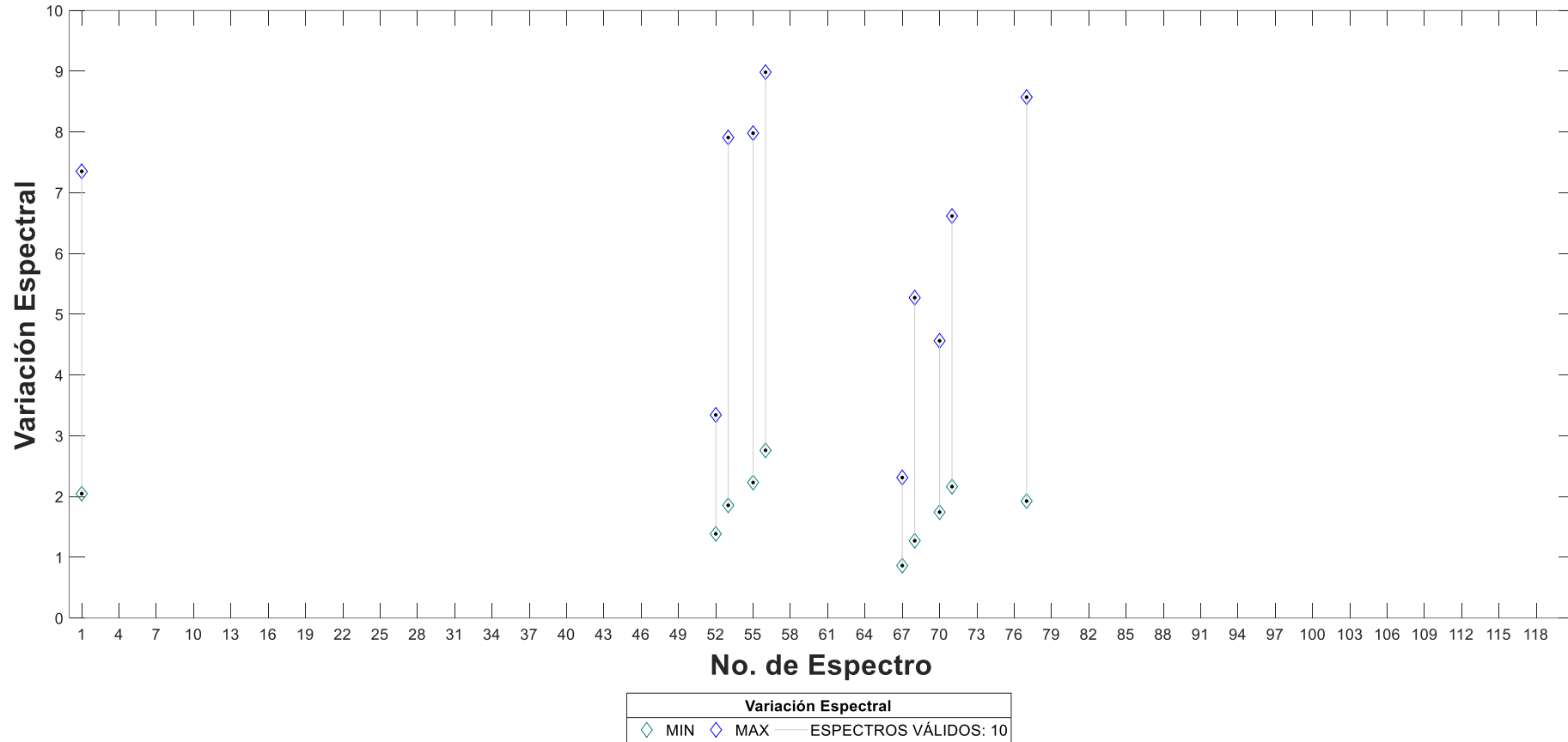
PERIODO - AMPLITUD (-Z) 80%



Anexo 7-2: Periodos predominantes de la base de datos (-Z). (Elaboración propia)

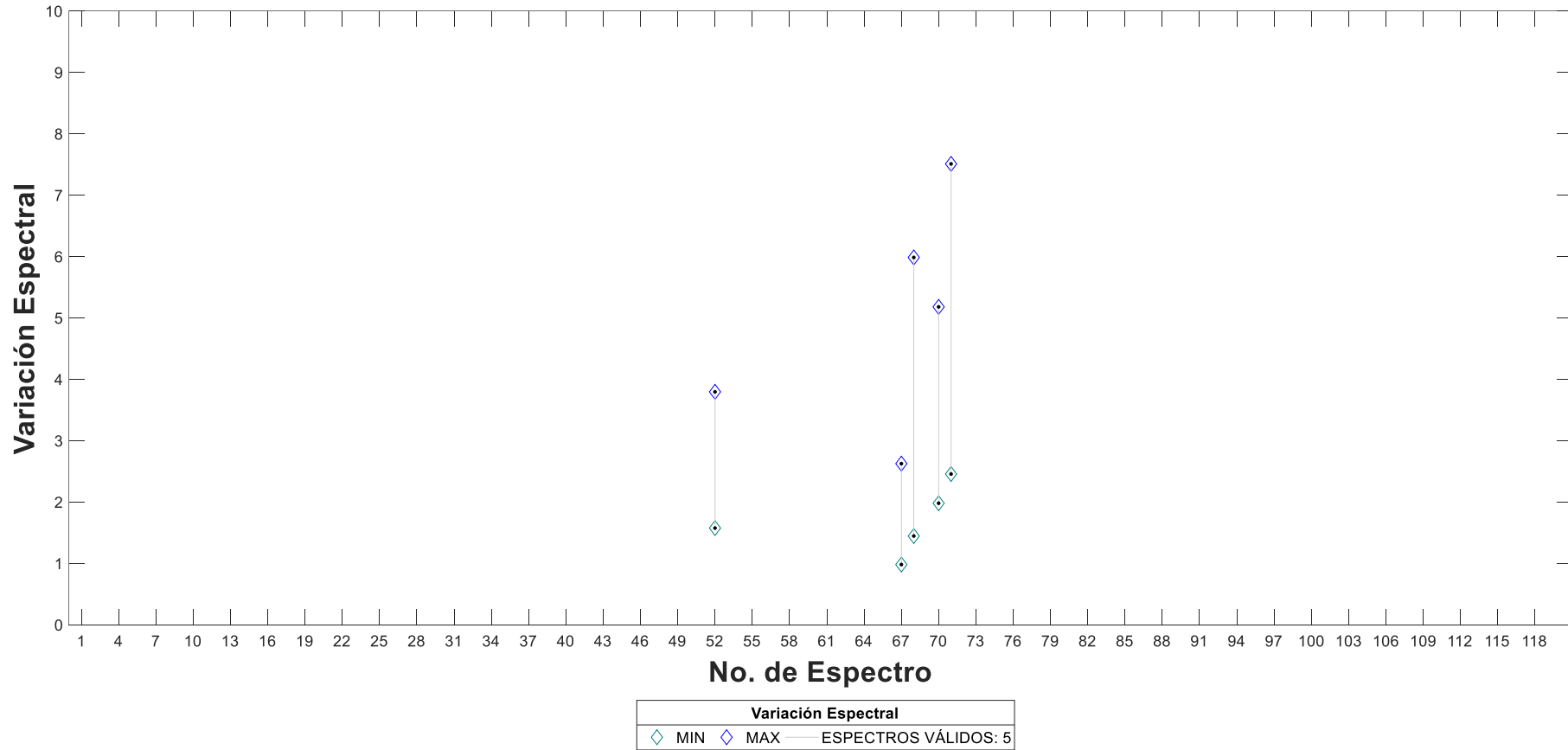
6.8 Variación espectral de registros reales válidos

REGISTROS CON VARIACIÓN ESPECTRAL ENTRE 1-7 (meseta) ( $T_r = 25$  AÑOS)



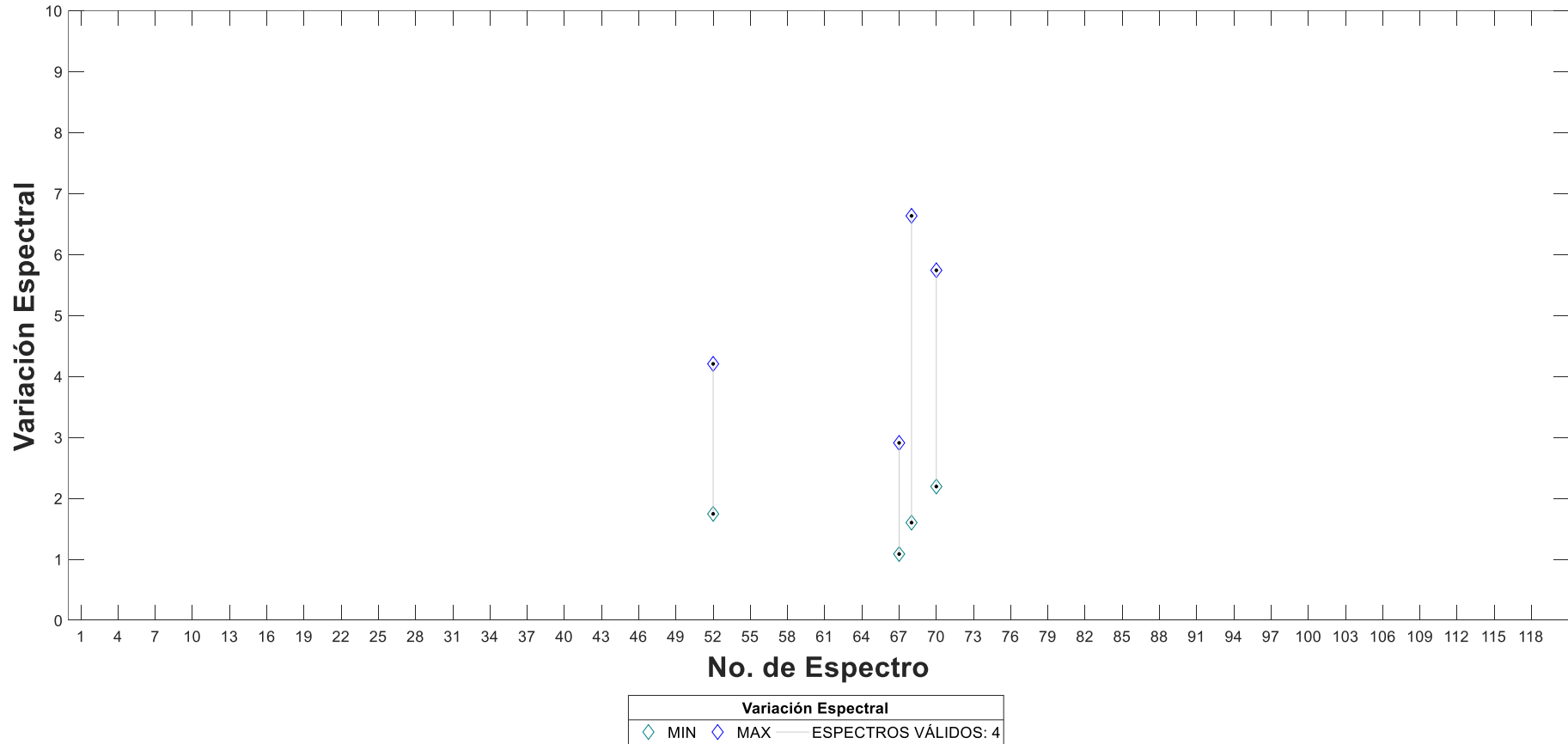
Anexo 8-1: Variación espectral para Periodo de Retorno de 25 años. (Elaboración propia)

REGISTROS CON VARIACIÓN ESPECTRAL ENTRE 1-7 (meseta) ( $T_r = 35$  AÑOS)



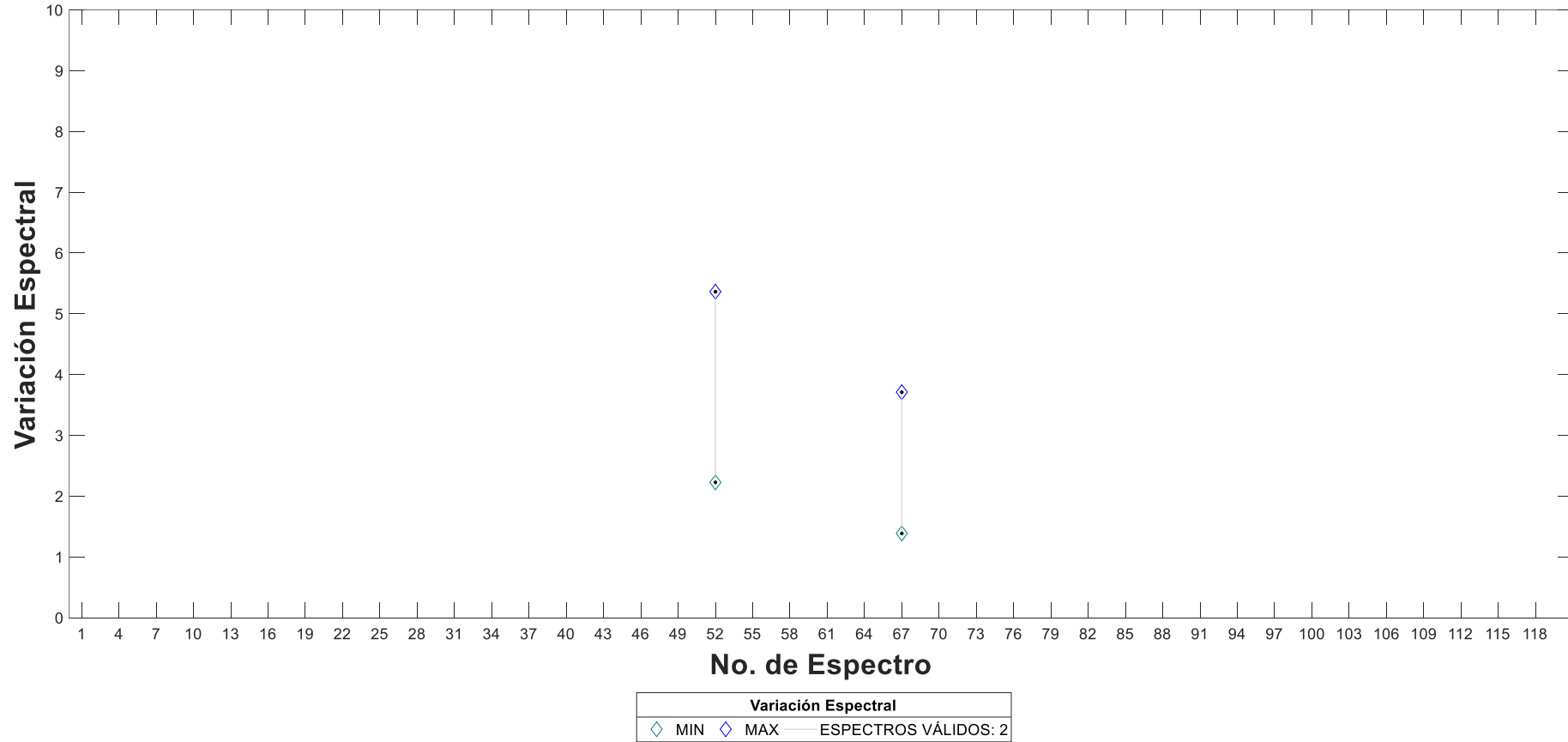
Anexo 8-2: Variación espectral para Periodo de Retorno de 35 años. (Elaboración propia)

REGISTROS CON VARIACIÓN ESPECTRAL ENTRE 1-7 (meseta) ( $T_r = 50$  AÑOS)



Anexo 8-3: Variación espectral para Periodo de Retorno de 50 años. (Elaboración propia)

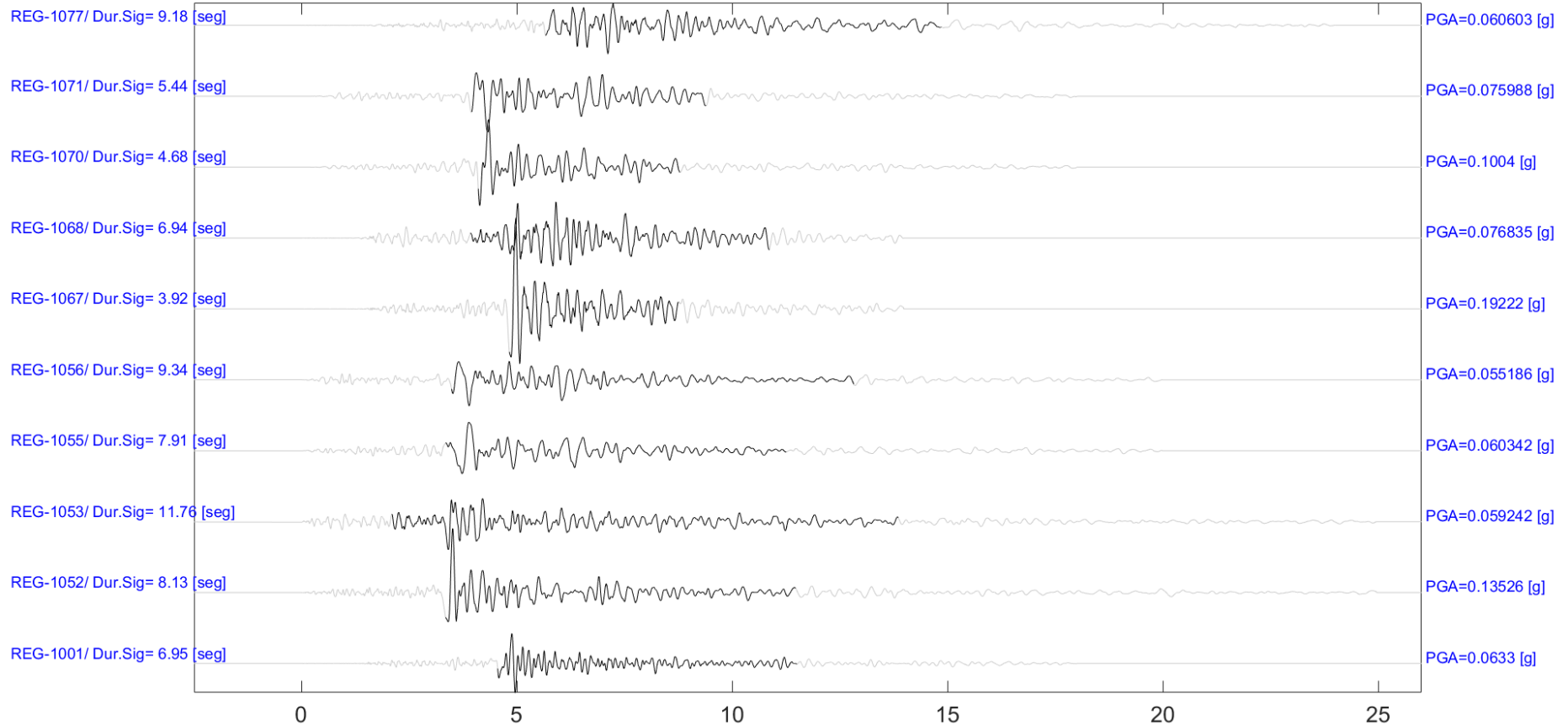
REGISTROS CON VARIACIÓN ESPECTRAL ENTRE 1-7 (meseta) ( $T_r = 75$  AÑOS)



Anexo 8-4: Variación espectral para Periodo de Retorno de 75 años. (Elaboración propia)

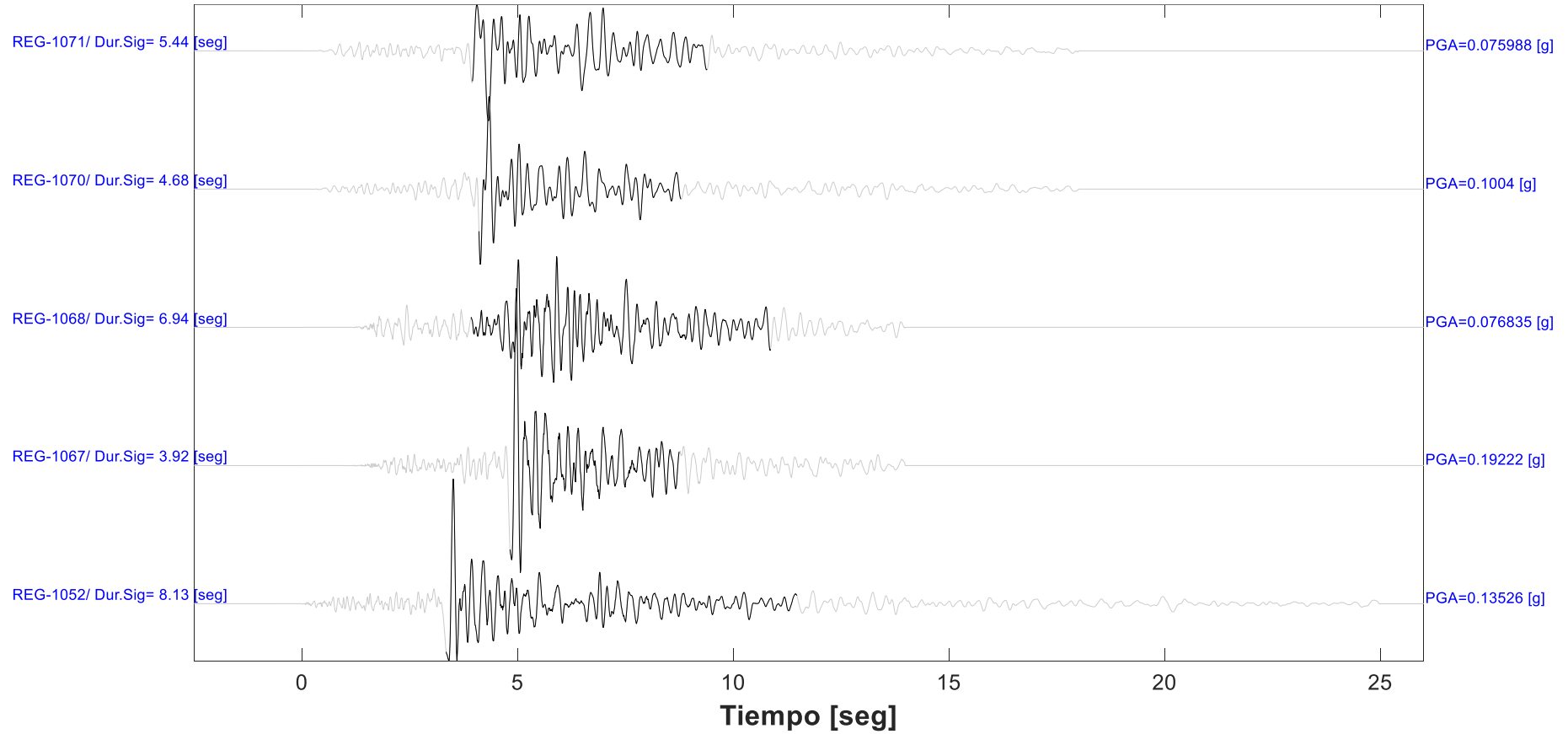
6.9 Registros reales válidos para generación de acelerogramas sintéticos

10 REGISTROS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)



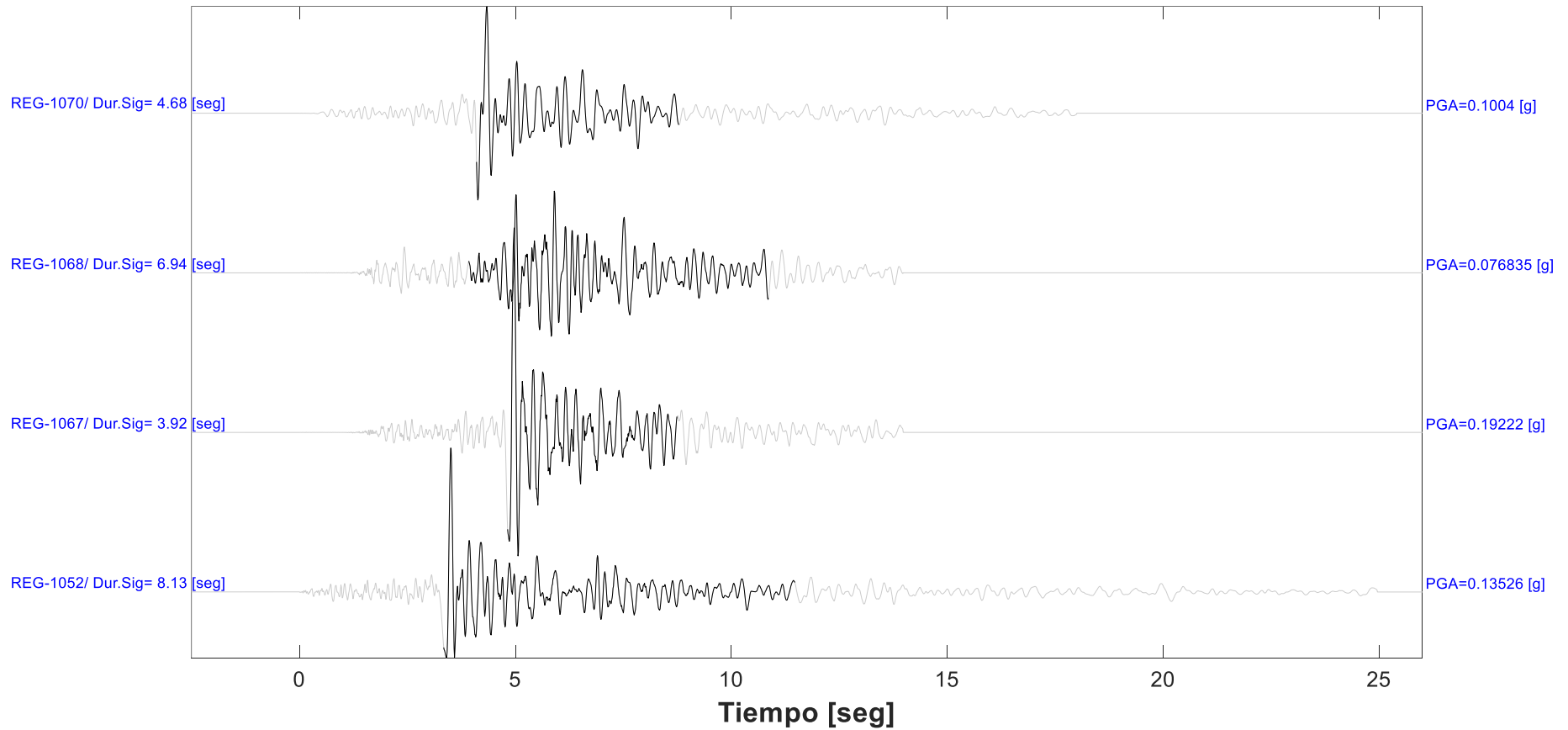
Anexo 9-1: Registros válidos para Periodo de Retorno de 25 años. (Elaboración propia)

5 REGISTROS VÁLIDOS ( $T_r = 35$  AÑOS)



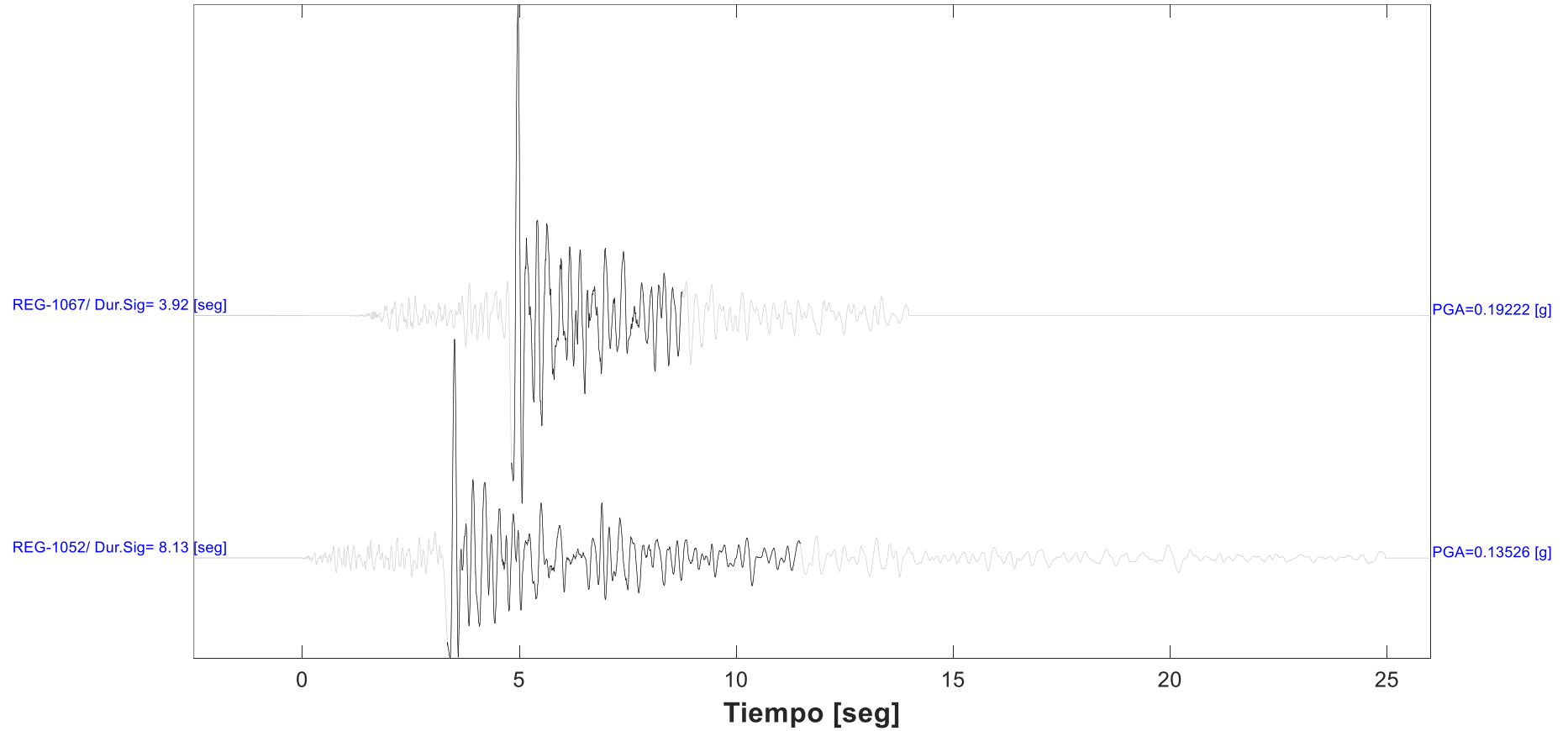
Anexo 9-2: Registros válidos para Periodo de Retorno de 35 años. (Elaboración propia)

4 REGISTROS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)



Anexo 9-3: Registros válidos para Periodo de Retorno de 50 años. (Elaboración propia)

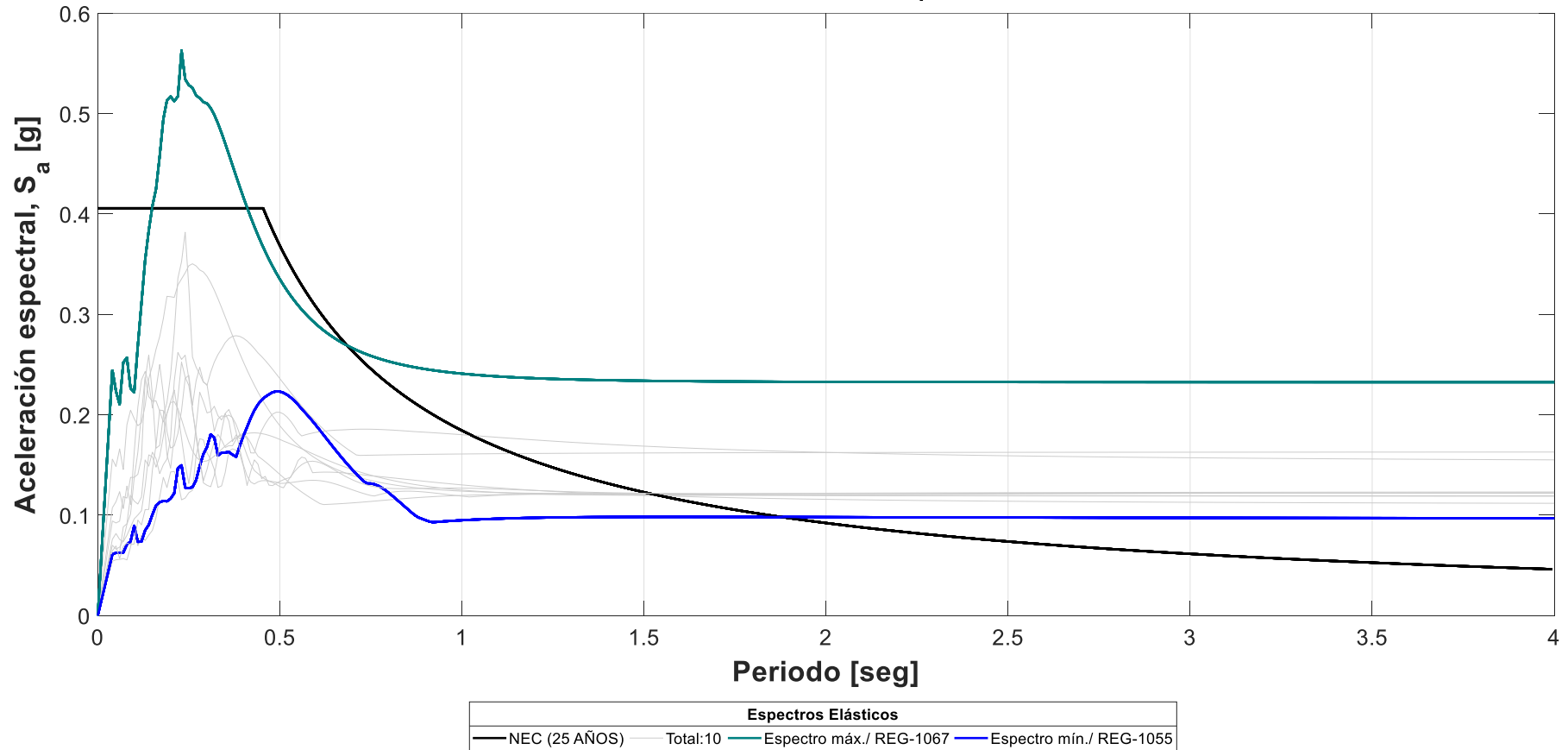
2 REGISTROS VÁLIDOS ( $T_r = 75$  AÑOS)



Anexo 9-4: Registros válidos para Periodo de Retorno de 75 años. (Elaboración propia)

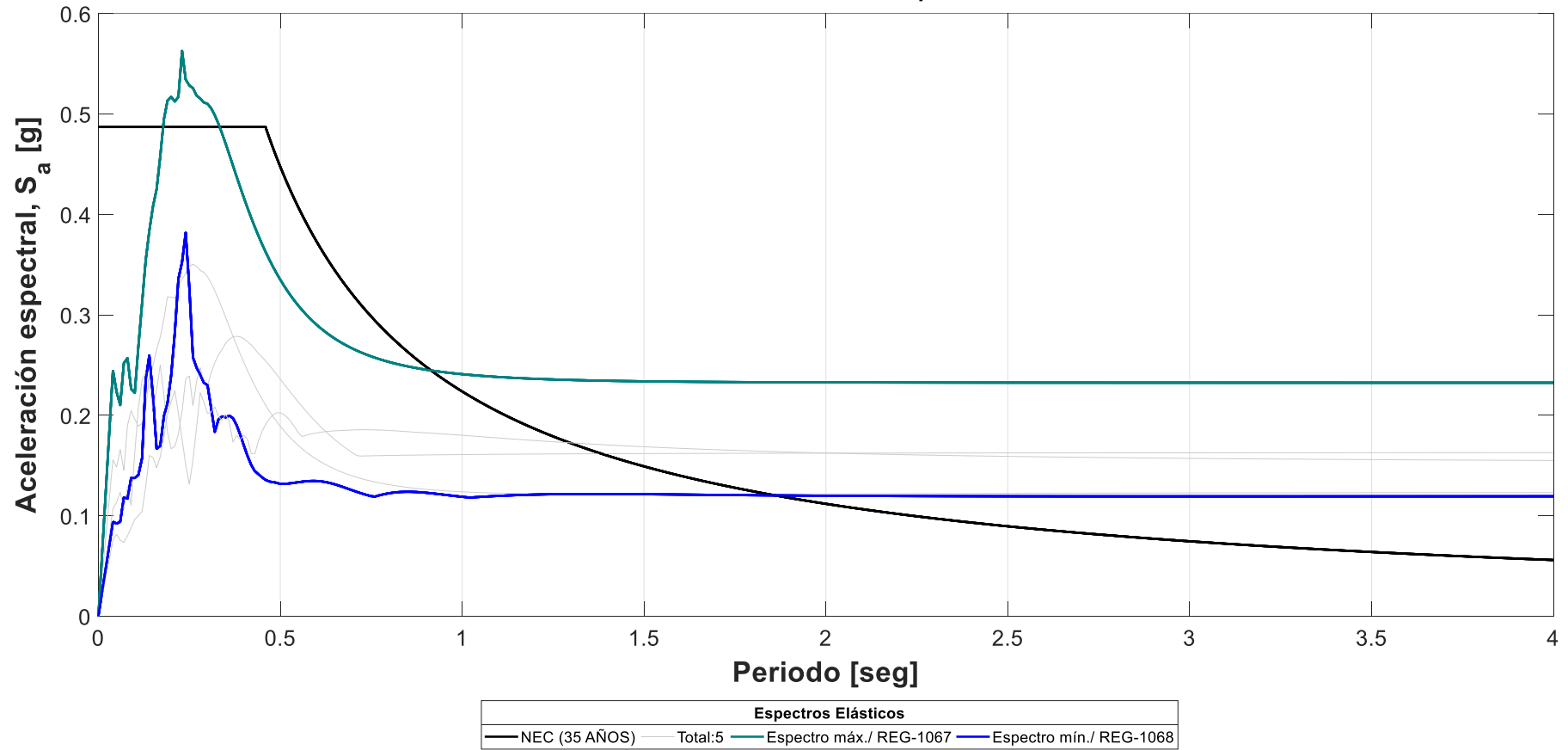
6.10 Espectros de respuesta de registros válidos para generación de acelerogramas sintéticos

**ESPECTROS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)**



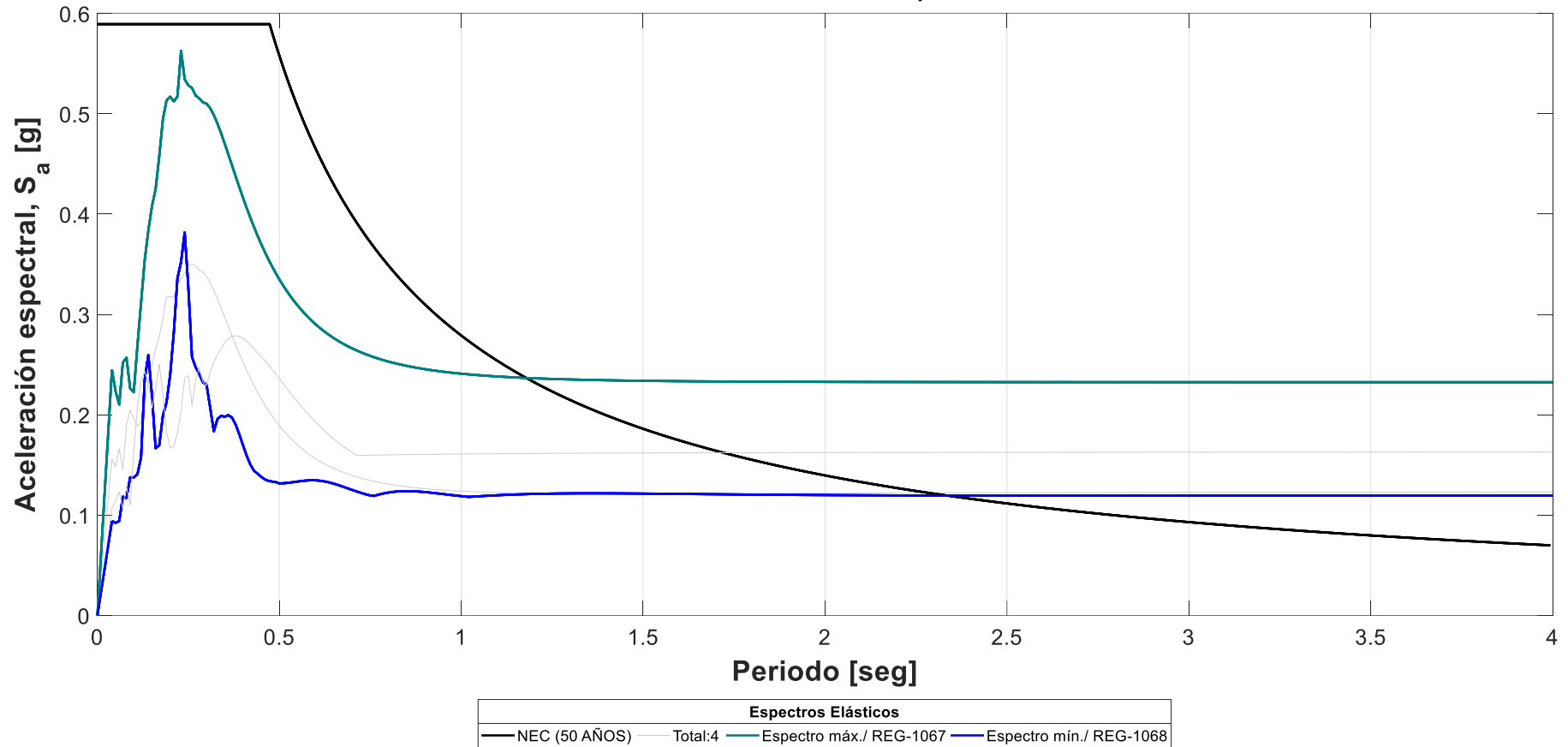
Anexo 10-1: Espectros válidos vs Espectro de diseño elástico NEC para Periodo de Retorno de 25 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS VÁLIDOS ( $T_r = 35$  AÑOS)



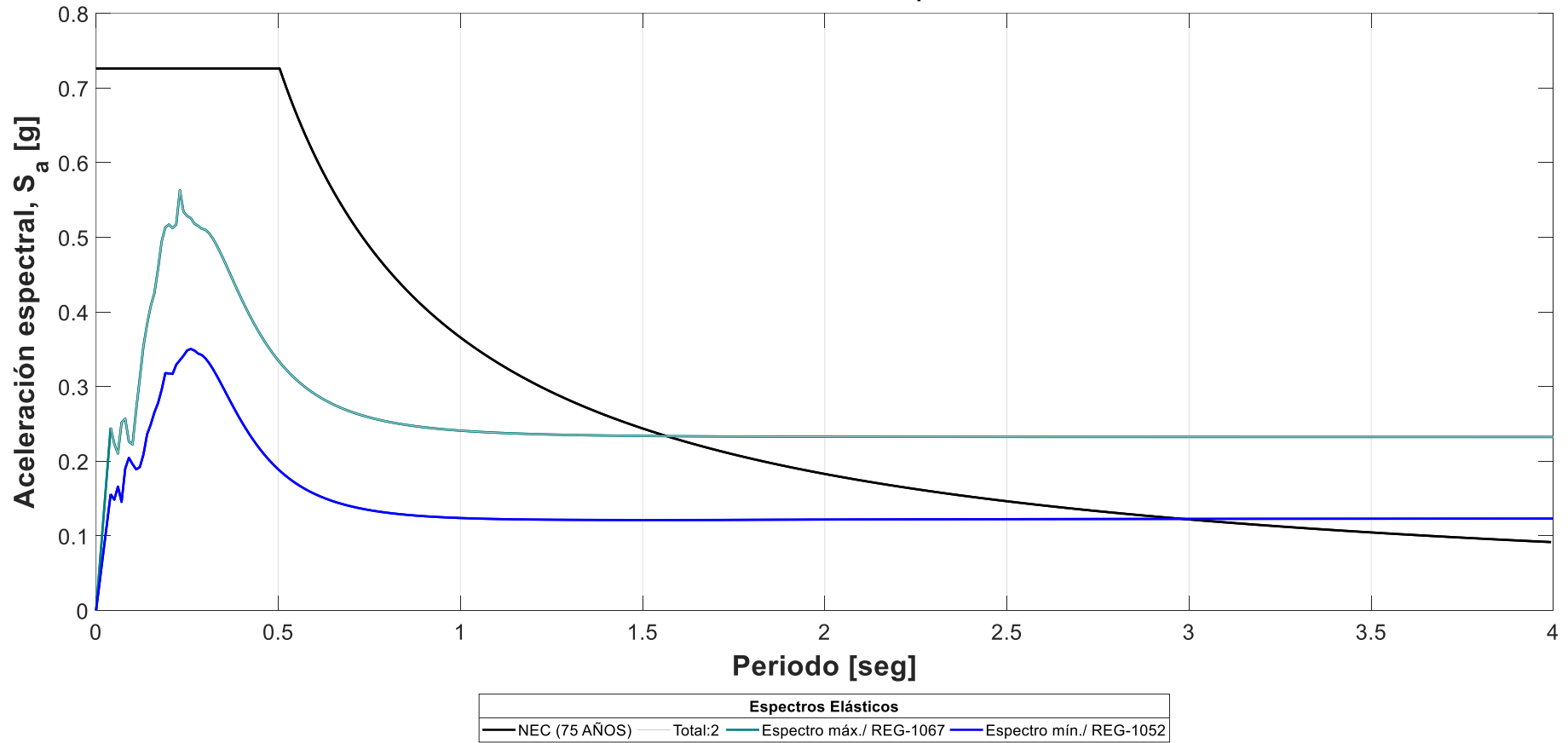
Anexo 10-2: Espectros válidos vs Espectro de diseño elástico NEC para Periodo de Retorno de 35 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)



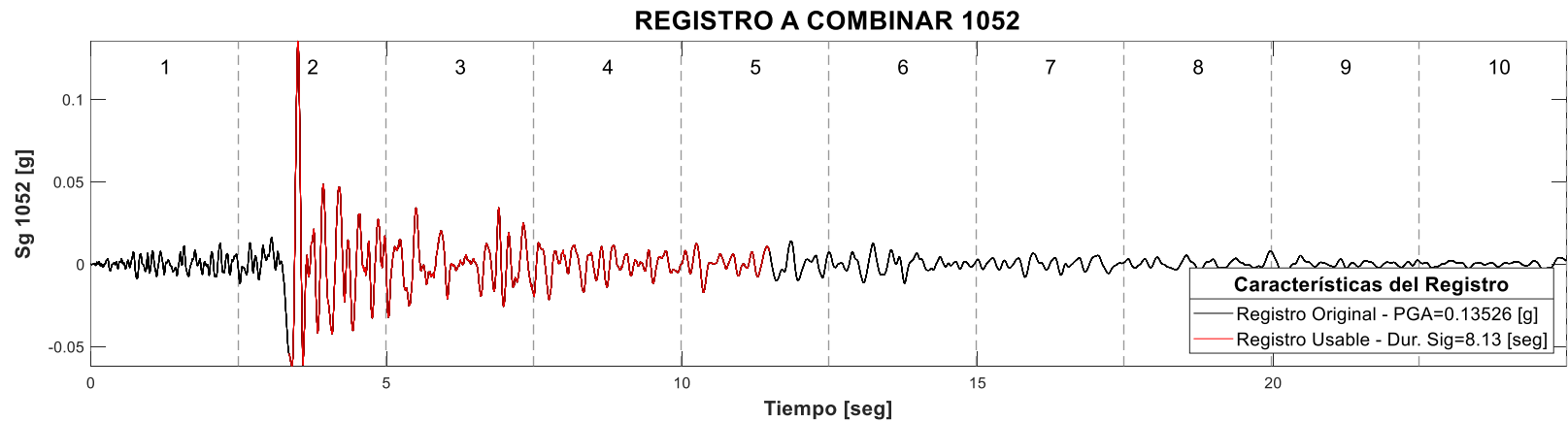
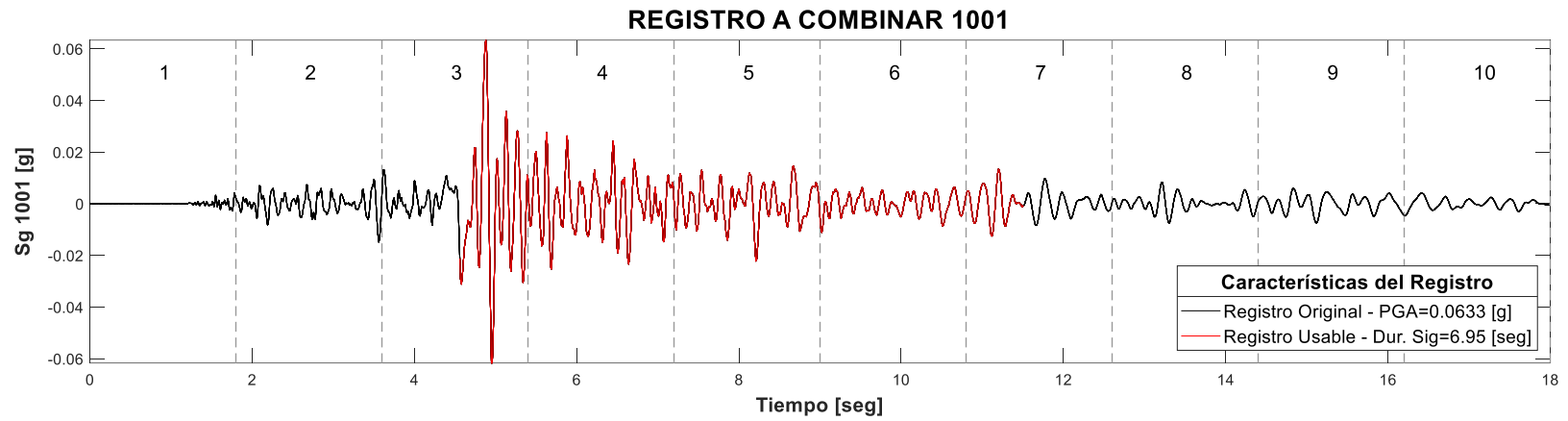
Anexo 10-3: Espectros válidos vs Espectro de diseño elástico NEC para Periodo de Retorno de 50 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS VÁLIDOS ( $T_r = 75$  AÑOS)

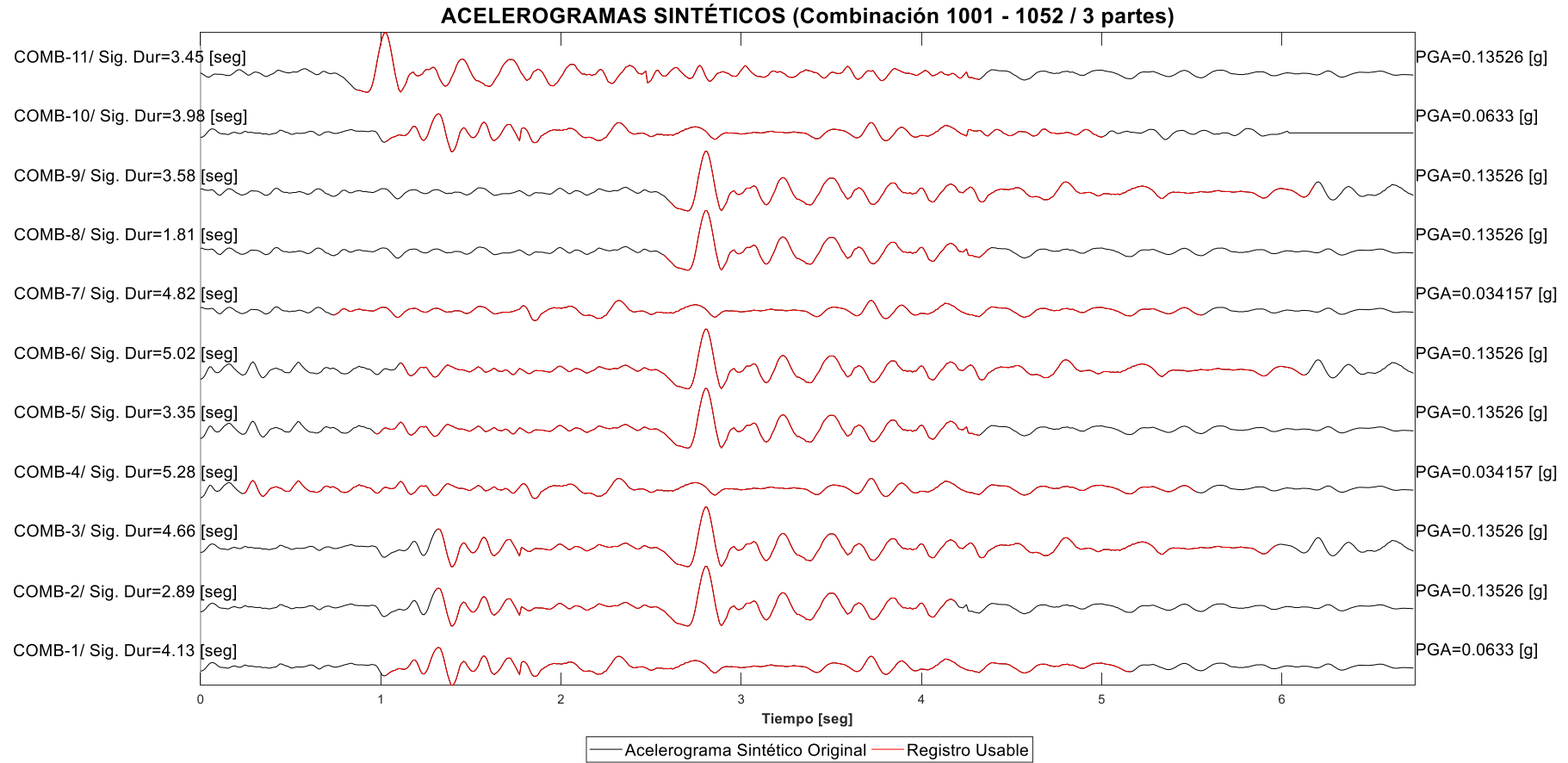


Anexo 10-4: Espectros válidos vs Espectro de diseño elástico NEC para Periodo de Retorno de 75 años. (Elaboración propia)

6.11 Acelerogramas sintéticos

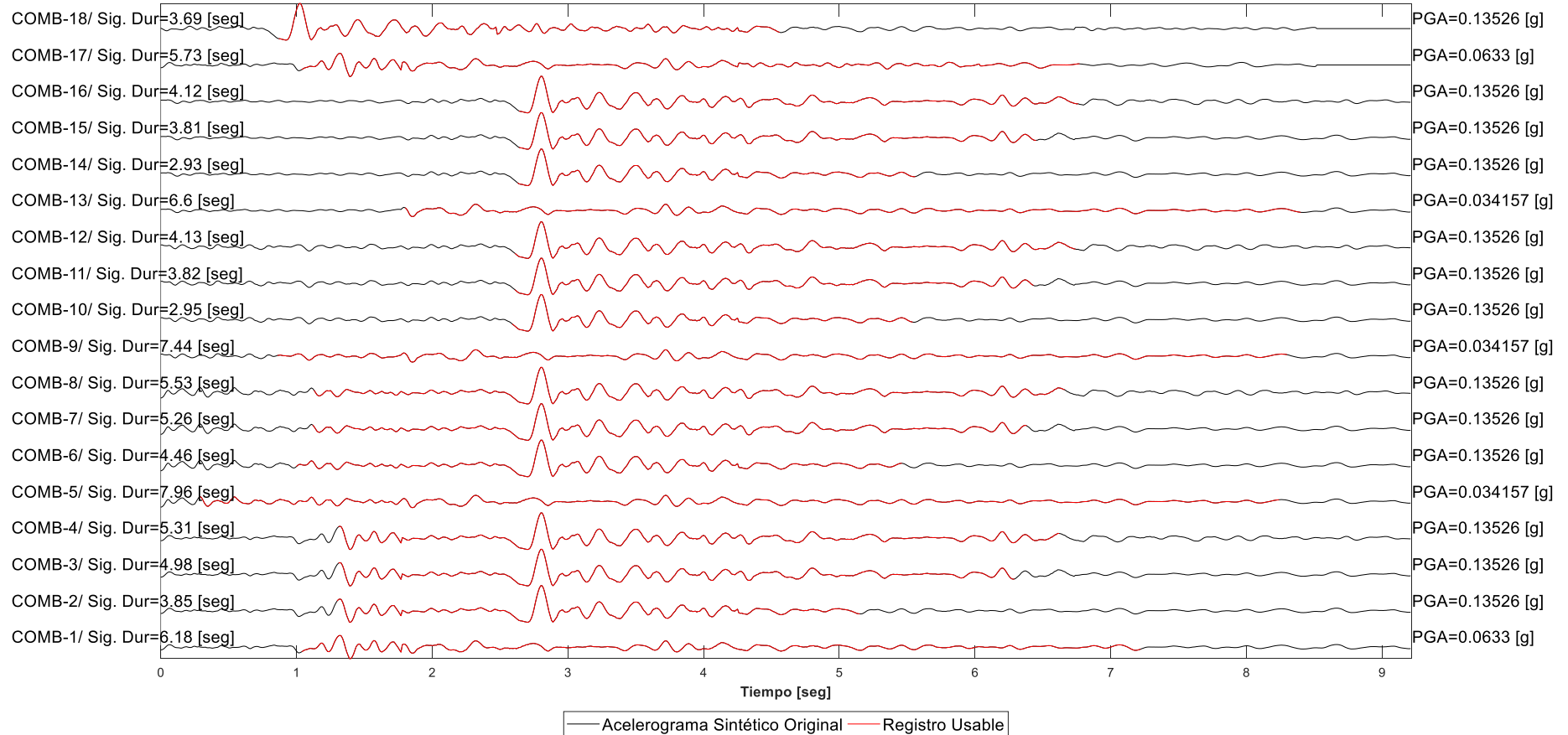


Anexo 11-1: Registros originales a combinar [divido en 10 partes iguales] para la generación de acelerogramas sintéticos. (Elaboración propia)



Anexo 11-2: Acelerogramas sintéticos a partir 3 partes de los registros originales 1001 y 1052. (Elaboración propia).

## ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (Combinación 1001 - 1052 / 4 partes)



Anexo 11-3: Acelerogramas sintéticos a partir 4 partes de los registros originales 1001 y 1052. (Elaboración propia).

COMBINACIÓN 1001-1052																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-1	Comb-2	Comb-3	Comb-4	Comb-5	Comb-6	Comb-7	Comb-8	Comb-9	Comb-10 Comb-11									
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1052	3	2							
Partes de Sg 1052	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1052 / 1001	3	4							
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1001 / 1052	5	4							
	Comb-12	Comb-13	Comb-14	Comb-15	Comb-16	Comb-17	Comb-18	Comb-19	Comb-20	Comb-21	Comb-22	Comb-23	Comb-24	Comb-25	Comb-26	Comb-27	Comb-28 Comb-29		
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	Partes de Sg 1001 / 1052	3	2
Partes de Sg 1052	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	Partes de Sg 1052 / 1001	3	4
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	Partes de Sg 1001 / 1052	5	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	Partes de Sg 1052 / 1001	5	6
COMBINACIÓN 1001-1053																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-30	Comb-31	Comb-32	Comb-33	Comb-34	Comb-35	Comb-36	Comb-37	Comb-38	Comb-39 Comb-40									
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1053	3	2							
Partes de Sg 1053	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1053 / 1001	3	4							
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1001 / 1053	5	4							
	Comb-41	Comb-42	Comb-43	Comb-44	Comb-45	Comb-46	Comb-47	Comb-48	Comb-49	Comb-50	Comb-51	Comb-52	Comb-53	Comb-54	Comb-55	Comb-56	Comb-57 Comb-58		
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	Partes de Sg 1001 / 1053	3	2
Partes de Sg 1053	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	Partes de Sg 1053 / 1001	3	4
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	Partes de Sg 1001 / 1053	5	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	Partes de Sg 1053 / 1001	5	6
COMBINACIÓN 1001-1055																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-59	Comb-60	Comb-61	Comb-62	Comb-63	Comb-64	Comb-65	Comb-66	Comb-67	Comb-68 Comb-69									
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1055	3	2							
Partes de Sg 1055	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1055 / 1001	3	4							
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1001 / 1055	5	4							
	Comb-70	Comb-71	Comb-72	Comb-73	Comb-74	Comb-75	Comb-76	Comb-77	Comb-78	Comb-79	Comb-80	Comb-81	Comb-82	Comb-83	Comb-84	Comb-85	Comb-86 Comb-87		
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	Partes de Sg 1001 / 1055	3	2
Partes de Sg 1055	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	Partes de Sg 1055 / 1001	3	4
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	Partes de Sg 1001 / 1055	5	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	Partes de Sg 1055 / 1001	5	6

Anexo 11-4: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [1-87].  
(Elaboración propia)

COMBINACIÓN 1001-1056													
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO													
			Comb-88 Comb-89 Comb-90 Comb-91 Comb-92 Comb-93 Comb-94 Comb-95 Comb-96							Comb-97 Comb-98			
Partes de Sg 1001			3 3 3 4 4 4 5 5 5							Partes de Sg 1001 / 1056			3 2
Partes de Sg 1056			3 2 2 3 2 2 3 2 2 4 4 3 4 4 3 4 4 3							Partes de Sg 1056 / 1001			3 4
									Partes de Sg 1001 / 1052			5 4	
			Comb-99 Comb-100 Comb-101 Comb-102 Comb-103 Comb-104 Comb-105 Comb-106 Comb-107 Comb-108 Comb-109 Comb-110 Comb-111 Comb-112 Comb-113 Comb-114							Comb-115 Comb-116			
Partes de Sg 1001			3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 5 6 6 6 6							Partes de Sg 1001 / 1056			3 2
Partes de Sg 1056			3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 5 5 5 4 5 5 5 4 5 5 5 4 5 5 5 4							Partes de Sg 1056 / 1001			3 4
									Partes de Sg 1001 / 1056			5 4	
									Partes de Sg 1056 / 1001			5 6	
COMBINACIÓN 1001-1067													
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO													
			Comb-117 Comb-118 Comb-119 Comb-120 Comb-121 Comb-122 Comb-123 Comb-124 Comb-125							Comb-126 Comb-127			
Partes de Sg 1001			3 3 3 4 4 4 5 5 5							Partes de Sg 1001 / 1067			3 4
Partes de Sg 1067			5 4 4 5 4 4 5 4 4 6 6 5 6 6 5 6 6 5							Partes de Sg 1067 / 1001			5 4
									Partes de Sg 1001 / 1067			5 6	
			Comb-128 Comb-129 Comb-130 Comb-131 Comb-132 Comb-133 Comb-134 Comb-135 Comb-136 Comb-137 Comb-138 Comb-139 Comb-140 Comb-141 Comb-142 Comb-143							Comb-144 Comb-145			
Partes de Sg 1001			3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 6 6 6 6							Partes de Sg 1001 / 1067			3 4
Partes de Sg 1067			5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 5 4 4 4 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 6 7 7 7 6							Partes de Sg 1067 / 1001			5 4
									Partes de Sg 1001 / 1067			5 6	
									Partes de Sg 1067 / 1001			7 6	
COMBINACIÓN 1001-1068													
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO													
			Comb-146 Comb-147 Comb-148 Comb-149 Comb-150 Comb-151 Comb-152 Comb-153 Comb-154							Comb-155 Comb-156			
Partes de Sg 1001			3 3 3 4 4 4 5 5 5							Partes de Sg 1001 / 1068			3 4
Partes de Sg 1068			5 4 4 5 4 4 5 4 4 6 6 5 6 6 5 6 6 5							Partes de Sg 1068 / 1001			5 4
									Partes de Sg 1001 / 1068			5 6	
			Comb-157 Comb-158 Comb-159 Comb-160 Comb-161 Comb-162 Comb-163 Comb-164 Comb-165 Comb-166 Comb-167 Comb-168 Comb-169 Comb-170 Comb-171 Comb-172							Comb-173 Comb-174			
Partes de Sg 1001			3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 6 6 6 6							Partes de Sg 1001 / 1068			3 4
Partes de Sg 1068			5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 5 4 4 4 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 6 7 7 7 6							Partes de Sg 1068 / 1001			5 4
									Partes de Sg 1001 / 1068			5 6	
									Partes de Sg 1068 / 1001			7 6	

Anexo 11-5: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [88-174].  
(Elaboración propia)

COMBINACIÓN 1001-1070												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-175	Comb-176	Comb-177	Comb-178	Comb-179	Comb-180	Comb-181	Comb-182	Comb-183		Comb-184	Comb-185
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1070	3	3
Partes de Sg 1070	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1070 / 1001	4	4
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1001 / 1070	5	5
	Comb-186	Comb-187	Comb-188	Comb-189	Comb-190	Comb-191	Comb-192	Comb-193	Comb-194		Comb-202	Comb-203
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1070	3	3
Partes de Sg 1070	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1070 / 1001	4	4
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1070	5	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	Partes de Sg 1070 / 1001	6	6
	6	6	5	6	6	6	5	6	6			
	Comb-195	Comb-196	Comb-197	Comb-198	Comb-199	Comb-200	Comb-201					

COMBINACIÓN 1001-1071												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-204	Comb-205	Comb-206	Comb-207	Comb-208	Comb-209	Comb-210	Comb-211	Comb-212		Comb-213	Comb-214
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1071	3	3
Partes de Sg 1071	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1071 / 1001	4	4
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1001 / 1071	5	5
	Comb-215	Comb-216	Comb-217	Comb-218	Comb-219	Comb-220	Comb-221	Comb-222	Comb-223		Comb-231	Comb-232
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1071	3	3
Partes de Sg 1071	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1071 / 1001	4	4
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1071	5	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	Partes de Sg 1071 / 1001	6	6
	6	6	5	6	6	6	5	6	6			
	Comb-224	Comb-225	Comb-226	Comb-227	Comb-228	Comb-229	Comb-230					

COMBINACIÓN 1001-1077												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-233	Comb-234	Comb-235	Comb-236	Comb-237	Comb-238	Comb-239	Comb-240	Comb-241		Comb-242	Comb-243
Partes de Sg 1001	3	3	3	4	4	4	5	5	5	Partes de Sg 1001 / 1077	3	3
Partes de Sg 1077	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1077 / 1001	4	4
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1001 / 1077	5	5
	Comb-244	Comb-245	Comb-246	Comb-247	Comb-248	Comb-249	Comb-250	Comb-251	Comb-252		Comb-260	Comb-261
Partes de Sg 1001	3	3	3	3	4	4	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1077	3	3
Partes de Sg 1077	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1077 / 1001	4	4
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1001 / 1077	5	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	Partes de Sg 1077 / 1001	6	6
	6	6	5	6	6	6	5	6	6			
	Comb-253	Comb-254	Comb-255	Comb-256	Comb-257	Comb-258	Comb-259					

Anexo 11-6: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [175-261].  
(Elaboración propia)

COMBINACIÓN 1052-1053												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-262	Comb-263	Comb-264	Comb-265	Comb-266	Comb-267	Comb-268	Comb-269	Comb-270		Comb-271	Comb-272
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	Partes de Sg 1052 / 1053	2	2
Partes de Sg 1053	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1053 / 1052	3	3
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1052 / 1053	4	4
	Comb-273	Comb-274	Comb-275	Comb-276	Comb-277	Comb-278	Comb-279	Comb-280	Comb-281		Comb-289	Comb-290
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1053	2	2
Partes de Sg 1053	3	2	2	2	3	2	2	2	3	Partes de Sg 1053 / 1052	3	3
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1053	4	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	Partes de Sg 1053 / 1052	5	5
	5	5	4	5	5	5	4	5	5			
	Comb-282	Comb-283	Comb-284	Comb-285	Comb-286	Comb-287	Comb-288					
	Comb-291	Comb-292	Comb-293	Comb-294	Comb-295	Comb-296	Comb-297	Comb-298	Comb-299		Comb-300	Comb-301
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	Partes de Sg 1052 / 1055	2	2
Partes de Sg 1055	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1055 / 1052	3	3
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1052 / 1055	4	4
	Comb-302	Comb-303	Comb-304	Comb-305	Comb-306	Comb-307	Comb-308	Comb-309	Comb-310		Comb-318	Comb-319
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1055	2	2
Partes de Sg 1055	3	2	2	2	3	2	2	2	3	Partes de Sg 1055 / 1052	3	3
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1055	4	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	Partes de Sg 1055 / 1052	5	5
	5	5	4	5	5	5	4	5	5			
	Comb-311	Comb-312	Comb-313	Comb-314	Comb-315	Comb-316	Comb-317					
	Comb-320	Comb-321	Comb-322	Comb-323	Comb-324	Comb-325	Comb-326	Comb-327	Comb-328		Comb-329	Comb-330
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	Partes de Sg 1052 / 1056	2	2
Partes de Sg 1056	3	2	2	3	2	2	3	2	2	Partes de Sg 1056 / 1052	3	3
	4	4	3	4	4	3	4	4	3	Partes de Sg 1052 / 1056	4	4
	Comb-331	Comb-332	Comb-333	Comb-334	Comb-335	Comb-336	Comb-337	Comb-338	Comb-339		Comb-347	Comb-348
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1056	2	2
Partes de Sg 1056	3	2	2	2	3	2	2	2	3	Partes de Sg 1056 / 1052	3	3
	4	4	3	3	4	4	3	3	4	Partes de Sg 1052 / 1056	4	4
	5	5	5	4	5	5	5	4	5	Partes de Sg 1056 / 1052	5	5
	5	5	4	5	5	5	4	5	5			
	Comb-340	Comb-341	Comb-342	Comb-343	Comb-344	Comb-345	Comb-346					

Anexo 11-7: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [262-348].  
(Elaboración propia)

COMBINACIÓN 1052-1067										
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO										
	Comb-349								Comb-358	
	Comb-350								Comb-359	
	Comb-351									
	Comb-352									
	Comb-353									
	Comb-354									
	Comb-355									
	Comb-356									
	Comb-357									
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	
Partes de Sg 1067	5	4	4	5	4	4	5	4	4	
	6	6	5	6	6	5	6	6	5	
	Comb-360								Comb-376	
	Comb-361								Comb-377	
	Comb-362									
	Comb-363									
	Comb-364									
	Comb-365									
	Comb-366									
	Comb-367									
	Comb-368									
	Comb-369									
	Comb-370									
	Comb-371									
	Comb-372									
	Comb-373									
	Comb-374									
	Comb-375									
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	
Partes de Sg 1067	5	4	4	4	5	4	4	4	4	
	6	6	5	5	6	6	5	5	6	
	7	7	7	6	7	7	6	7	7	
Partes de Sg 1052 / 1067	2	4							2	4
Partes de Sg 1067 / 1052	5	3							5	3
Partes de Sg 1052 / 1067	4	6							4	6
Partes de Sg 1067 / 1052	7	5							7	5
COMBINACIÓN 1052-1068										
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO										
	Comb-378								Comb-387	
	Comb-379								Comb-388	
	Comb-380									
	Comb-381									
	Comb-382									
	Comb-383									
	Comb-384									
	Comb-385									
	Comb-386									
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	
Partes de Sg 1068	5	4	4	5	4	4	5	4	4	
	6	6	5	6	6	5	6	6	5	
	Comb-389								Comb-405	
	Comb-390								Comb-406	
	Comb-391									
	Comb-392									
	Comb-393									
	Comb-394									
	Comb-395									
	Comb-396									
	Comb-397									
	Comb-398									
	Comb-399									
	Comb-400									
	Comb-401									
	Comb-402									
	Comb-403									
	Comb-404									
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	
Partes de Sg 1068	5	4	4	4	5	4	4	4	4	
	6	6	5	5	6	6	5	5	6	
	7	7	7	6	7	7	6	7	7	
Partes de Sg 1052 / 1068	2	4							2	4
Partes de Sg 1068 / 1052	5	3							5	3
Partes de Sg 1052 / 1068	4	6							4	6
Partes de Sg 1068 / 1052	7	5							7	5
COMBINACIÓN 1052-1070										
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO										
	Comb-407								Comb-416	
	Comb-408								Comb-417	
	Comb-409									
	Comb-410									
	Comb-411									
	Comb-412									
	Comb-413									
	Comb-414									
	Comb-415									
Partes de Sg 1052	2	2	2	3	3	3	4	4	4	
Partes de Sg 1070	4	3	3	4	3	3	4	3	3	
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	
	Comb-418								Comb-434	
	Comb-419								Comb-435	
	Comb-420									
	Comb-421									
	Comb-422									
	Comb-423									
	Comb-424									
	Comb-425									
	Comb-426									
	Comb-427									
	Comb-428									
	Comb-429									
	Comb-430									
	Comb-431									
	Comb-432									
	Comb-433									
Partes de Sg 1052	2	2	2	2	3	3	3	3	4	
Partes de Sg 1070	4	3	3	3	4	3	3	3	3	
	5	5	4	4	5	5	4	4	4	
	6	6	6	5	6	6	5	6	5	
Partes de Sg 1052 / 1070	2	3							2	3
Partes de Sg 1070 / 1052	4	3							4	3
Partes de Sg 1052 / 1070	4	5							4	5
Partes de Sg 1070 / 1052	6	5							6	5

Anexo 11-8: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [349-435].  
(Elaboración propia)



COMBINACIÓN 1053-1056					
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO					
	Comb-523 Comb-524 Comb-525 Comb-526 Comb-527 Comb-528 Comb-529 Comb-530 Comb-531				Comb-532 Comb-533
Partes de Sg 1053	2 2 2 3 3 3 4 4 4		Partes de Sg 1053 / 1056	2 2	
Partes de Sg 1056	3 2 2 3 2 2 3 2 2		Partes de Sg 1056 / 1053	3 3	
	4 4 3 4 4 3 4 4 3		Partes de Sg 1053 / 1056	4 4	
	Comb-534 Comb-535 Comb-536 Comb-537 Comb-538 Comb-539 Comb-540 Comb-541 Comb-542 Comb-543 Comb-544 Comb-545 Comb-546 Comb-547 Comb-548 Comb-549				Comb-550 Comb-551
Partes de Sg 1053	2 2 2 2 3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 5		Partes de Sg 1053 / 1056	2 2	
Partes de Sg 1056	3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2		Partes de Sg 1056 / 1053	3 3	
	4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3		Partes de Sg 1053 / 1056	4 4	
	5 5 5 4 5 5 5 4 5 5 5 4 5 5 5 4		Partes de Sg 1056 / 1053	5 5	
COMBINACIÓN 1053-1067					
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO					
	Comb-552 Comb-553 Comb-554 Comb-555 Comb-556 Comb-557 Comb-558 Comb-559 Comb-560				Comb-561 Comb-562
Partes de Sg 1053	2 2 2 3 3 3 4 4 4		Partes de Sg 1053 / 1067	2 4	
Partes de Sg 1067	5 4 4 5 4 4 5 4 4		Partes de Sg 1067 / 1053	5 3	
	6 6 5 6 6 5 6 6 5		Partes de Sg 1053 / 1067	4 6	
	Comb-563 Comb-564 Comb-565 Comb-566 Comb-567 Comb-568 Comb-569 Comb-570 Comb-571 Comb-572 Comb-573 Comb-574 Comb-575 Comb-576 Comb-577 Comb-578				Comb-579 Comb-580
Partes de Sg 1053	2 2 2 2 3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 5		Partes de Sg 1053 / 1067	2 4	
Partes de Sg 1067	5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4		Partes de Sg 1067 / 1053	5 3	
	6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5		Partes de Sg 1053 / 1067	4 6	
	7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 6		Partes de Sg 1067 / 1053	7 5	
COMBINACIÓN 1053-1068					
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO					
	Comb-581 Comb-582 Comb-583 Comb-584 Comb-585 Comb-586 Comb-587 Comb-588 Comb-589				Comb-590 Comb-591
Partes de Sg 1053	2 2 2 3 3 3 4 4 4		Partes de Sg 1053 / 1068	2 4	
Partes de Sg 1068	5 4 4 5 4 4 5 4 4		Partes de Sg 1068 / 1053	5 3	
	6 6 5 6 6 5 6 6 5		Partes de Sg 1053 / 1068	4 6	
	Comb-592 Comb-593 Comb-594 Comb-595 Comb-596 Comb-597 Comb-598 Comb-599 Comb-600 Comb-601 Comb-602 Comb-603 Comb-604 Comb-605 Comb-606 Comb-607				Comb-608 Comb-609
Partes de Sg 1053	2 2 2 2 3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 5		Partes de Sg 1053 / 1068	2 4	
Partes de Sg 1068	5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4		Partes de Sg 1068 / 1053	5 3	
	6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5 5		Partes de Sg 1053 / 1068	4 6	
	7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 6		Partes de Sg 1068 / 1053	7 5	

Anexo 11-10: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [523-609].  
(Elaboración propia)











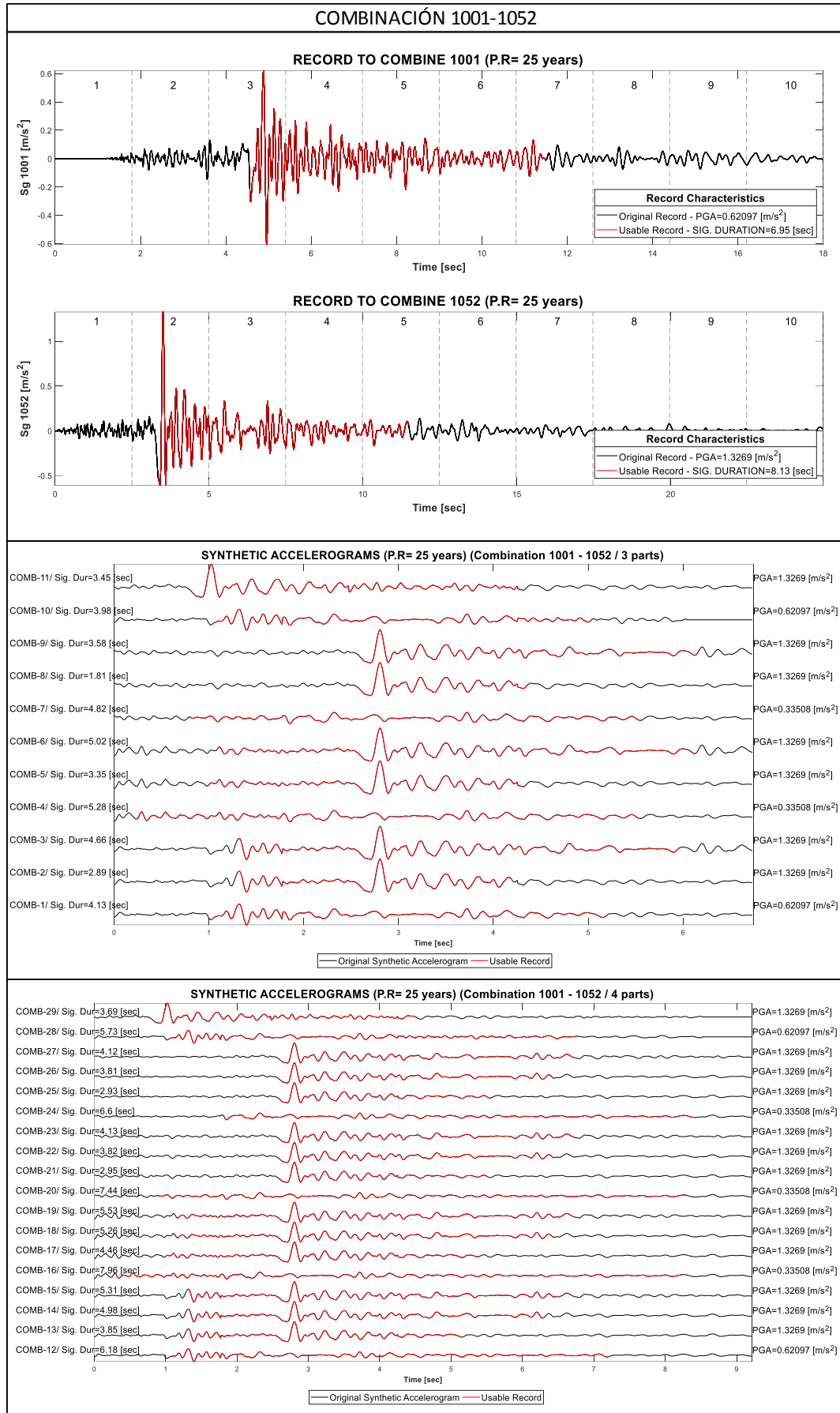
COMBINACIÓN 1067-1070												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-1045	Comb-1046	Comb-1047	Comb-1048	Comb-1049	Comb-1050	Comb-1051	Comb-1052	Comb-1053		Comb-1054	Comb-1055
Partes de Sg 1067	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1067 / 1070	4	3
Partes de Sg 1070	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1070 / 1067	4	5
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1067 / 1070	6	5
	Comb-1056	Comb-1057	Comb-1058	Comb-1059	Comb-1060	Comb-1061	Comb-1062	Comb-1063	Comb-1064		Comb-1072	Comb-1073
Partes de Sg 1067	4	4	4	4	5	5	5	5	6	Partes de Sg 1067 / 1070	4	3
	6	6	6	6	7	7	7	7	7	Partes de Sg 1070 / 1067	4	5
Partes de Sg 1070	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1067 / 1070	6	5
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1070 / 1067	6	7
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			
COMBINACIÓN 1067-1071												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-1074	Comb-1075	Comb-1076	Comb-1077	Comb-1078	Comb-1079	Comb-1080	Comb-1081	Comb-1082		Comb-1083	Comb-1084
Partes de Sg 1067	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1067 / 1071	4	3
Partes de Sg 1071	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1071 / 1067	4	5
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1067 / 1071	6	5
	Comb-1085	Comb-1086	Comb-1087	Comb-1088	Comb-1089	Comb-1090	Comb-1091	Comb-1092	Comb-1093		Comb-1101	Comb-1102
Partes de Sg 1067	4	4	4	4	5	5	5	5	6	Partes de Sg 1067 / 1071	4	3
	6	6	6	6	7	7	7	7	7	Partes de Sg 1071 / 1067	4	5
Partes de Sg 1071	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1067 / 1071	6	5
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1071 / 1067	6	7
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			
COMBINACIÓN 1067-1077												
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO												
	Comb-1103	Comb-1104	Comb-1105	Comb-1106	Comb-1107	Comb-1108	Comb-1109	Comb-1110	Comb-1111		Comb-1112	Comb-1113
Partes de Sg 1067	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1067 / 1077	4	3
Partes de Sg 1077	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1077 / 1067	4	5
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1067 / 1077	6	5
	Comb-1114	Comb-1115	Comb-1116	Comb-1117	Comb-1118	Comb-1119	Comb-1120	Comb-1121	Comb-1122		Comb-1130	Comb-1131
Partes de Sg 1067	4	4	4	4	5	5	5	5	6	Partes de Sg 1067 / 1077	4	3
	6	6	6	6	7	7	7	7	7	Partes de Sg 1077 / 1067	4	5
Partes de Sg 1077	4	3	3	3	4	3	3	3	4	Partes de Sg 1067 / 1077	6	5
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	Partes de Sg 1077 / 1067	6	7
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			
	6	6	6	5	6	6	6	5	6			

Anexo 11-16: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [1045-1131]. (Elaboración propia)

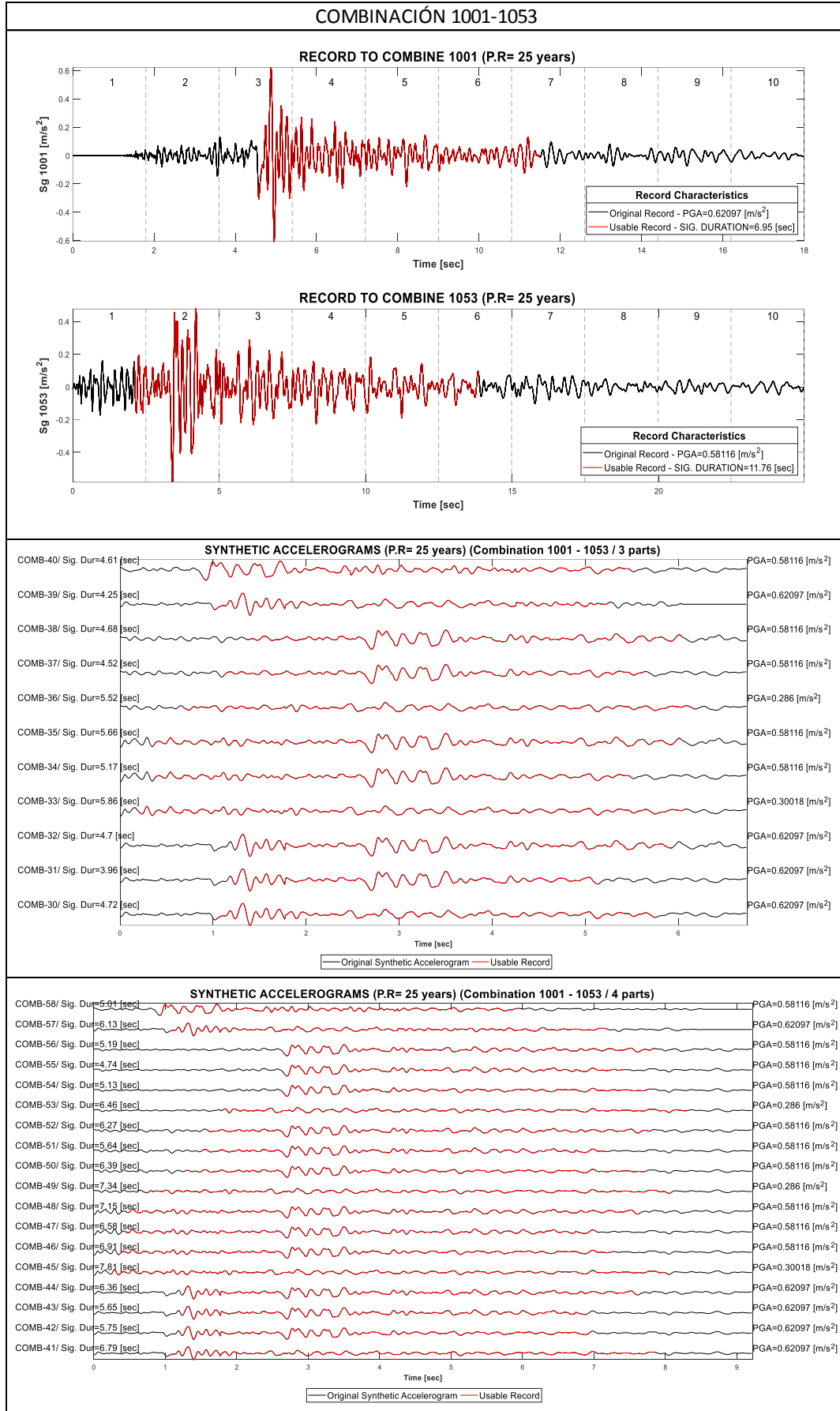
COMBINACIÓN 1068-1070																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-1132								Comb-1141										
	Comb-1133								Comb-1142										
	Comb-1134																		
	Comb-1135																		
	Comb-1136																		
	Comb-1137																		
	Comb-1138																		
	Comb-1139																		
	Comb-1140																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1068 / 1070	4	3							
Partes de Sg 1070	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1070 / 1068	4	5							
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1068 / 1070	6	5							
	Comb-1143																		
	Comb-1144																		
	Comb-1145																		
	Comb-1146																		
	Comb-1147																		
	Comb-1148																		
	Comb-1149																		
	Comb-1150																		
	Comb-1151																		
	Comb-1152																		
	Comb-1153																		
	Comb-1154																		
	Comb-1155																		
	Comb-1156																		
	Comb-1157																		
	Comb-1158																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	Partes de Sg 1068 / 1070	4	3	
Partes de Sg 1070	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	Partes de Sg 1070 / 1068	4	5
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	Partes de Sg 1068 / 1070	6	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	5		Partes de Sg 1070 / 1068	6	7
	Comb-1159																		
	Comb-1160																		
COMBINACIÓN 1068-1071																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-1161																		
	Comb-1162																		
	Comb-1163																		
	Comb-1164																		
	Comb-1165																		
	Comb-1166																		
	Comb-1167																		
	Comb-1168																		
	Comb-1169																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1068 / 1071	4	3							
Partes de Sg 1071	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1071 / 1068	4	5							
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1068 / 1071	6	5							
	Comb-1172																		
	Comb-1173																		
	Comb-1174																		
	Comb-1175																		
	Comb-1176																		
	Comb-1177																		
	Comb-1178																		
	Comb-1179																		
	Comb-1180																		
	Comb-1181																		
	Comb-1182																		
	Comb-1183																		
	Comb-1184																		
	Comb-1185																		
	Comb-1186																		
	Comb-1187																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	Partes de Sg 1068 / 1071	4	3	
Partes de Sg 1071	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	3	3	3	Partes de Sg 1071 / 1068	4	5	
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	Partes de Sg 1068 / 1071	6	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	5		Partes de Sg 1071 / 1068	6	7
	Comb-1188																		
	Comb-1189																		
COMBINACIÓN 1068-1077																			
USANDO 3 Y 4 PARTES DE CADA REGISTRO																			
	Comb-1190																		
	Comb-1191																		
	Comb-1192																		
	Comb-1193																		
	Comb-1194																		
	Comb-1195																		
	Comb-1196																		
	Comb-1197																		
	Comb-1198																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	5	5	5	6	6	6	Partes de Sg 1068 / 1077	4	3							
Partes de Sg 1077	4	3	3	4	3	3	4	3	3	Partes de Sg 1077 / 1068	4	5							
	5	5	4	5	5	4	5	5	4	Partes de Sg 1068 / 1077	6	5							
	Comb-1201																		
	Comb-1202																		
	Comb-1203																		
	Comb-1204																		
	Comb-1205																		
	Comb-1206																		
	Comb-1207																		
	Comb-1208																		
	Comb-1209																		
	Comb-1210																		
	Comb-1211																		
	Comb-1212																		
	Comb-1213																		
	Comb-1214																		
	Comb-1215																		
	Comb-1216																		
Partes de Sg 1068	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	Partes de Sg 1068 / 1077	4	3		
Partes de Sg 1077	4	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	3	Partes de Sg 1077 / 1068	4	5		
	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	Partes de Sg 1068 / 1077	6	5
	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	6	5	6	6	5		Partes de Sg 1077 / 1068	6	7
	Comb-1217																		
	Comb-1218																		

Anexo 11-17: Combinaciones de partes de registros reales para generación de acelerogramas sintéticos [1132-1218]. (Elaboración propia)

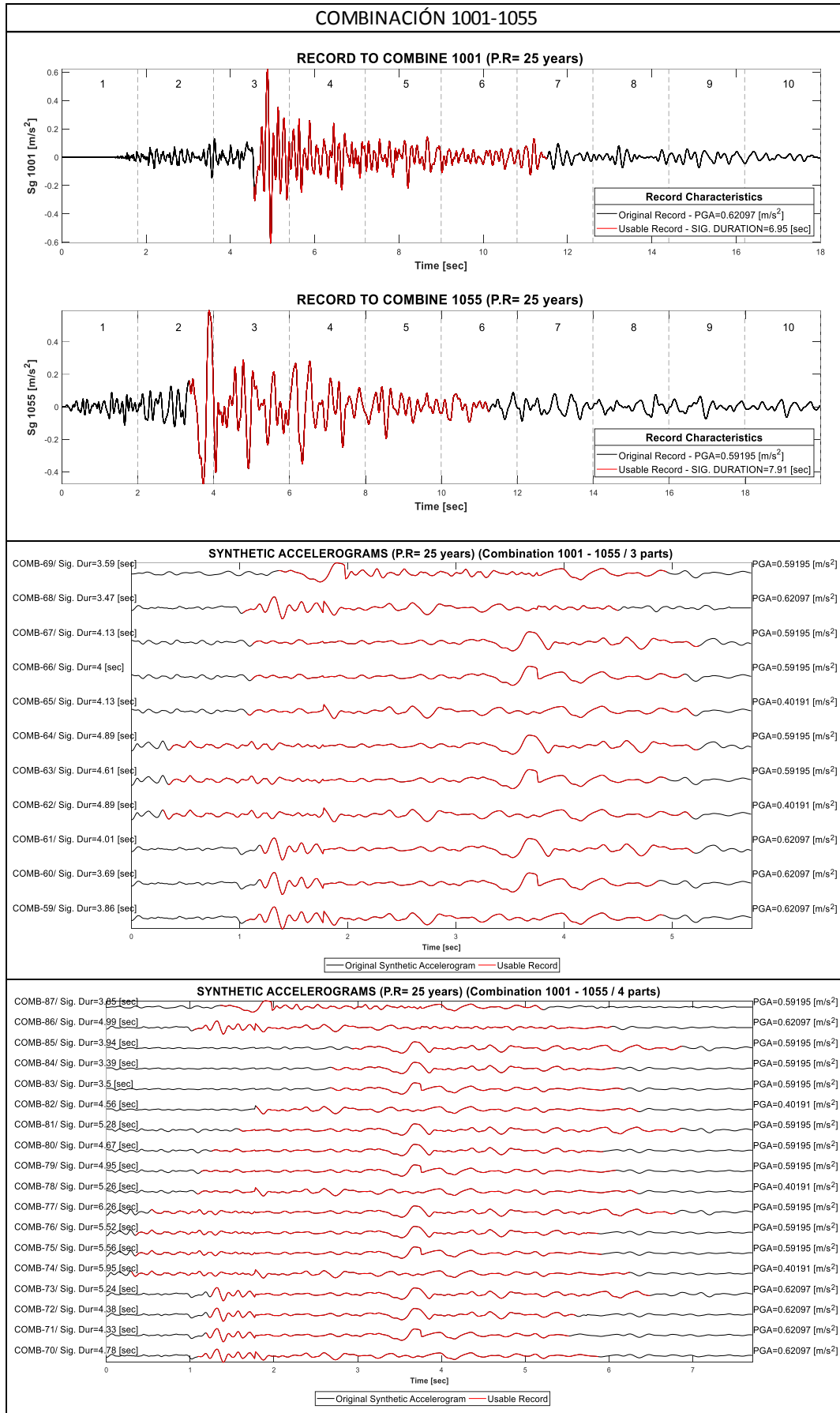




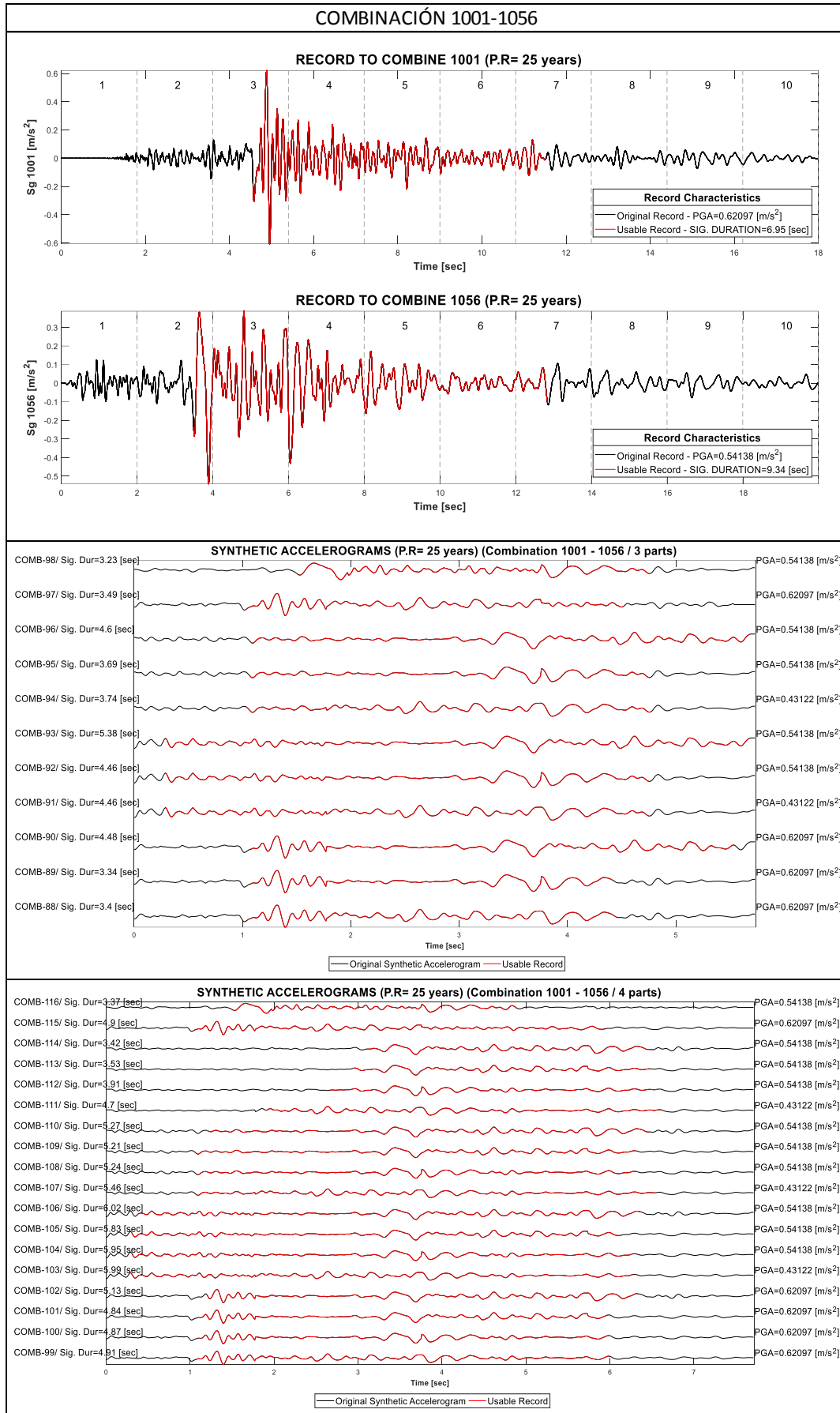
Anexo 11-19: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1052. (Elaboración propia)



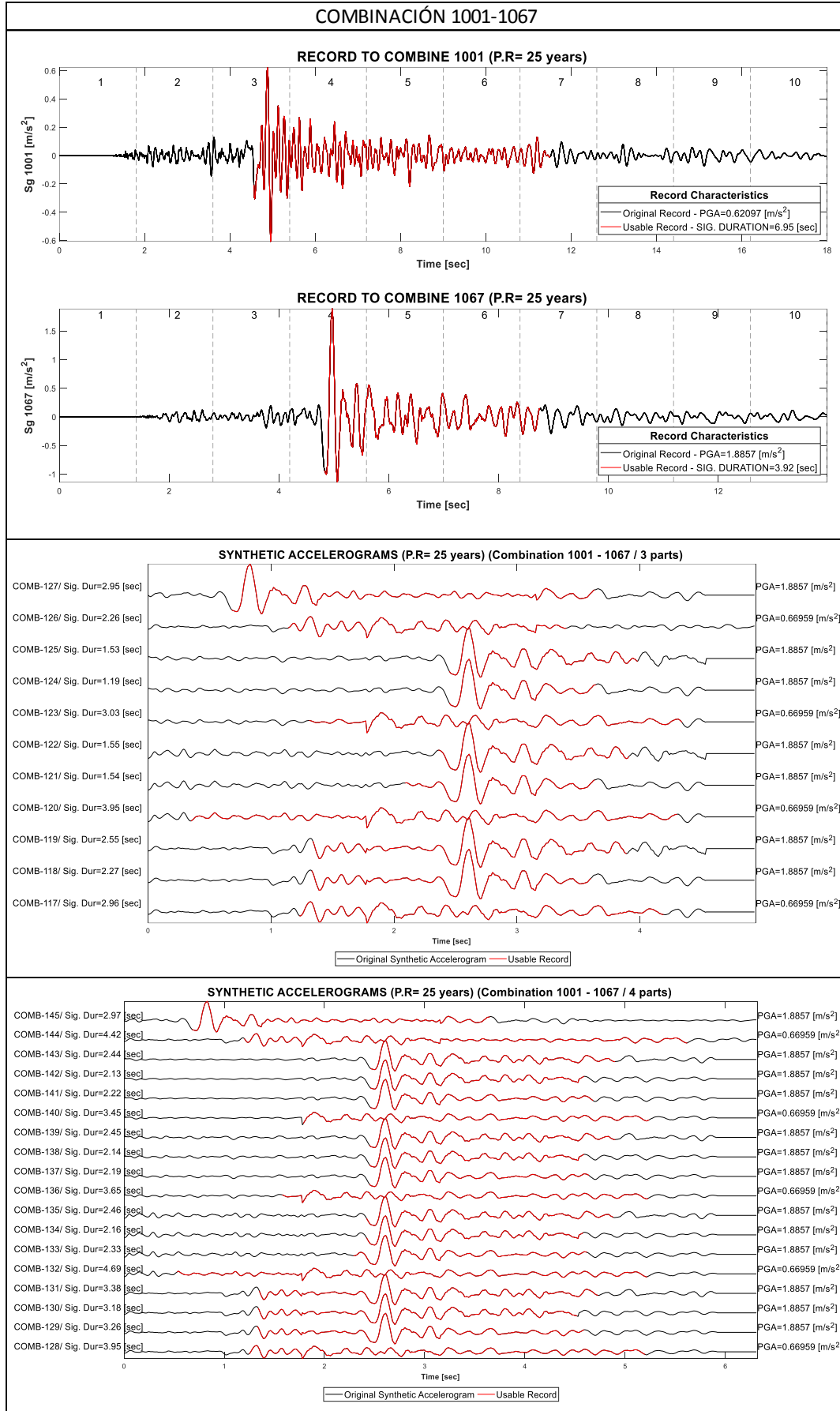
Anexo 11-20: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1053. (Elaboración propia)



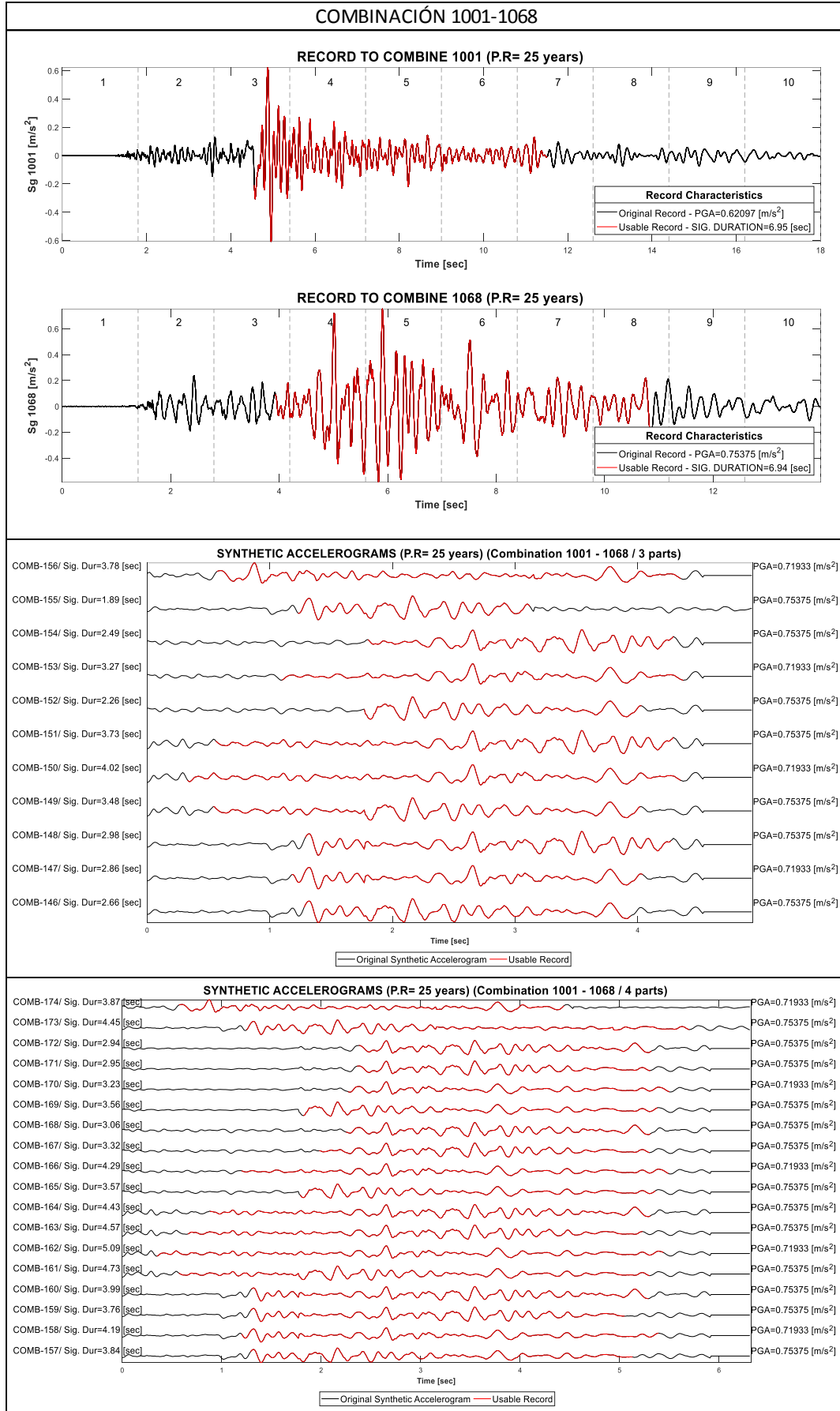
Anexo 11-21: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1055. (Elaboración propia)



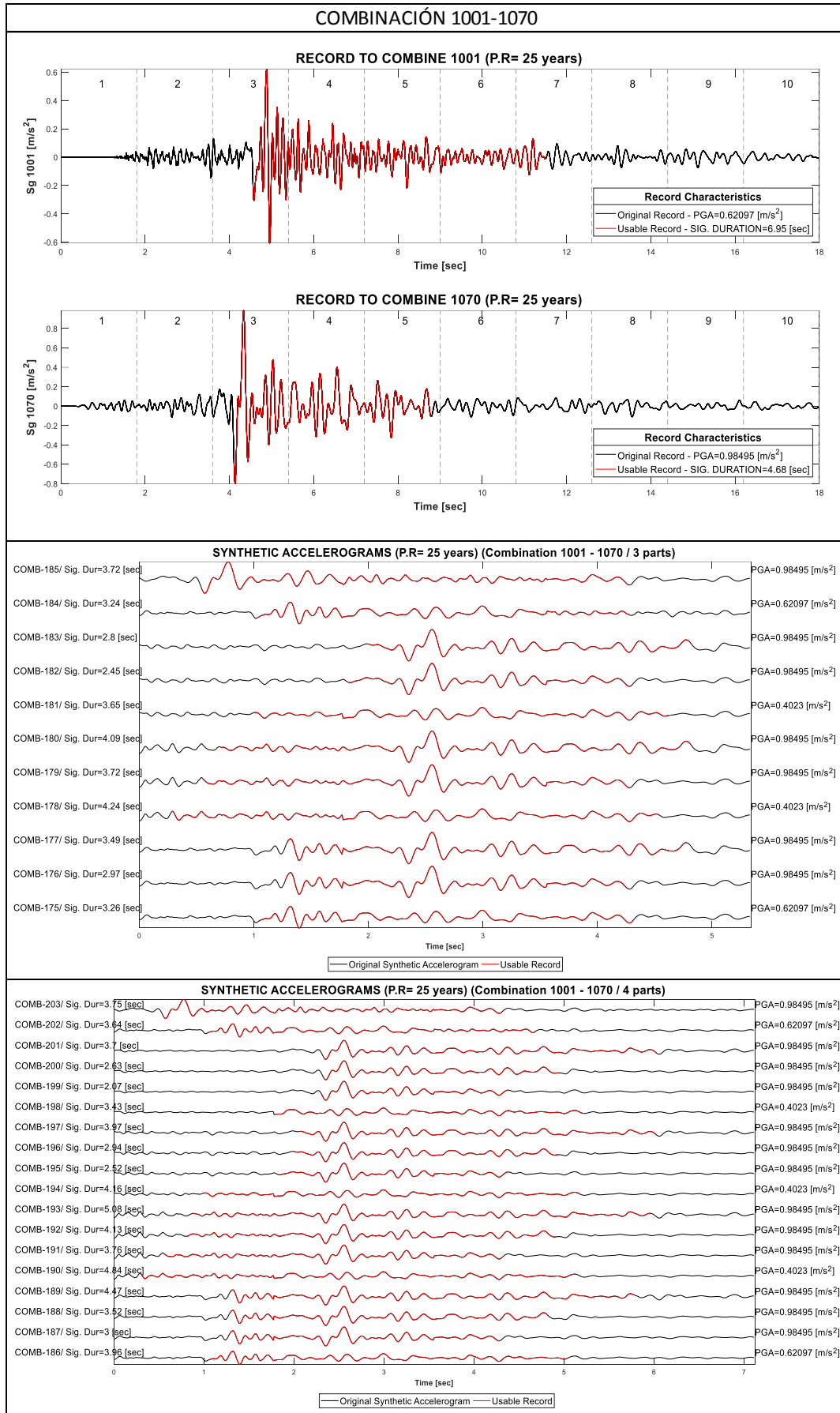
Anexo 11-22: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1056. (Elaboración propia)



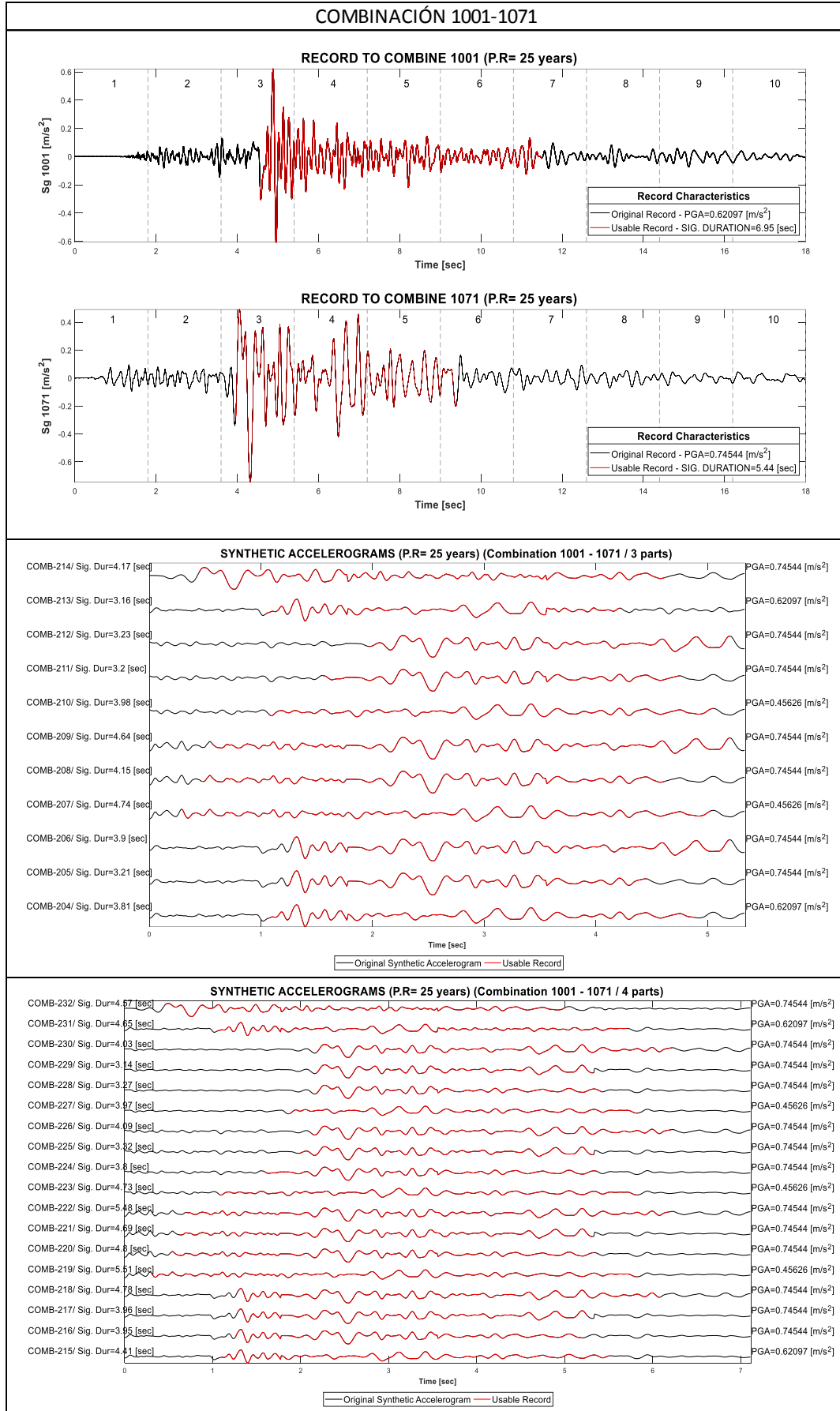
Anexo 11-23: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1067. (Elaboración propia)



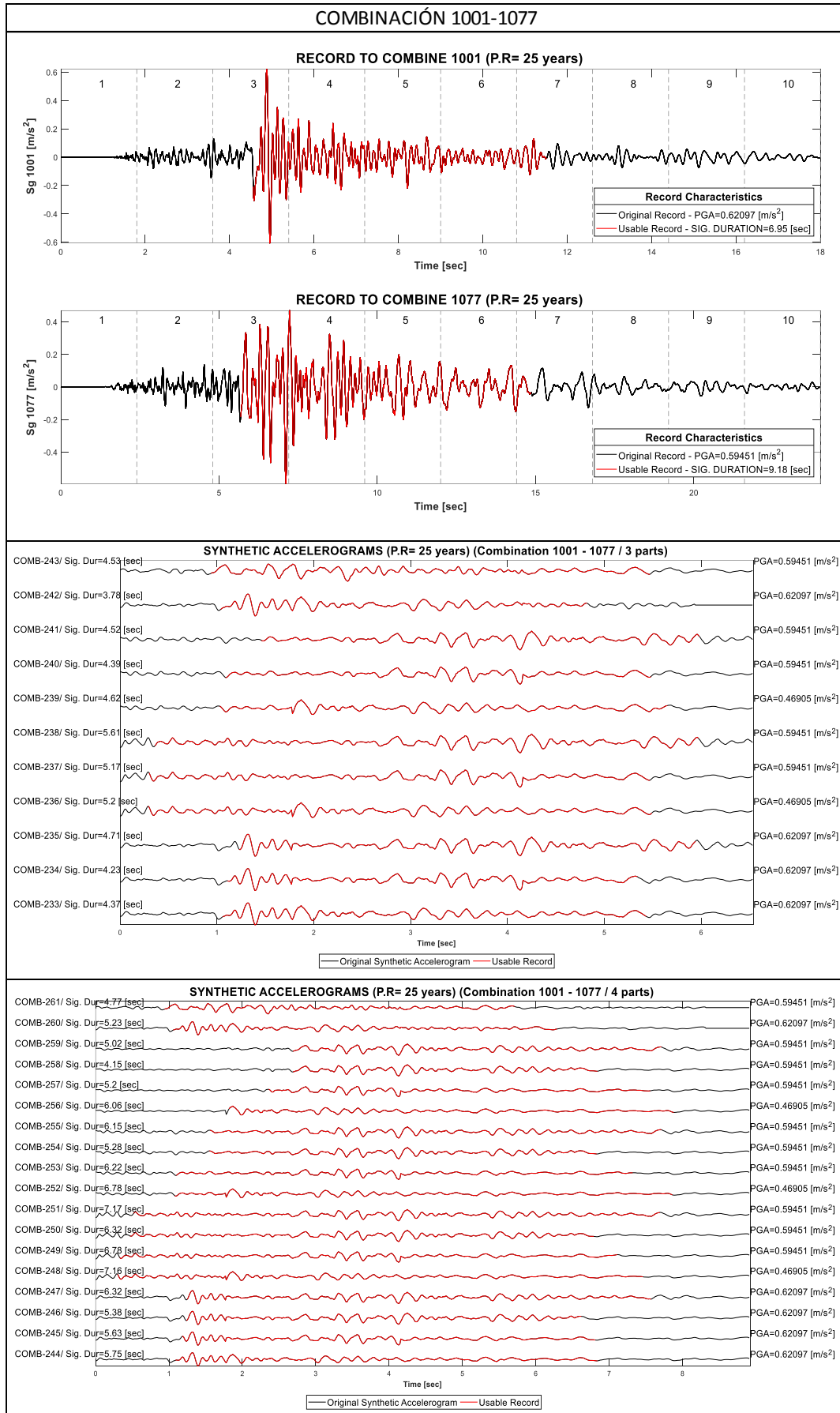
Anexo 11-24: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1068. (Elaboración propia)



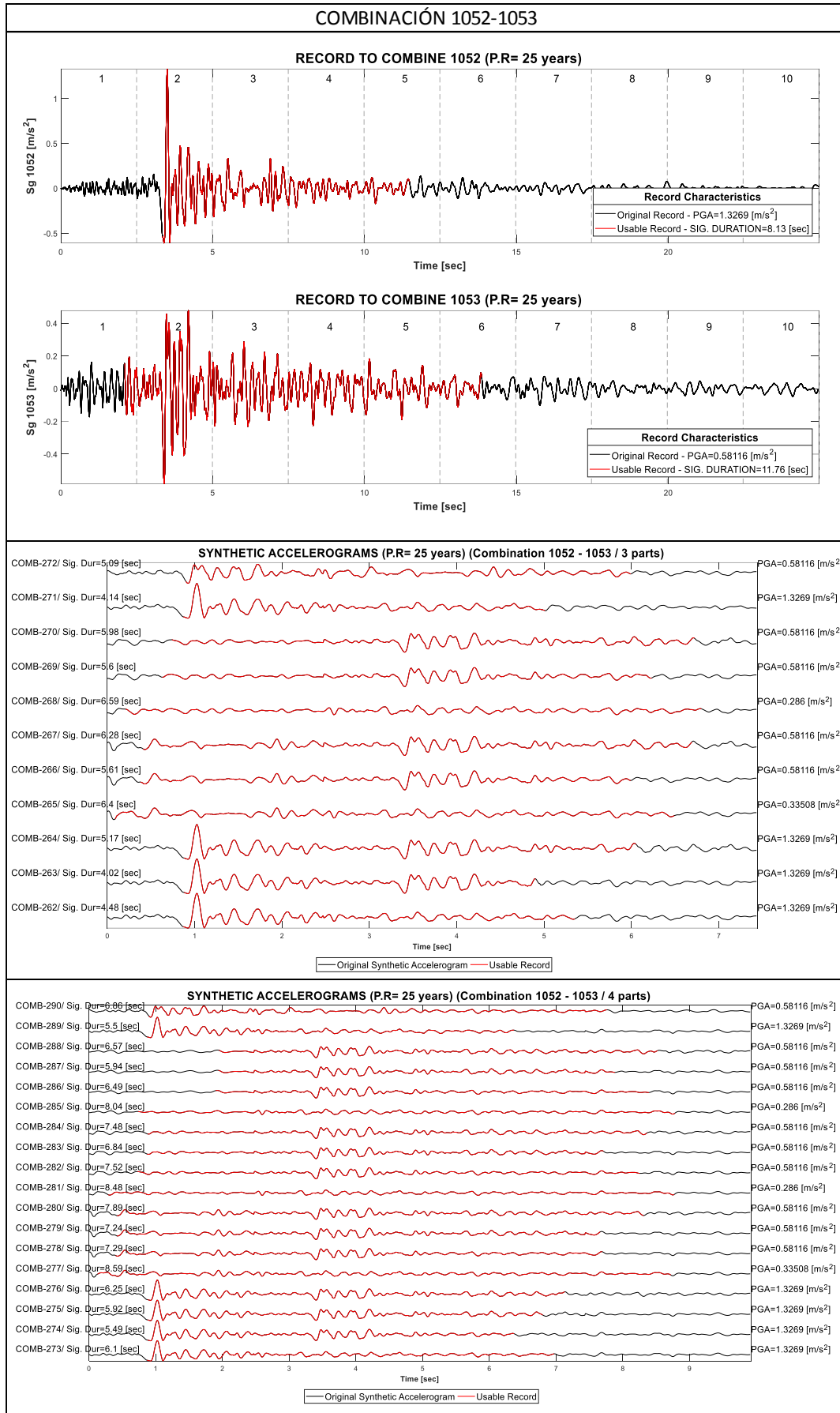
Anexo 11-25: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1070. (Elaboración propia)



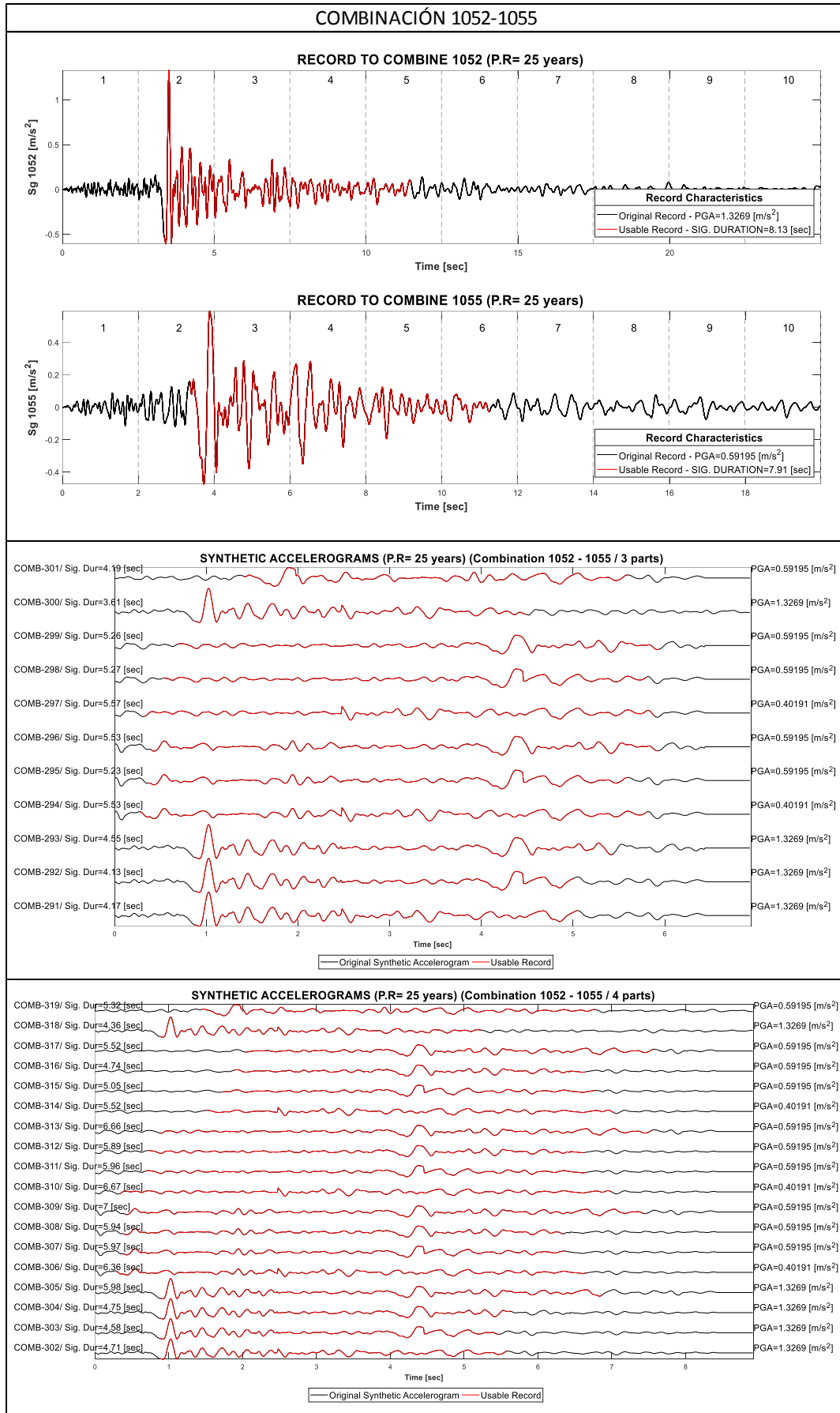
Anexo 11-26: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1071. (Elaboración propia)



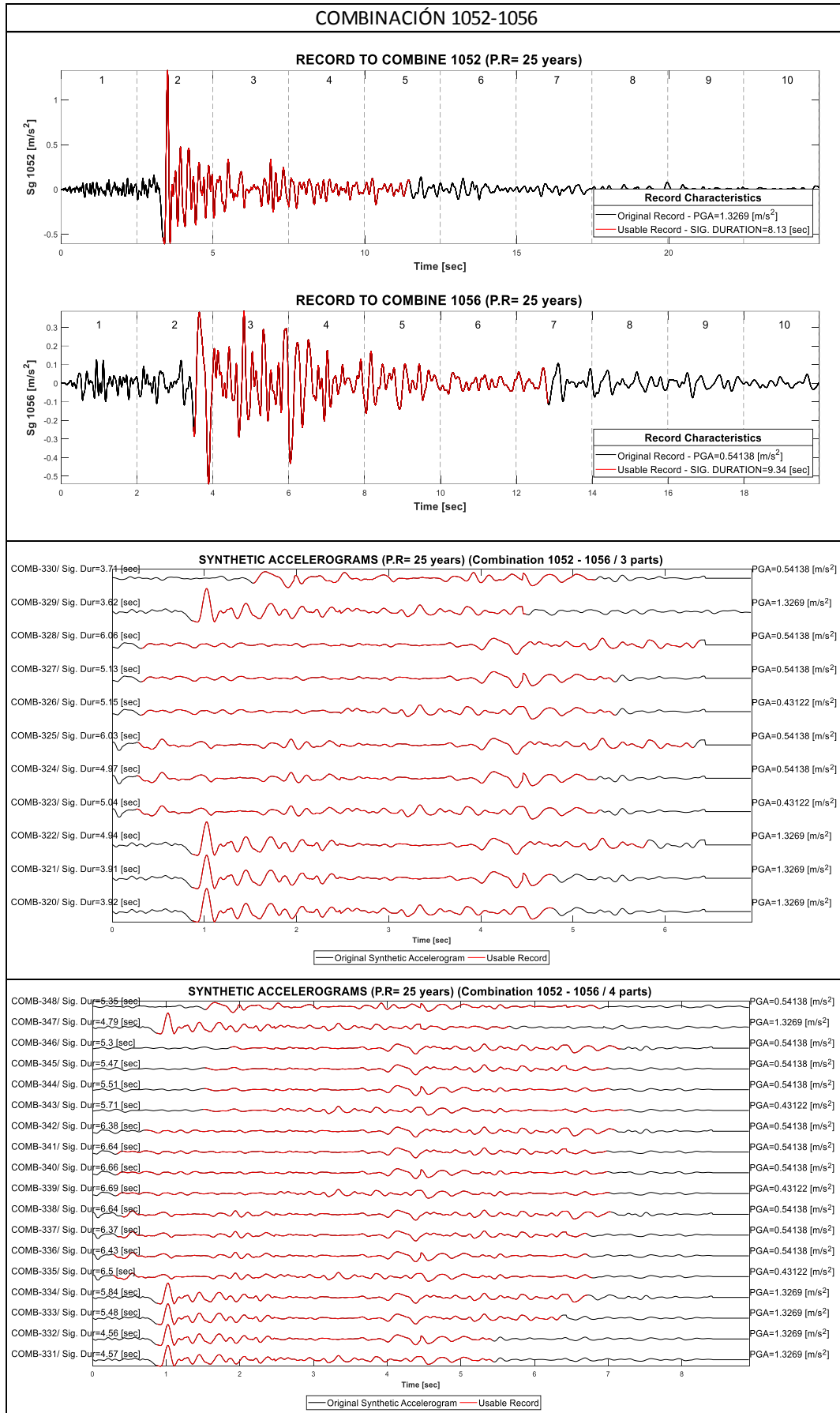
Anexo 11-27: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1001-1077. (Elaboración propia)



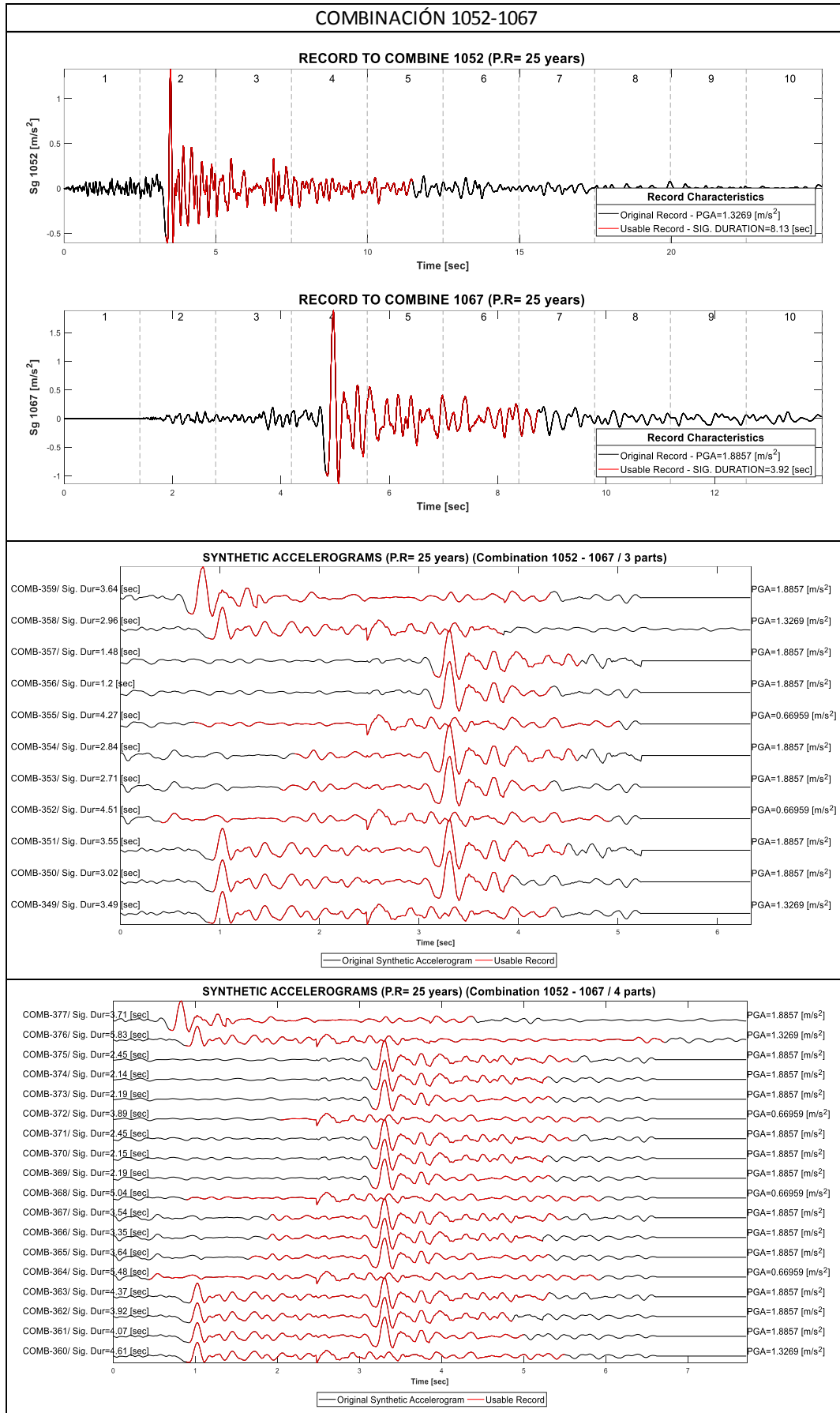
Anexo 11-28: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1053. (Elaboración propia)



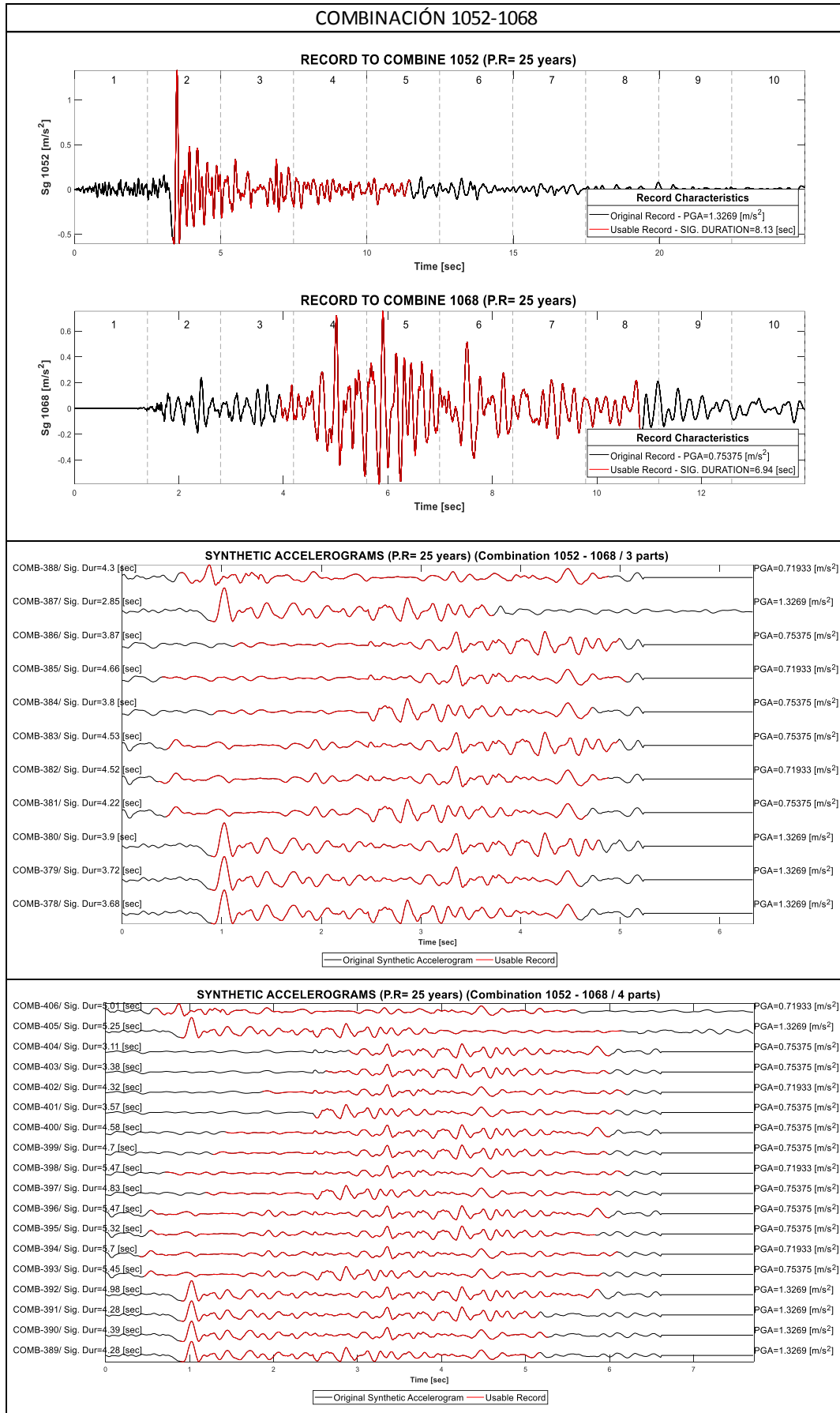
Anexo 11-29: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1055. (Elaboración propia)



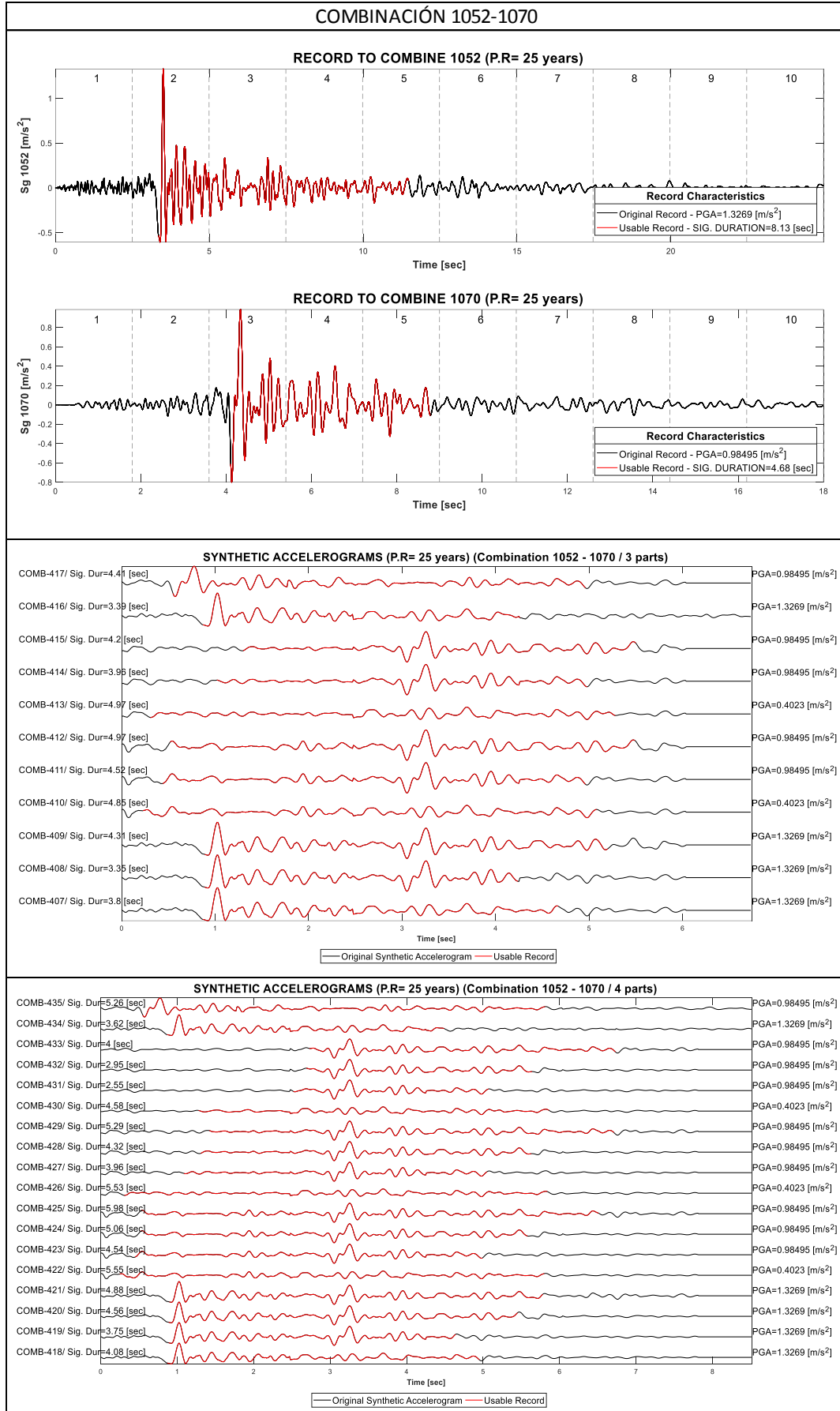
Anexo 11-30: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1056. (Elaboración propia)



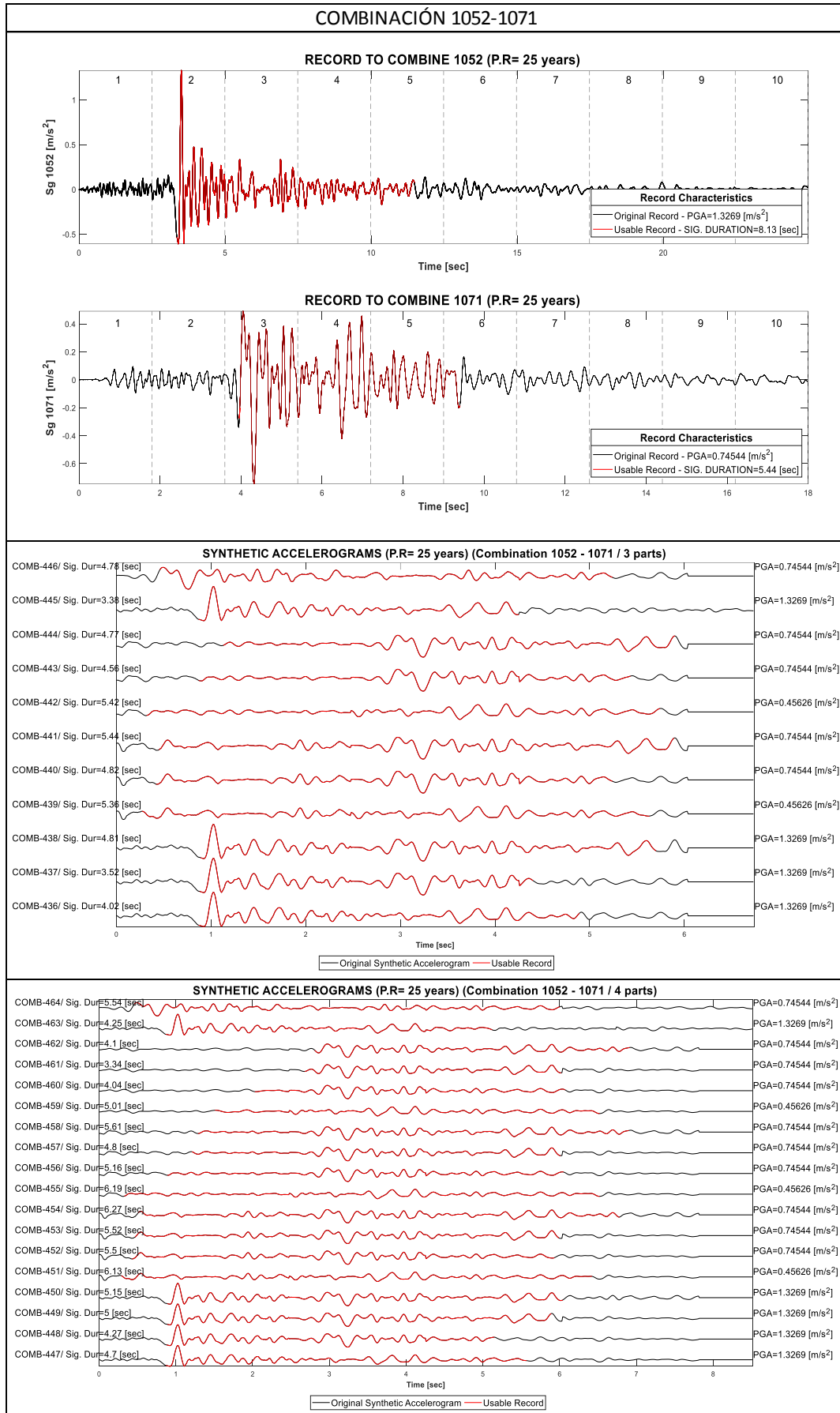
Anexo 11-31: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1067. (Elaboración propia)



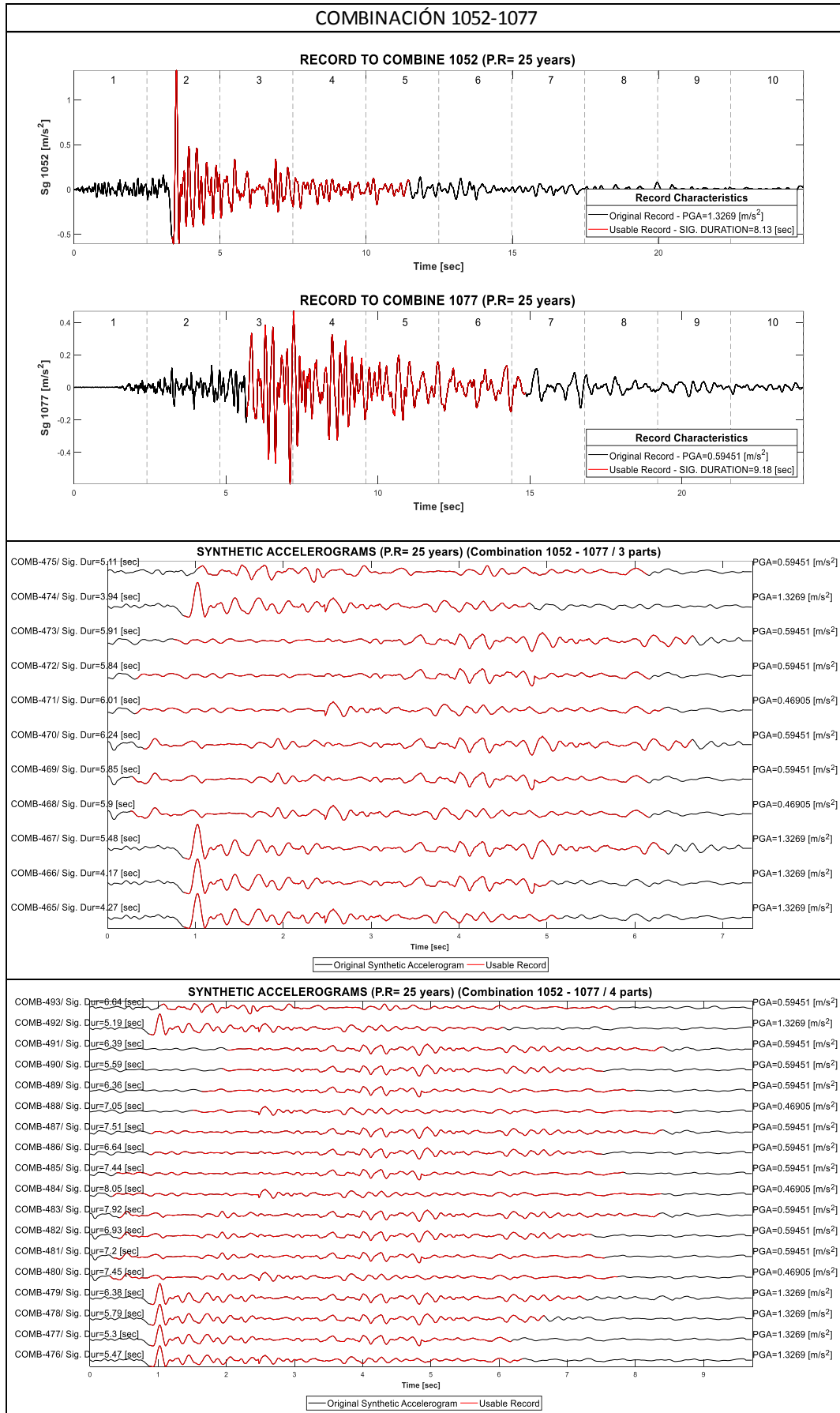
Anexo 11-32: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1068. (Elaboración propia)



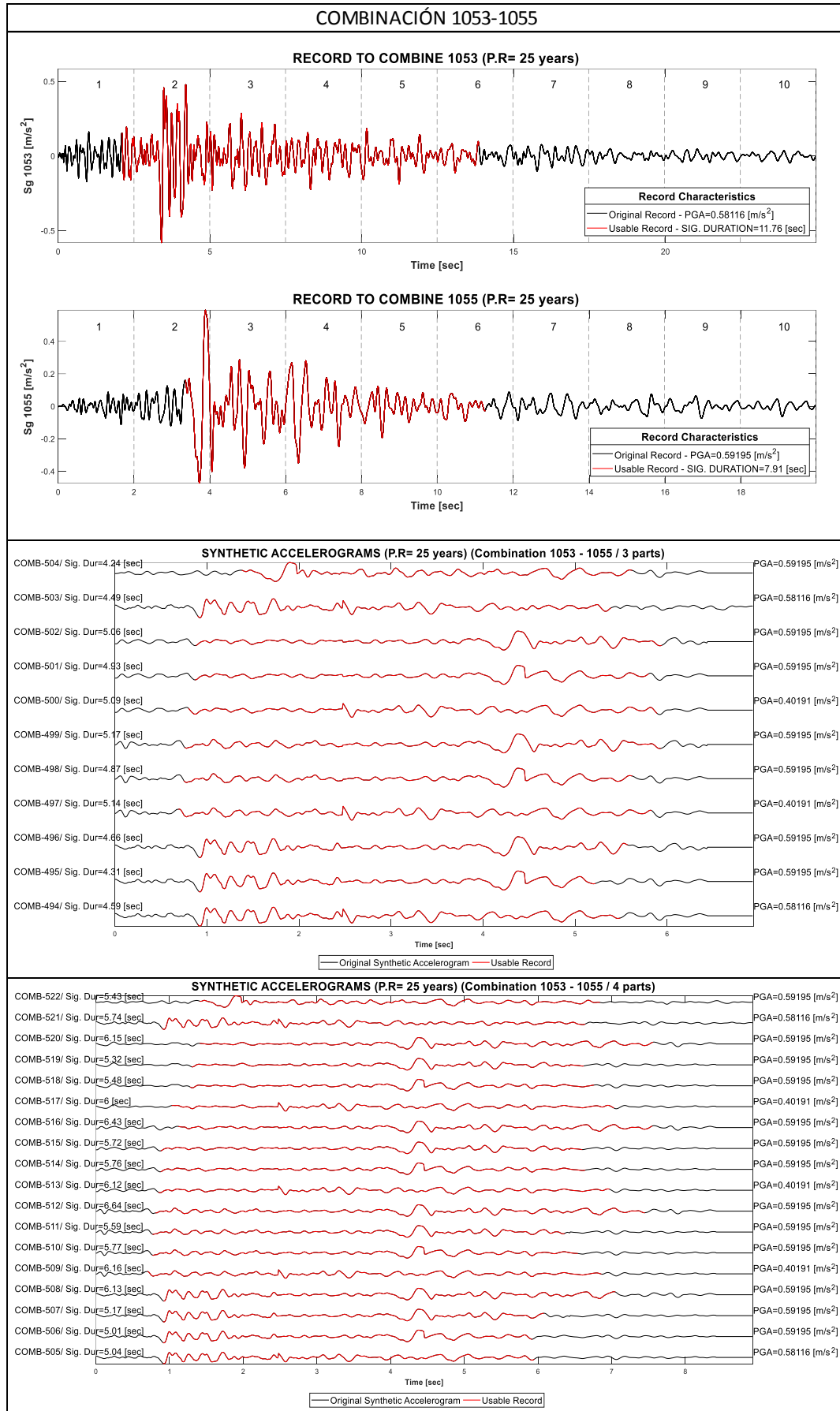
Anexo 11-33: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1070. (Elaboración propia)



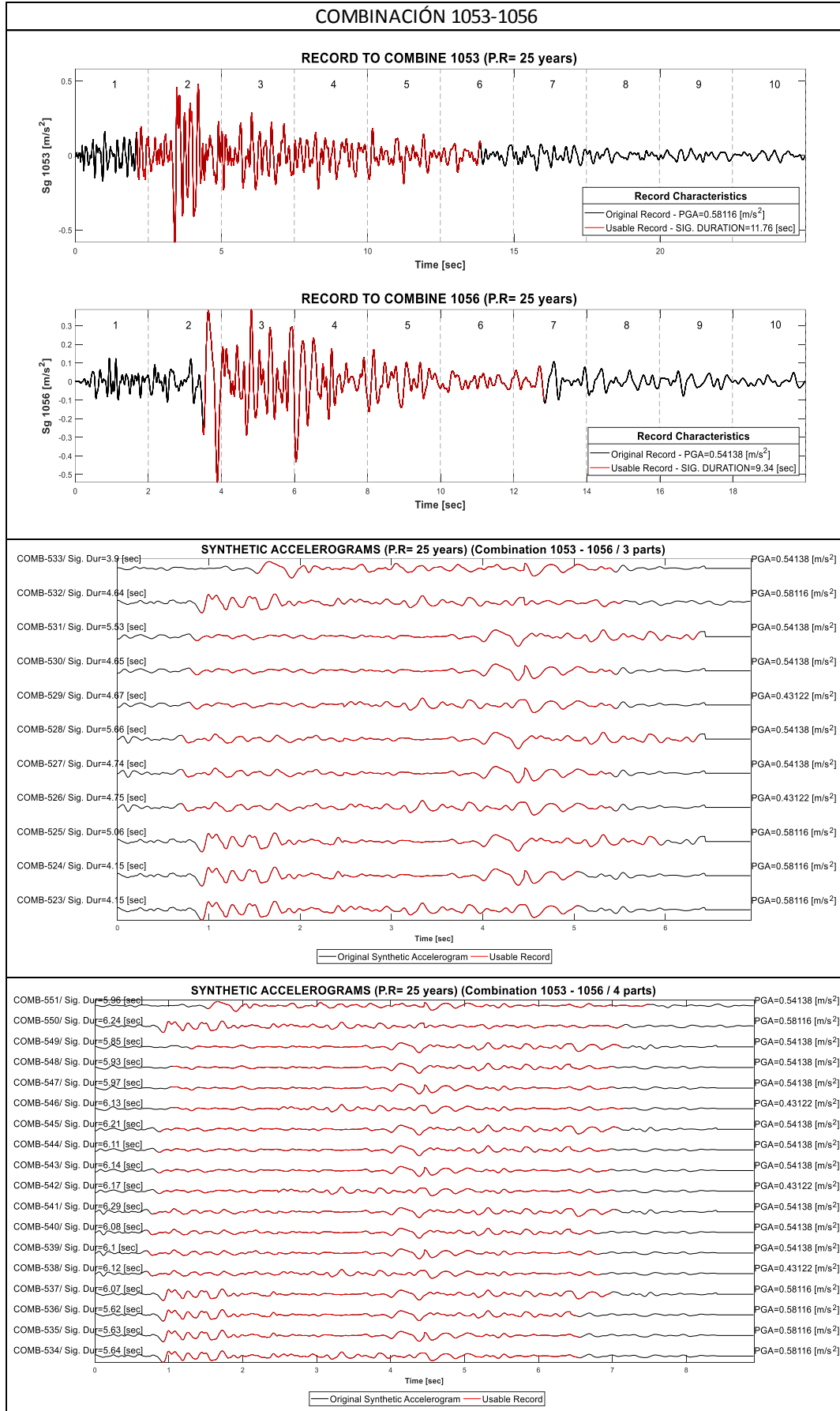
Anexo 11-34: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1071. (Elaboración propia)



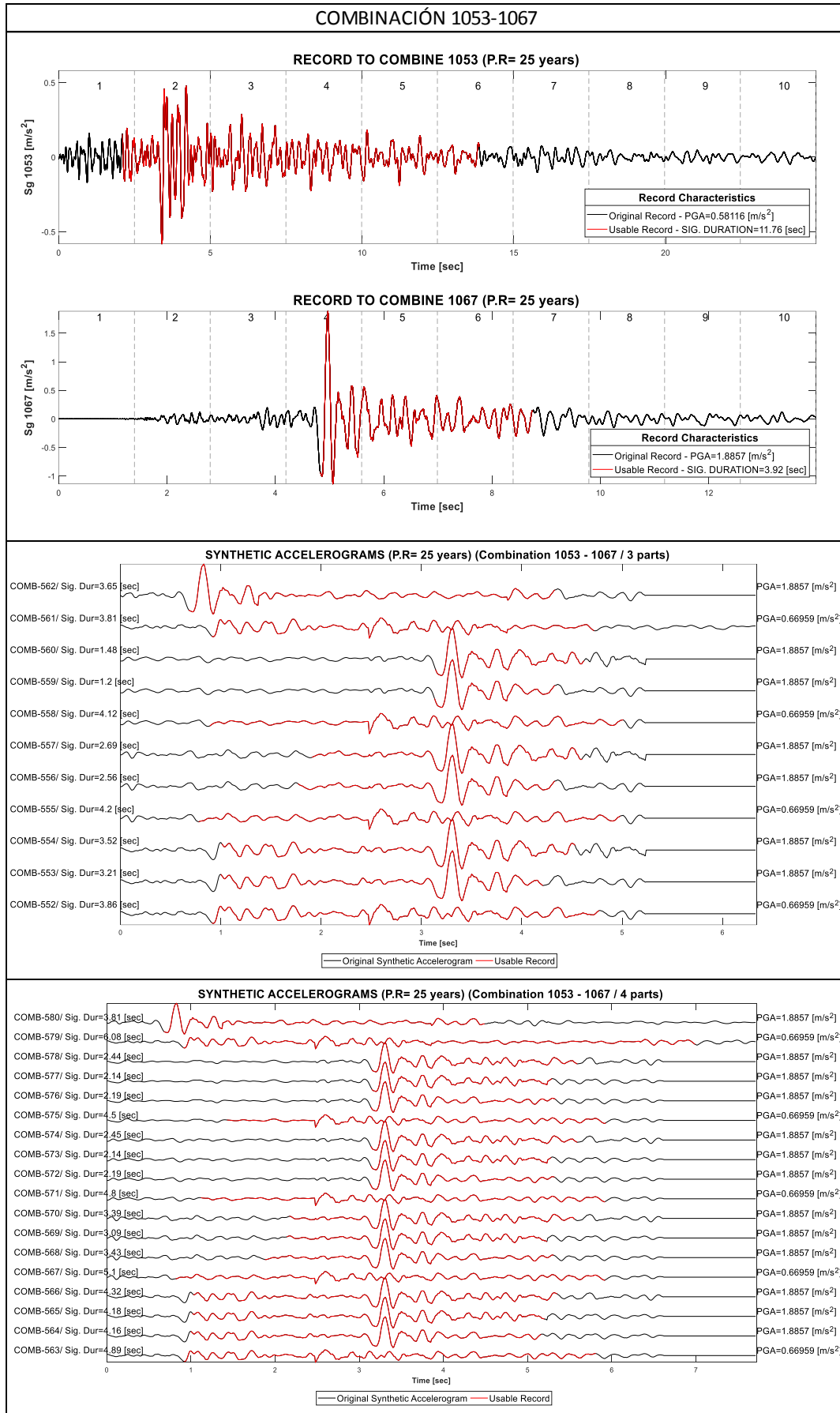
Anexo 11-35: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1052-1077. (Elaboración propia)



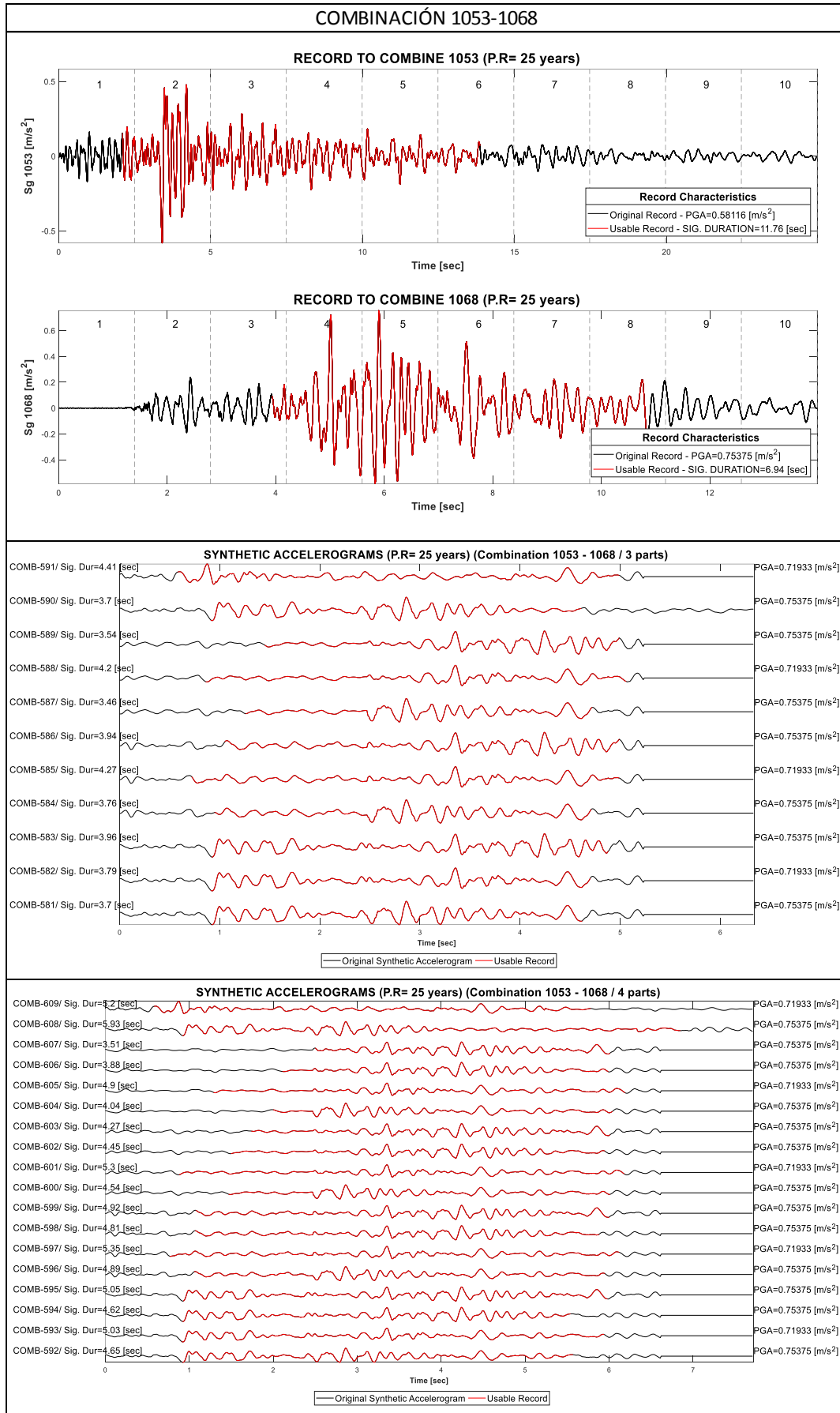
Anexo 11-36: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1055. (Elaboración propia)



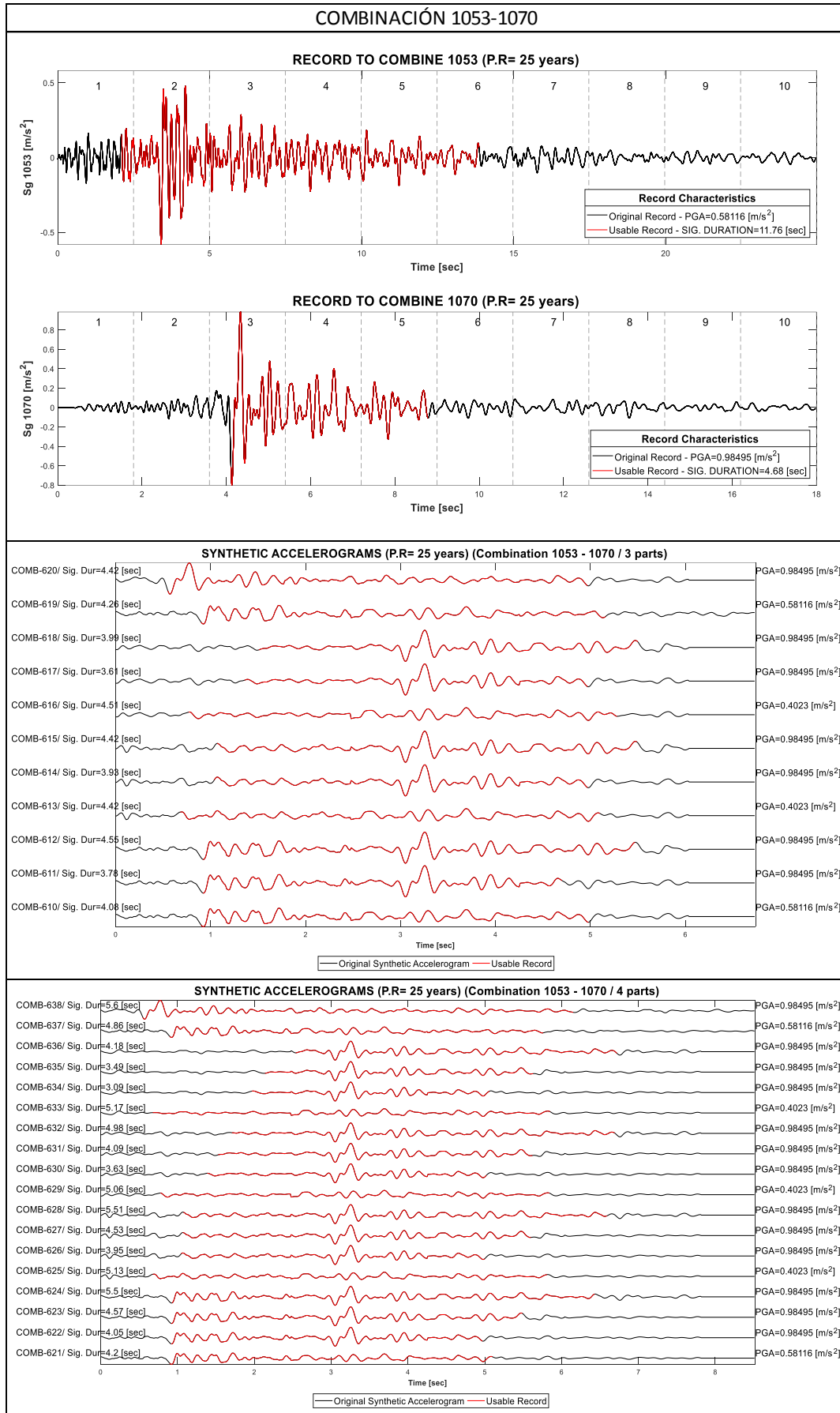
Anexo 11-37: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1056. (Elaboración propia)



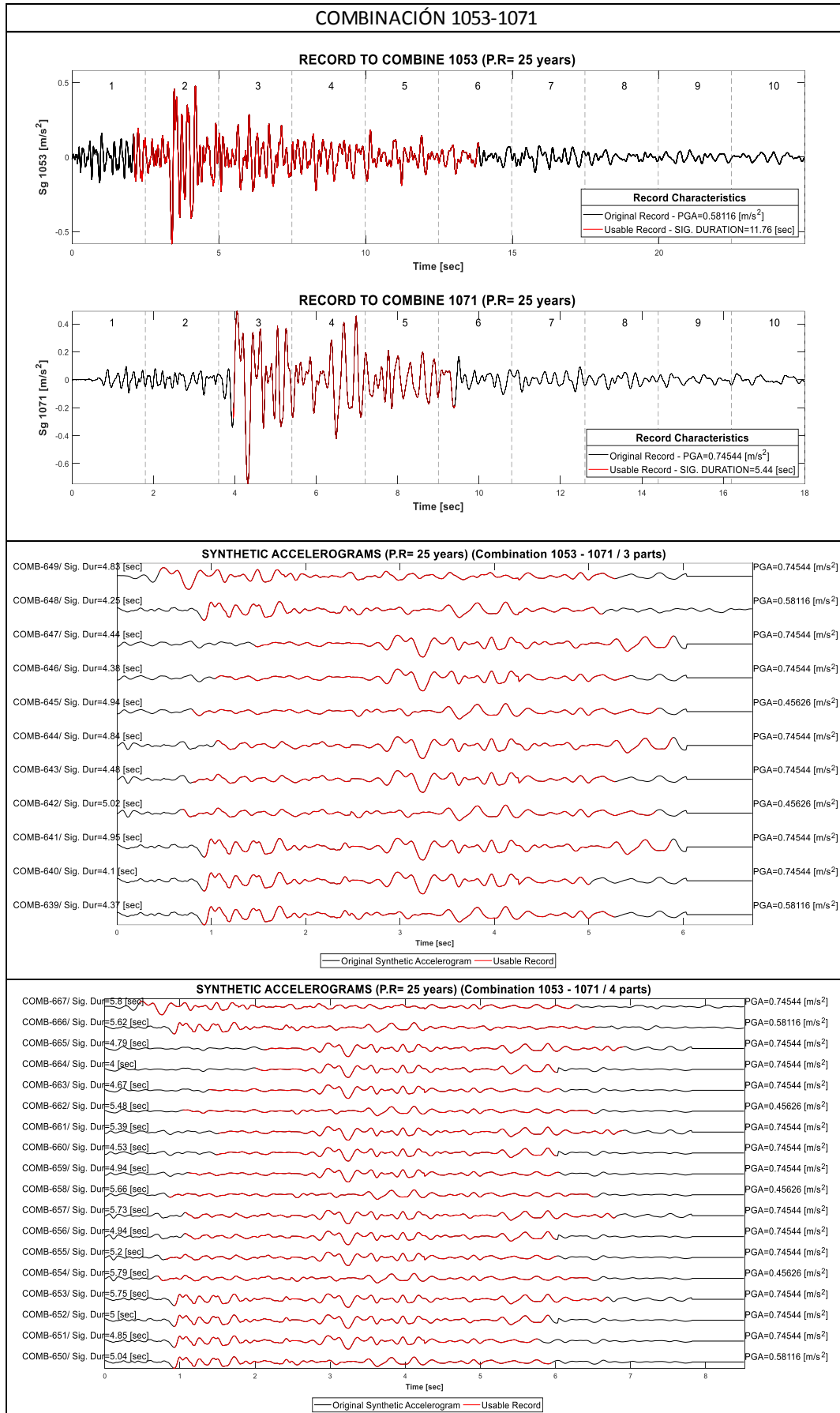
Anexo 11-38: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1067. (Elaboración propia)



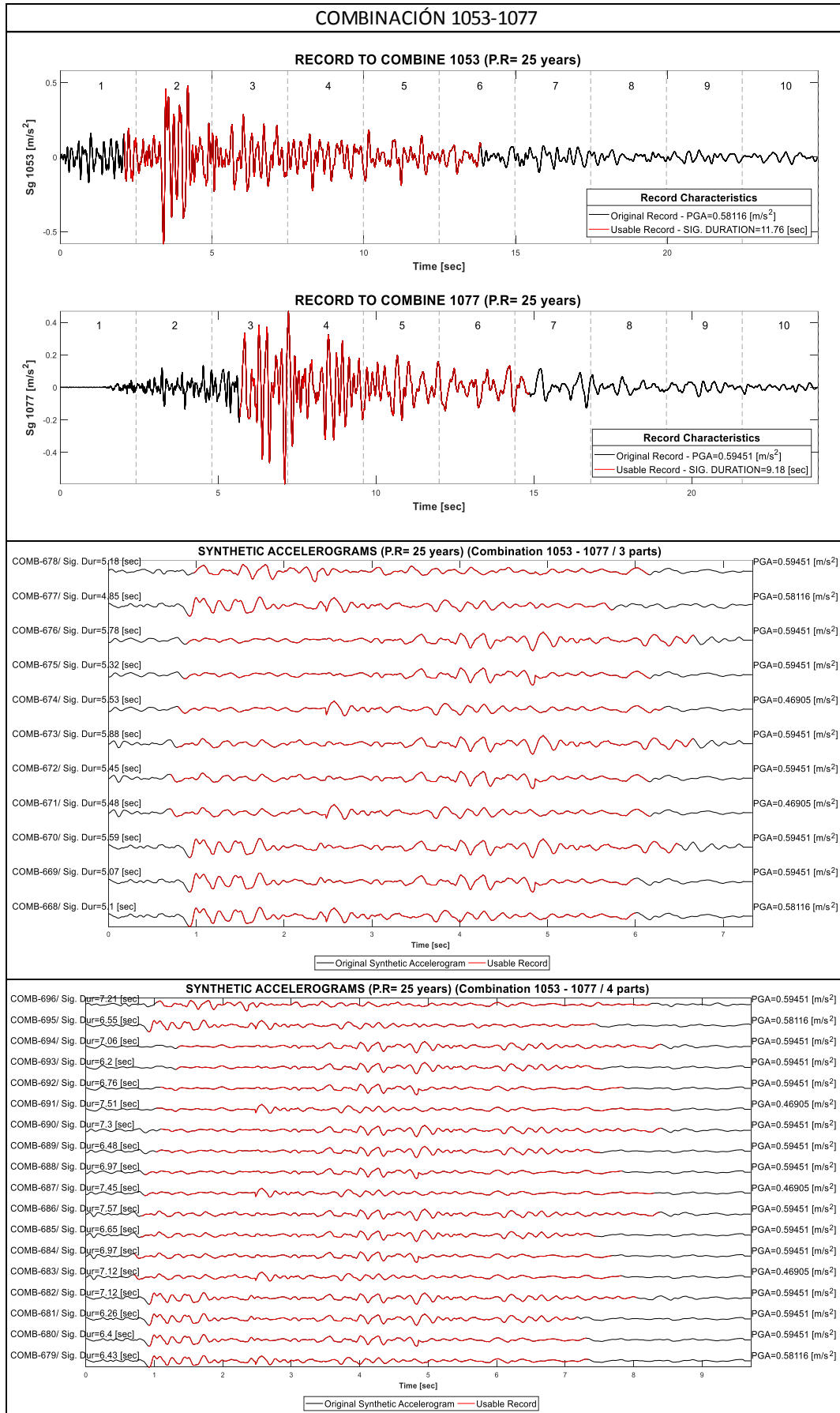
Anexo 11-39: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1068. (Elaboración propia)



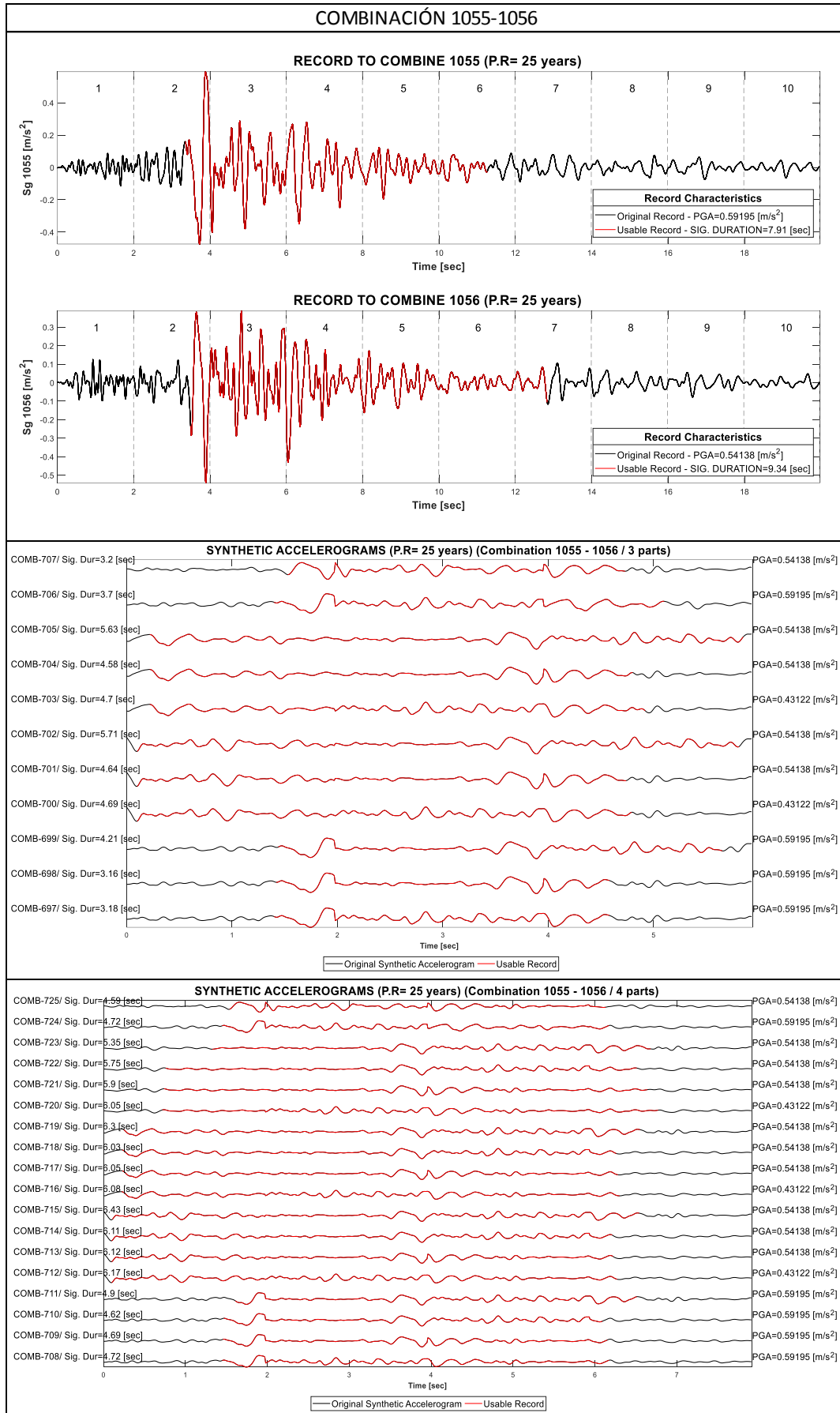
Anexo 11- 40: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1070. (Elaboración propia)



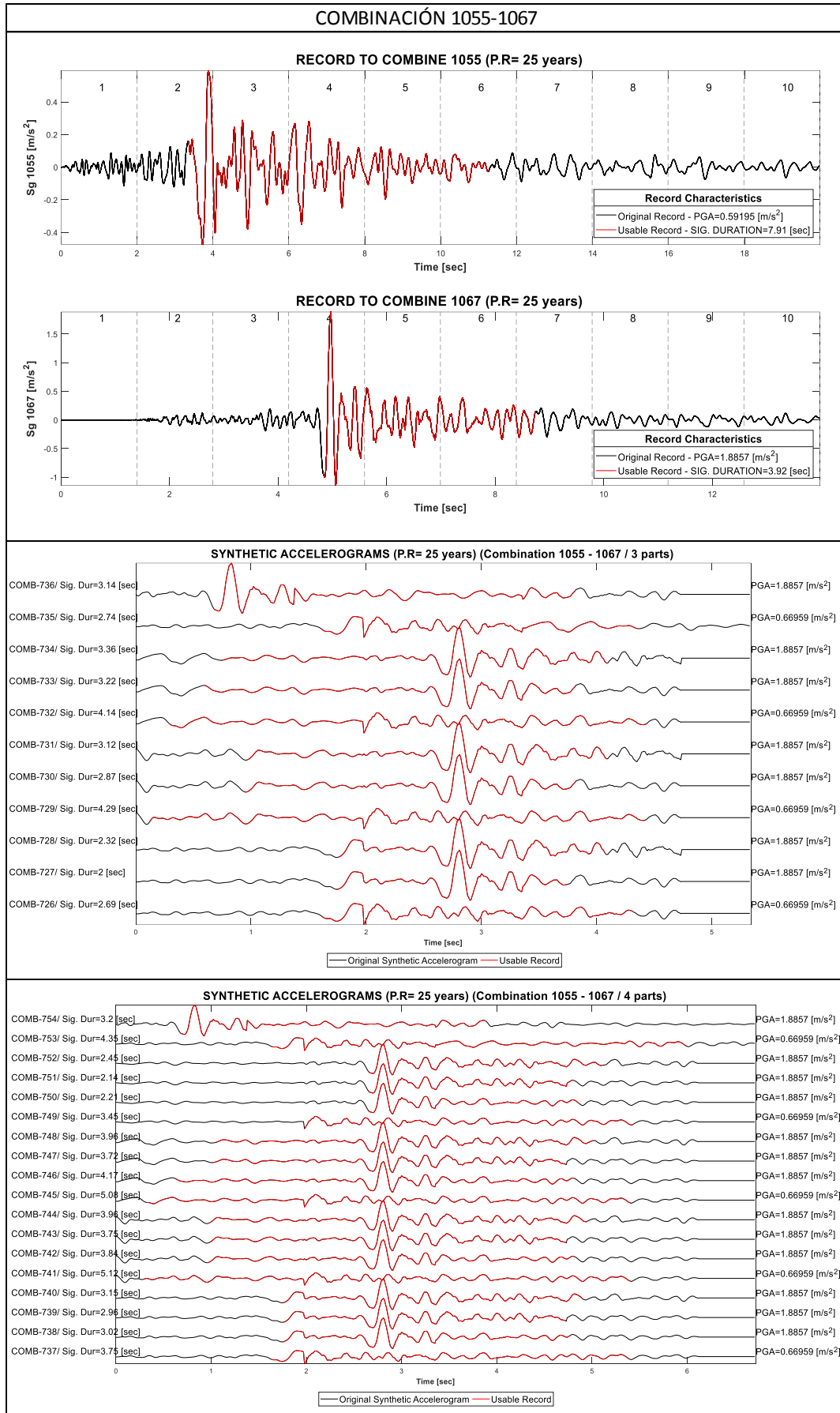
Anexo 11-41: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1071. (Elaboración propia)



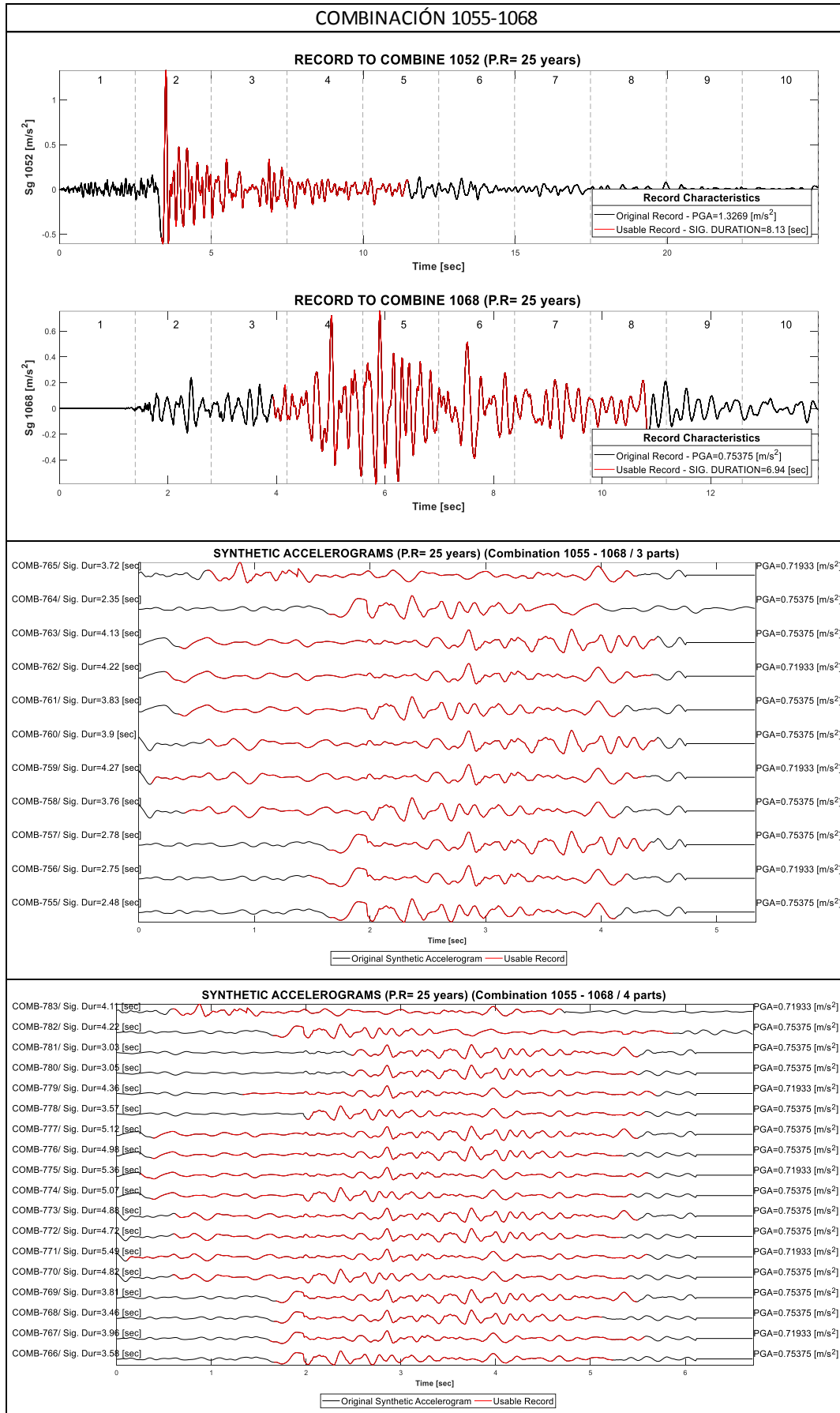
Anexo 11-42: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1053-1077. (Elaboración propia)



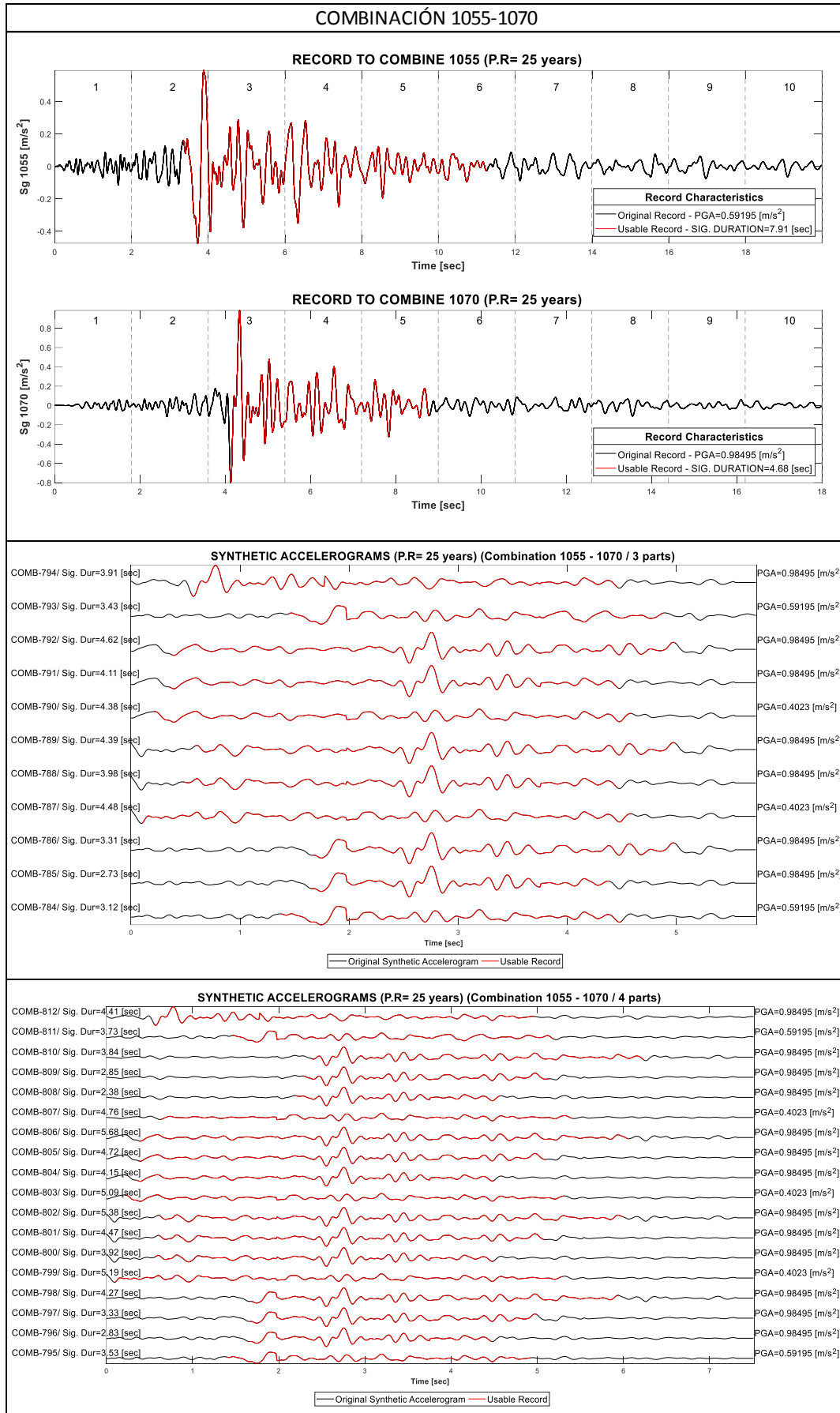
Anexo 11-43: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1056. (Elaboración propia)



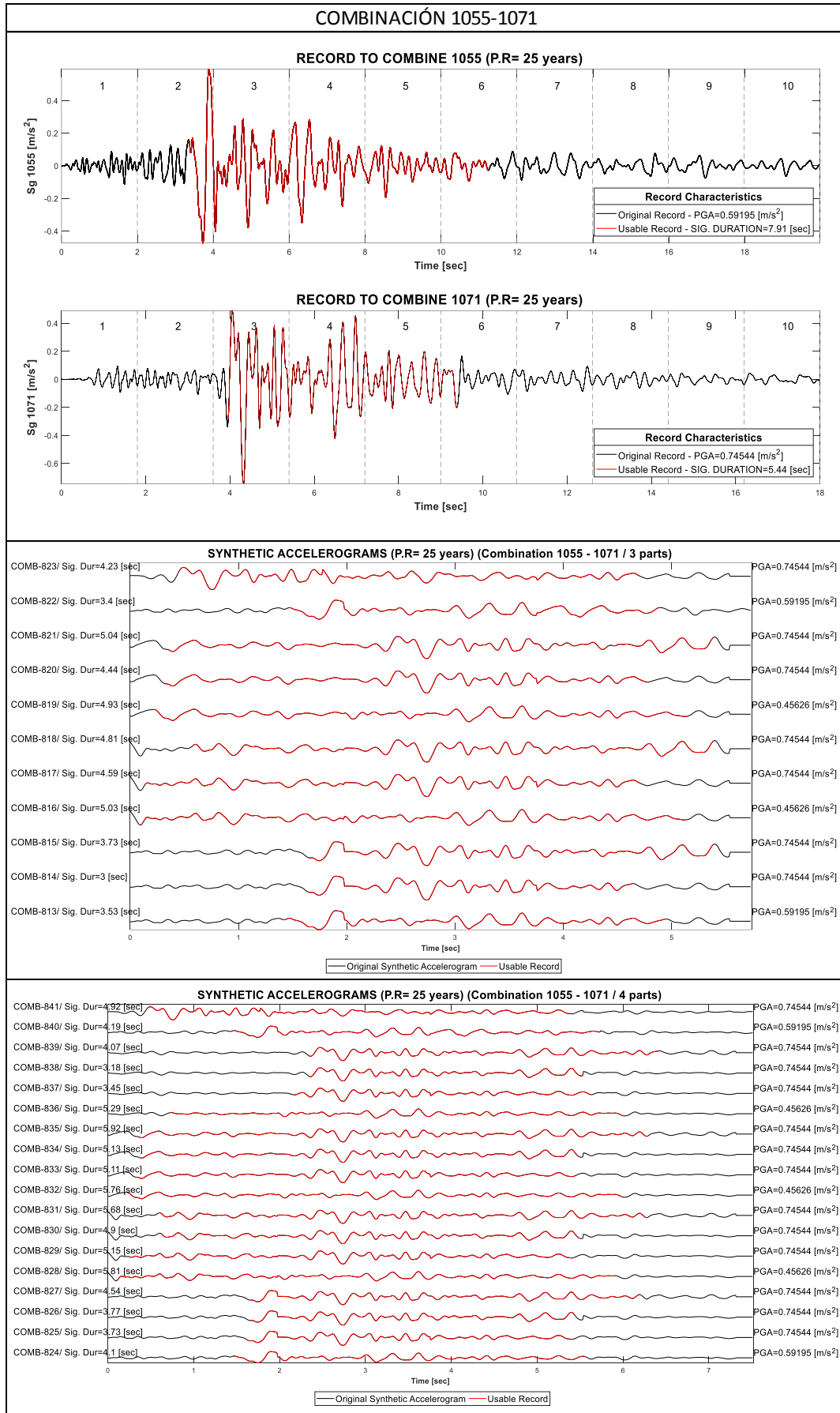
Anexo 11-44: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1067. (Elaboración propia)



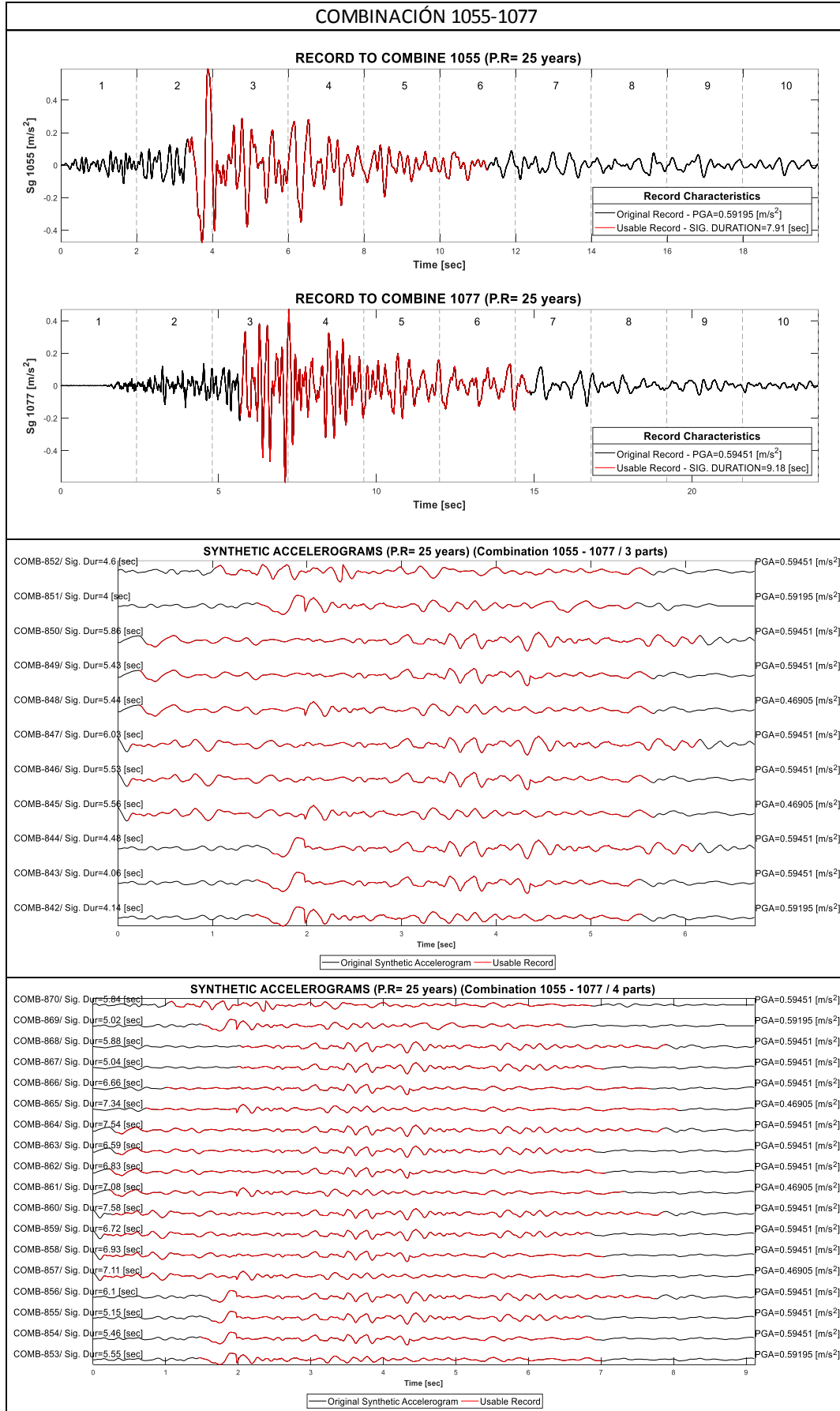
Anexo 11-45: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1068. (Elaboración propia)



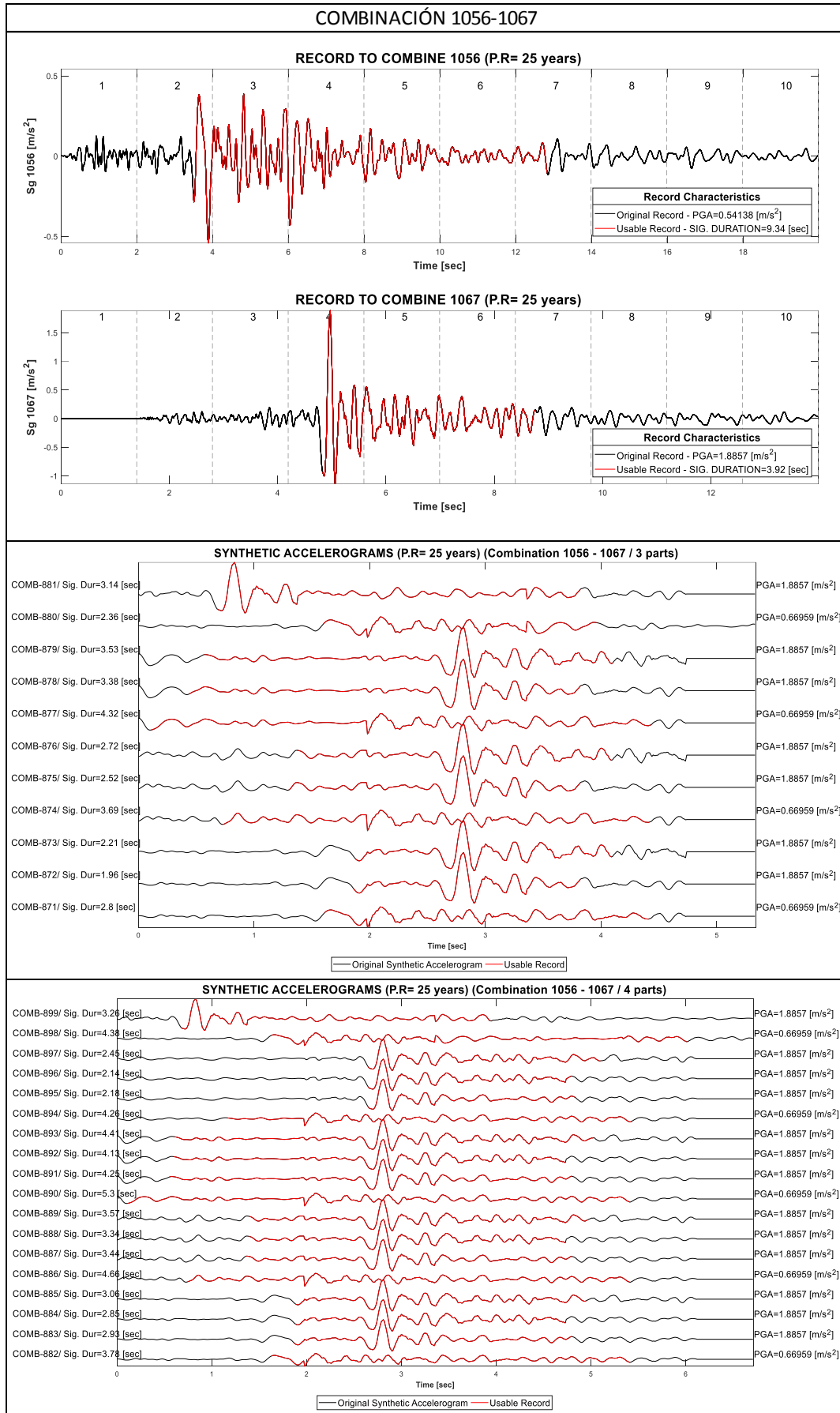
Anexo 11- 46: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1070. (Elaboración propia)



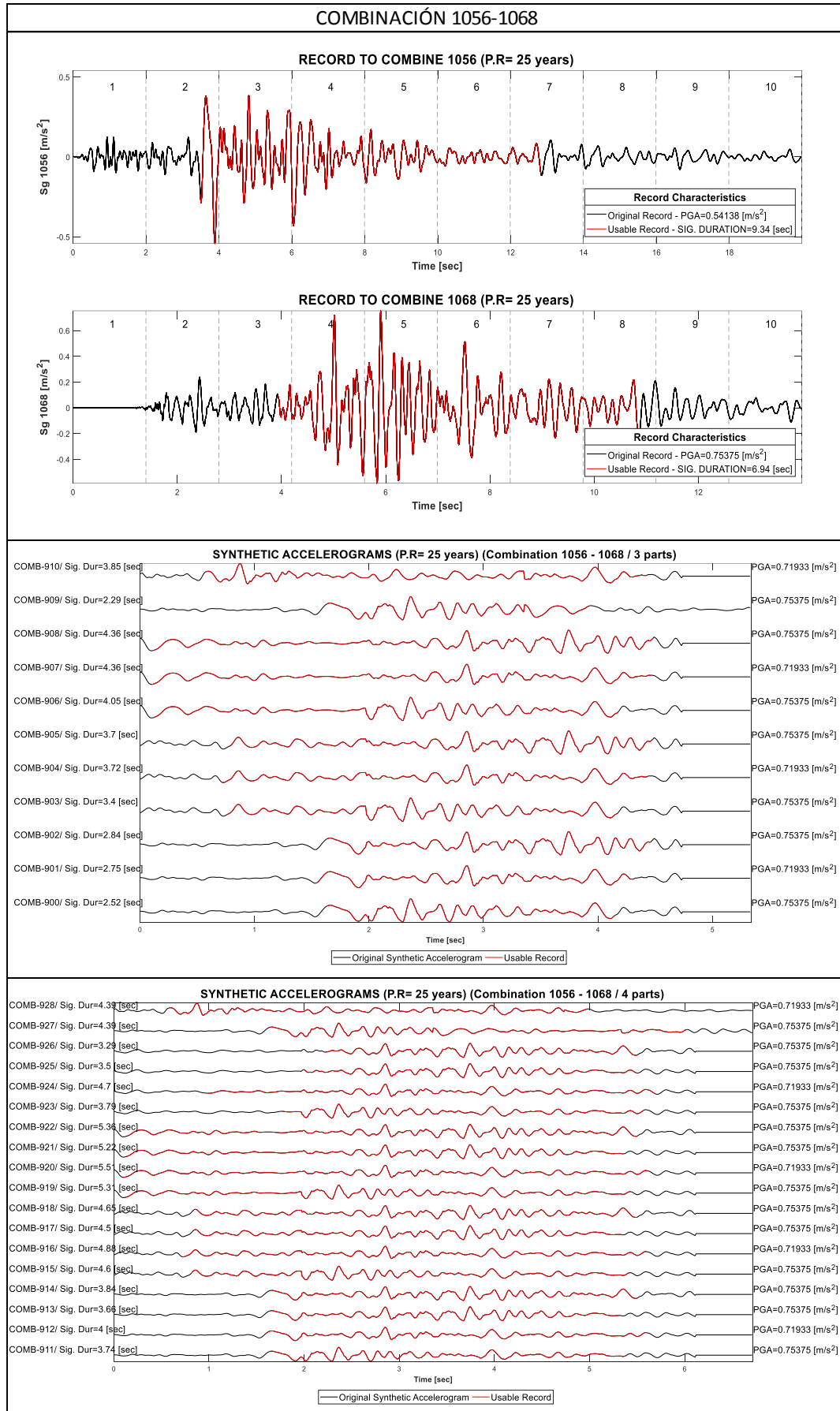
Anexo 11-47: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1070. (Elaboración propia)



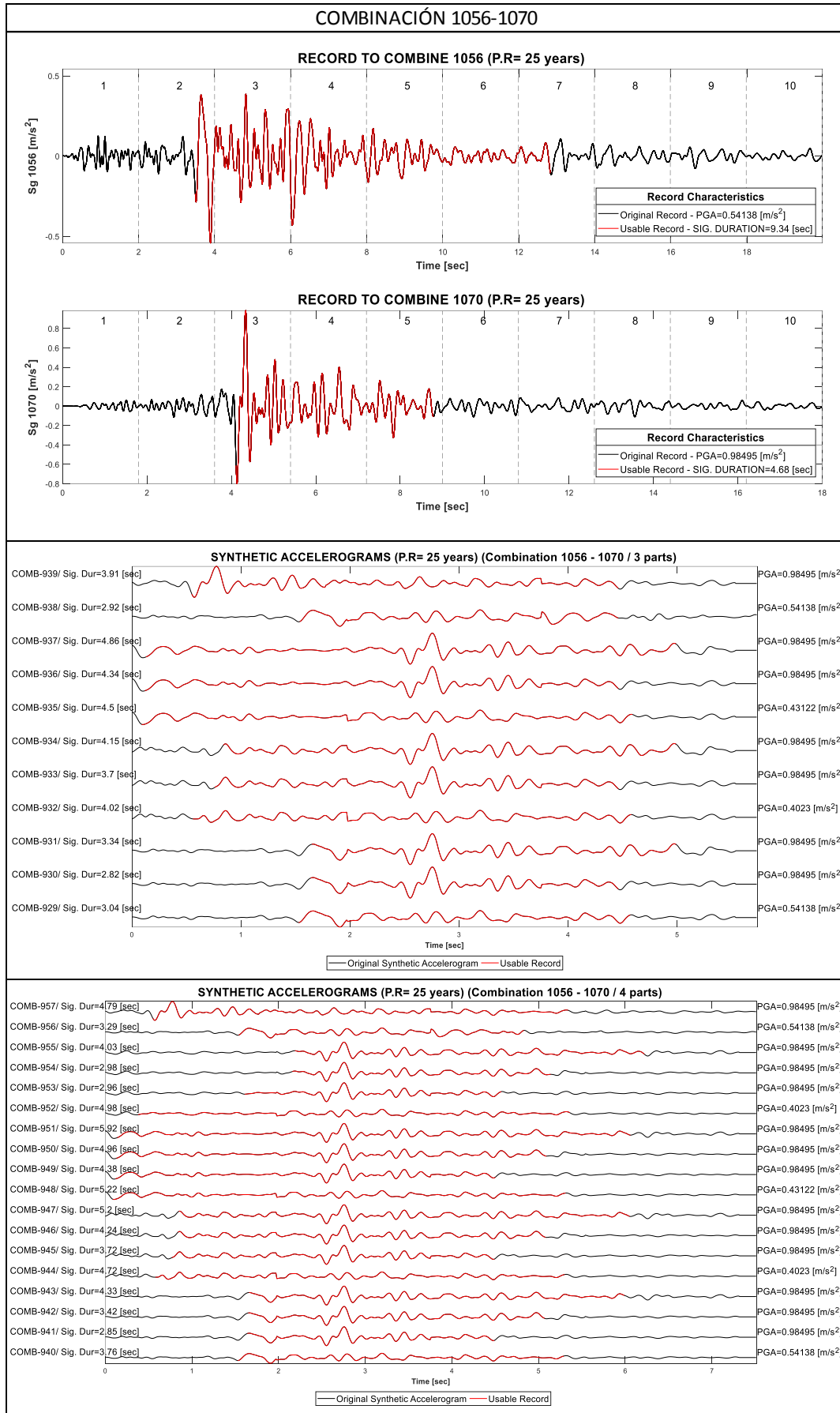
Anexo 11-48: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1055-1077. (Elaboración propia)



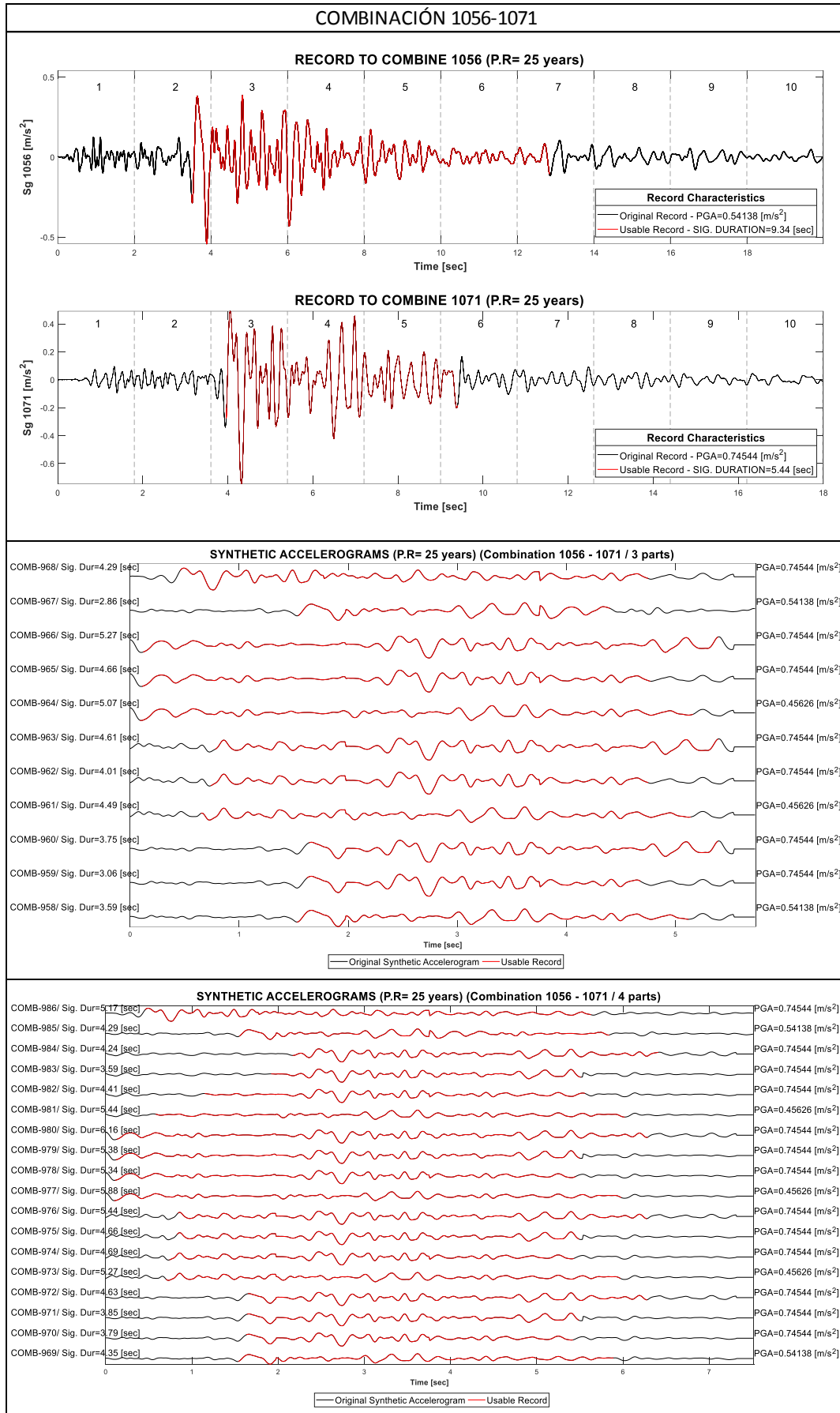
Anexo 11-49: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1056-1067. (Elaboración propia)



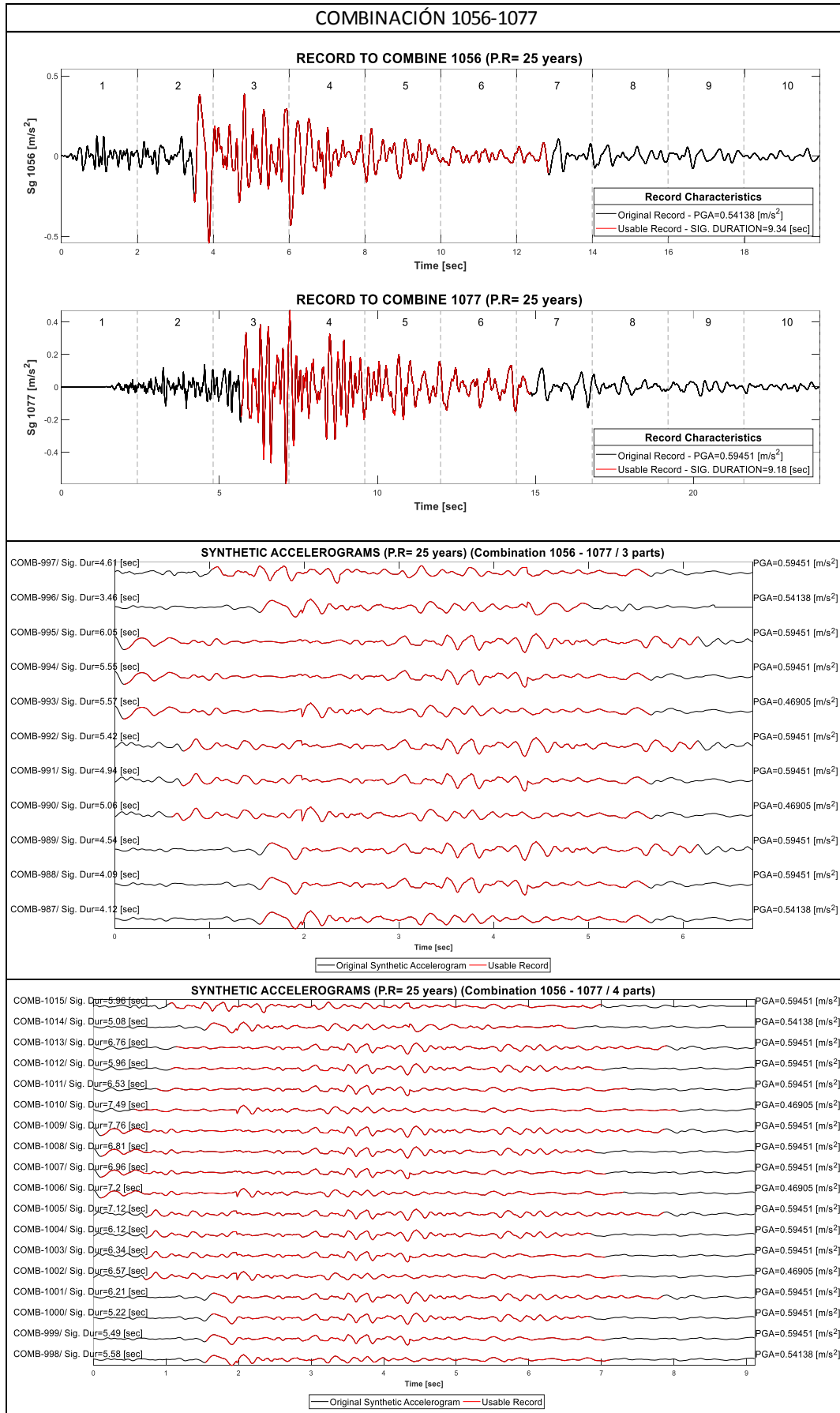
Anexo 11-50: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1056-1068. (Elaboración propia)



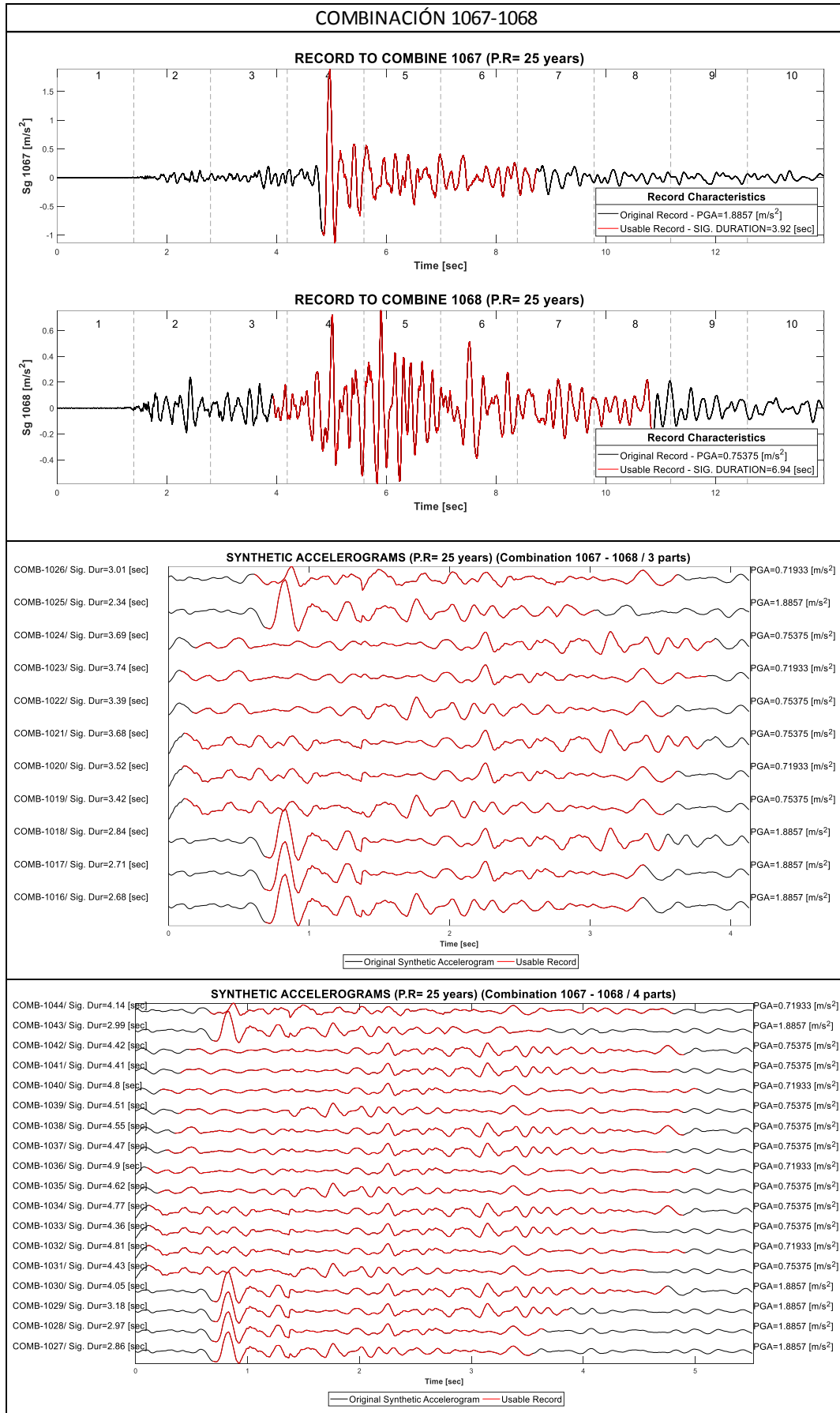
Anexo 11-51: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1056-1070. (Elaboración propia)



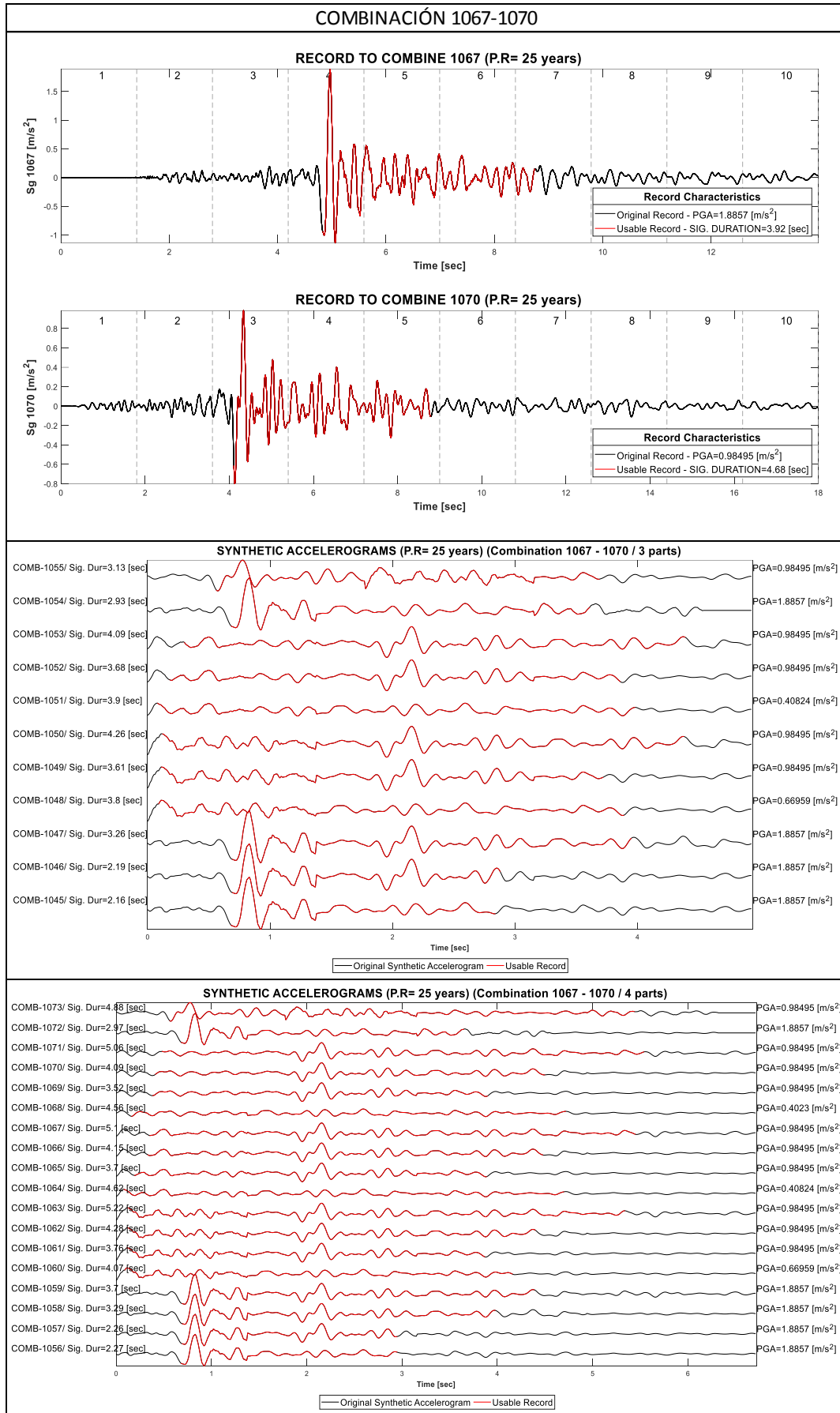
Anexo 11-52: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1056-1071. (Elaboración propia)



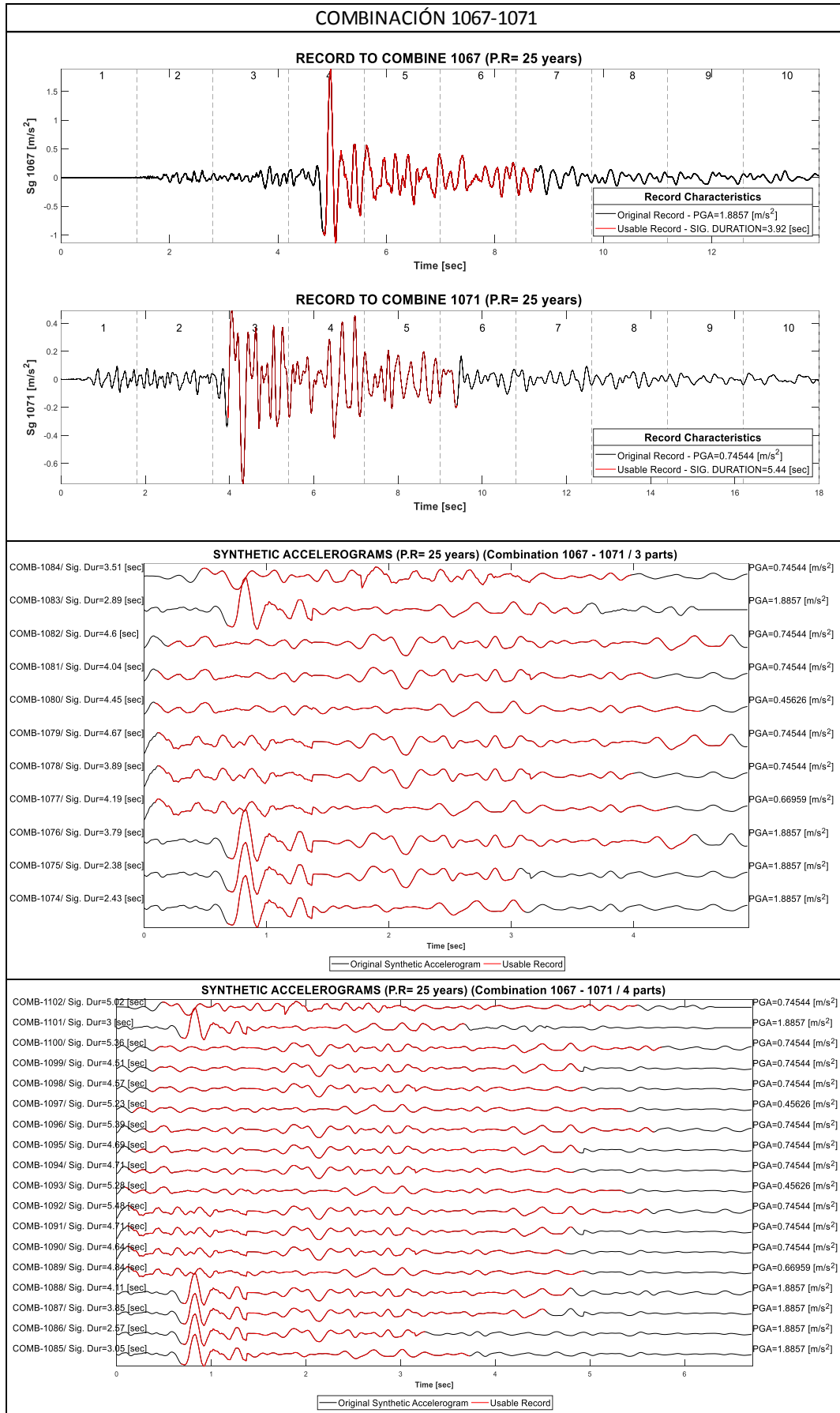
Anexo 11-53: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1056-1077. (Elaboración propia)



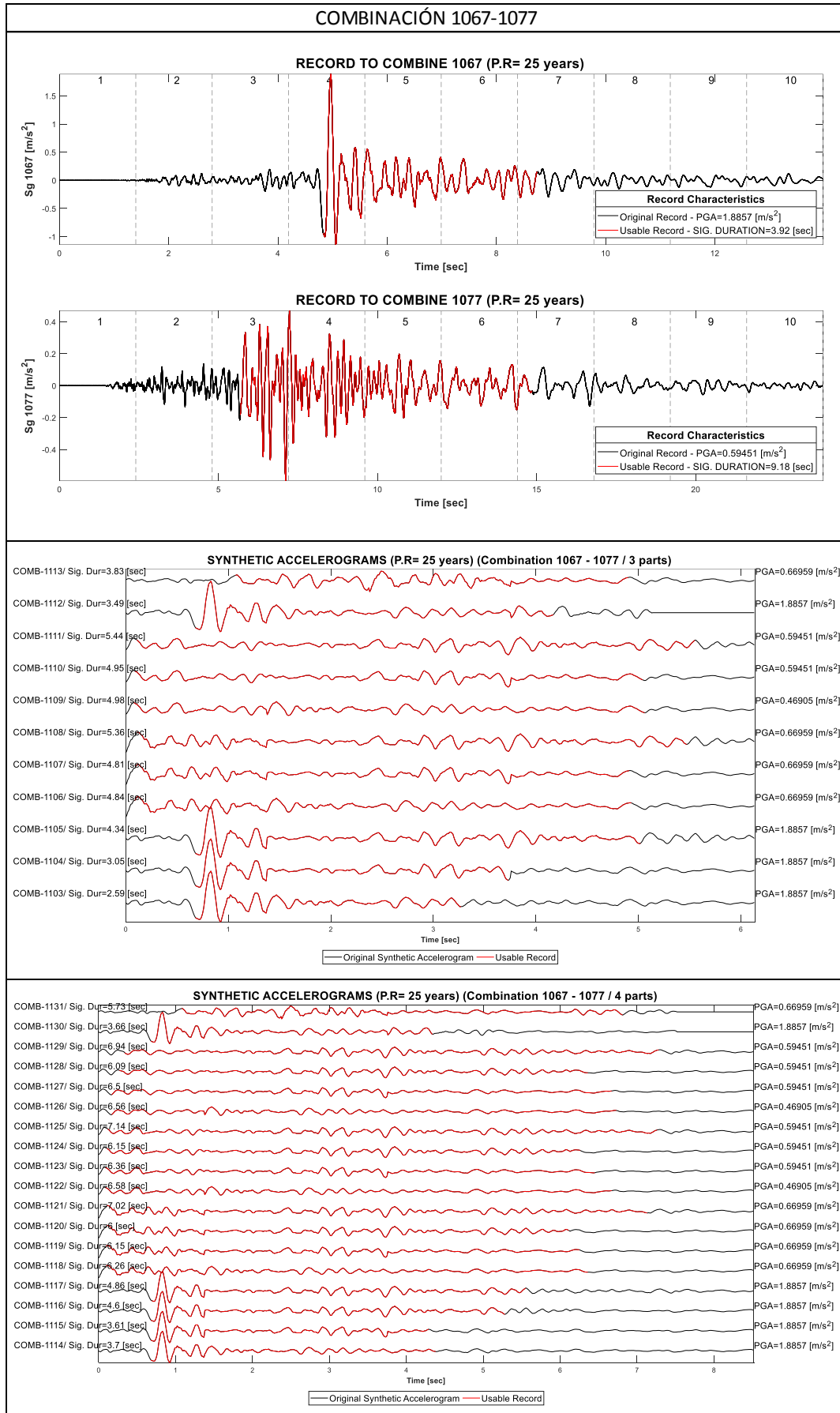
Anexo 11-54: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1067-1068. (Elaboración propia)



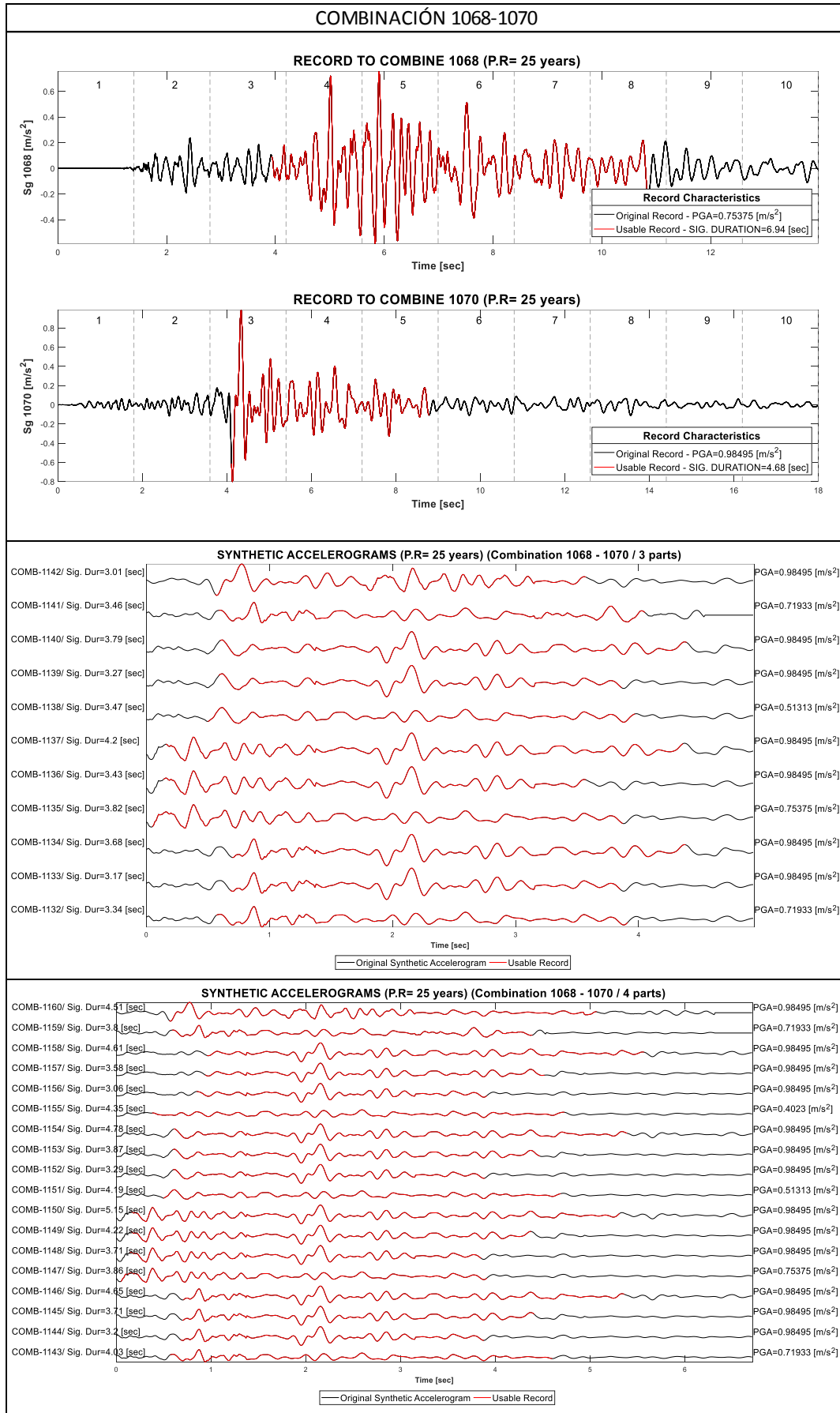
Anexo 11-55: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1067-1070. (Elaboración propia)



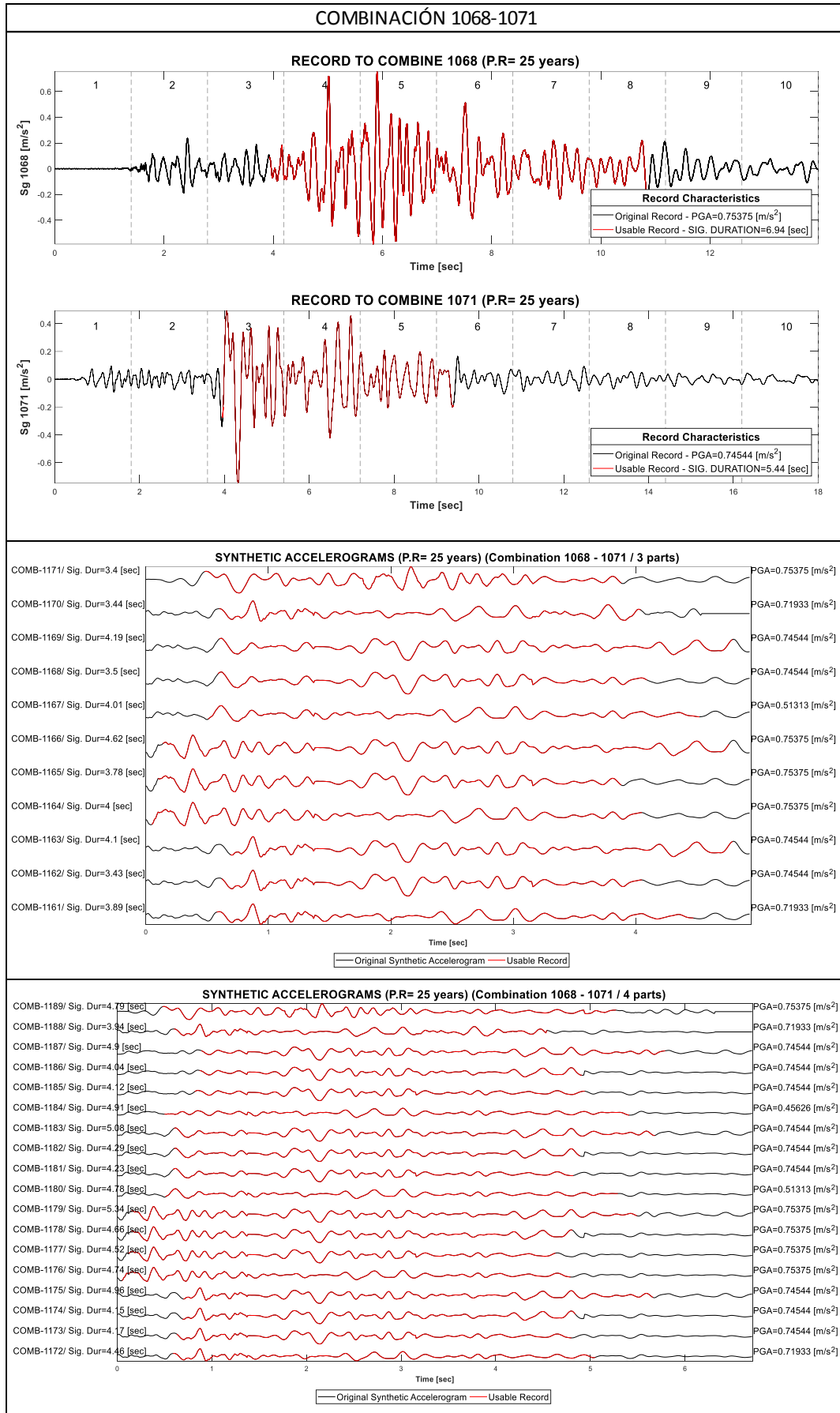
Anexo 11-56: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1067-1071. (Elaboración propia)



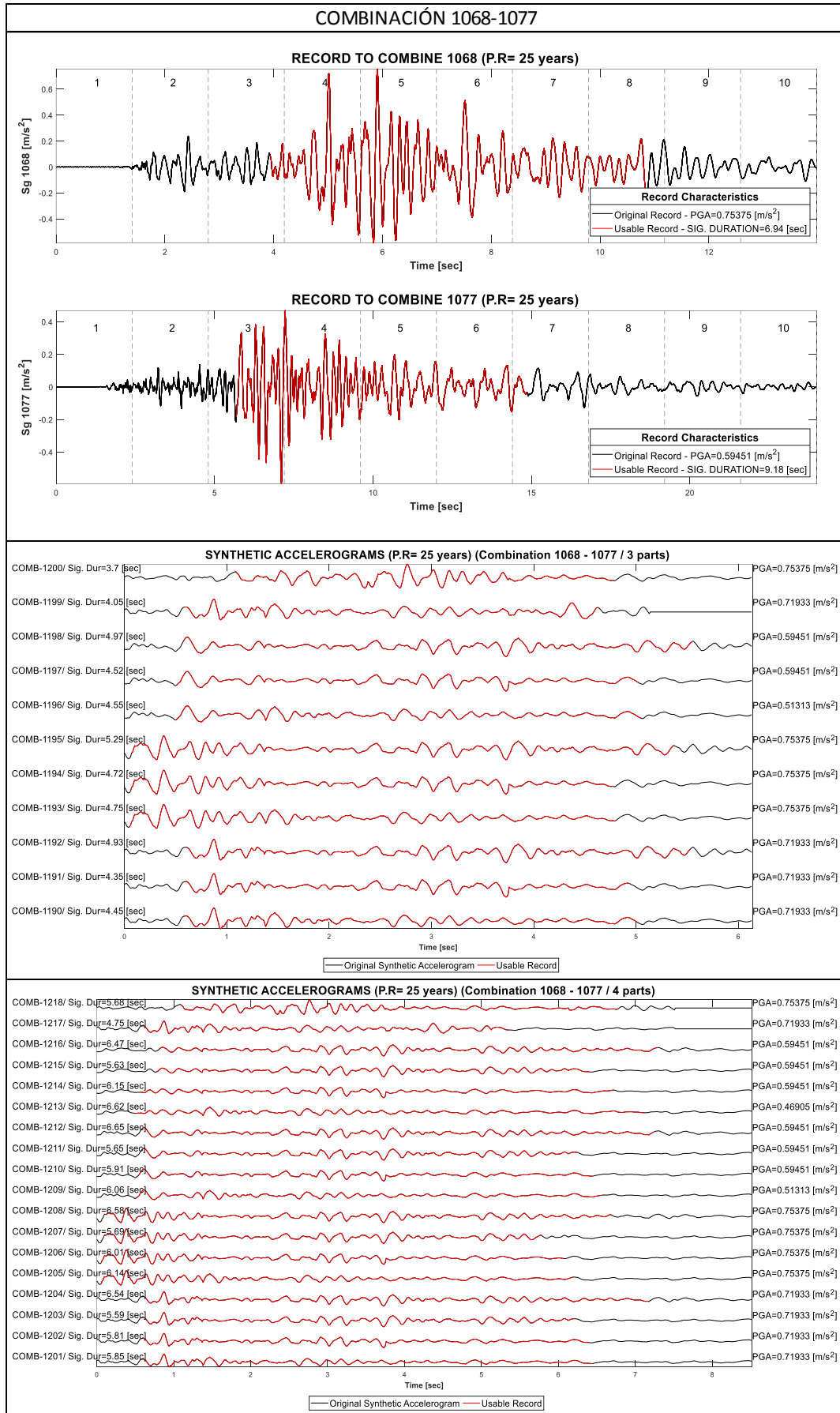
Anexo 11-57: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1067-1077. (Elaboración propia)



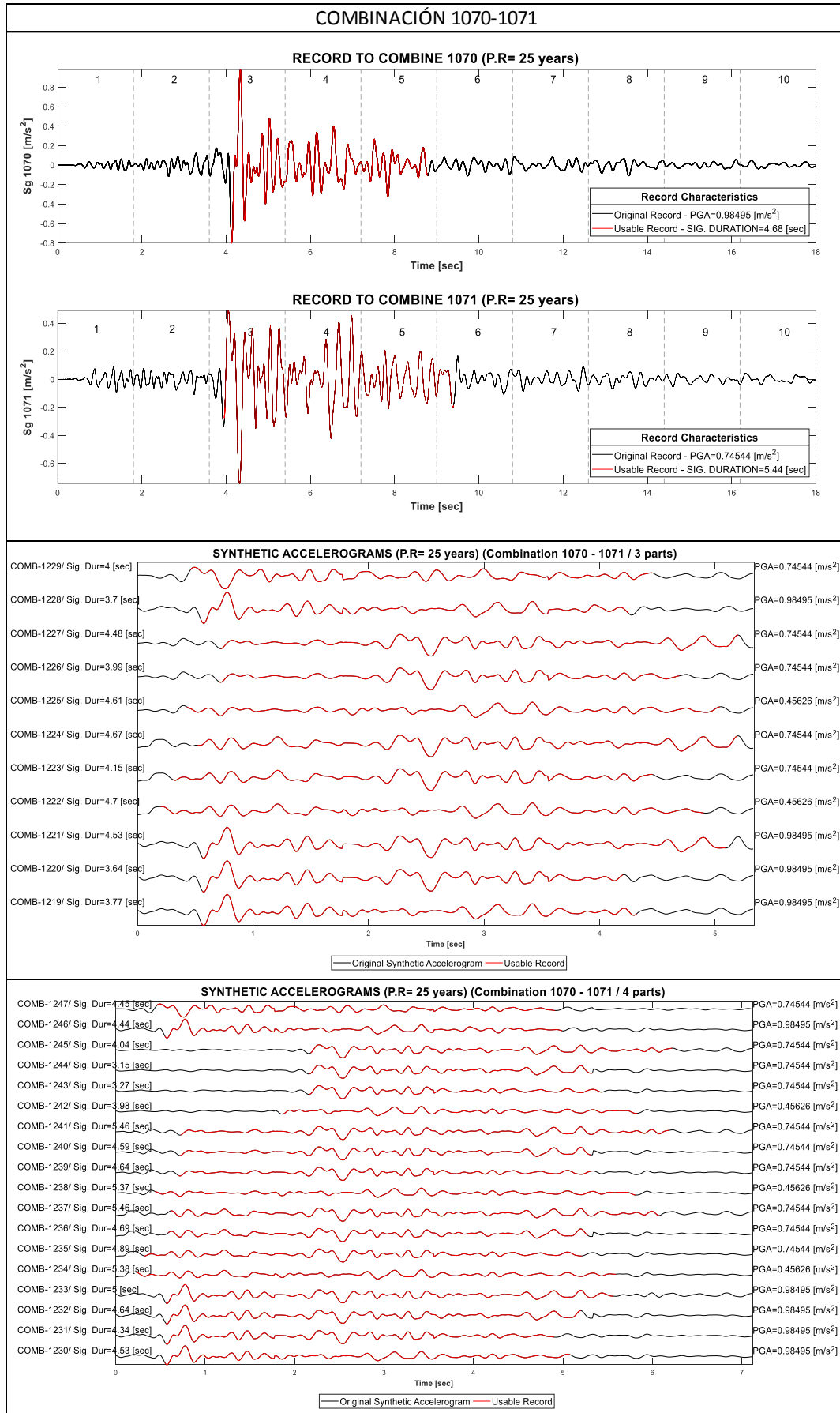
Anexo 11-58: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1068-1070. (Elaboración propia)



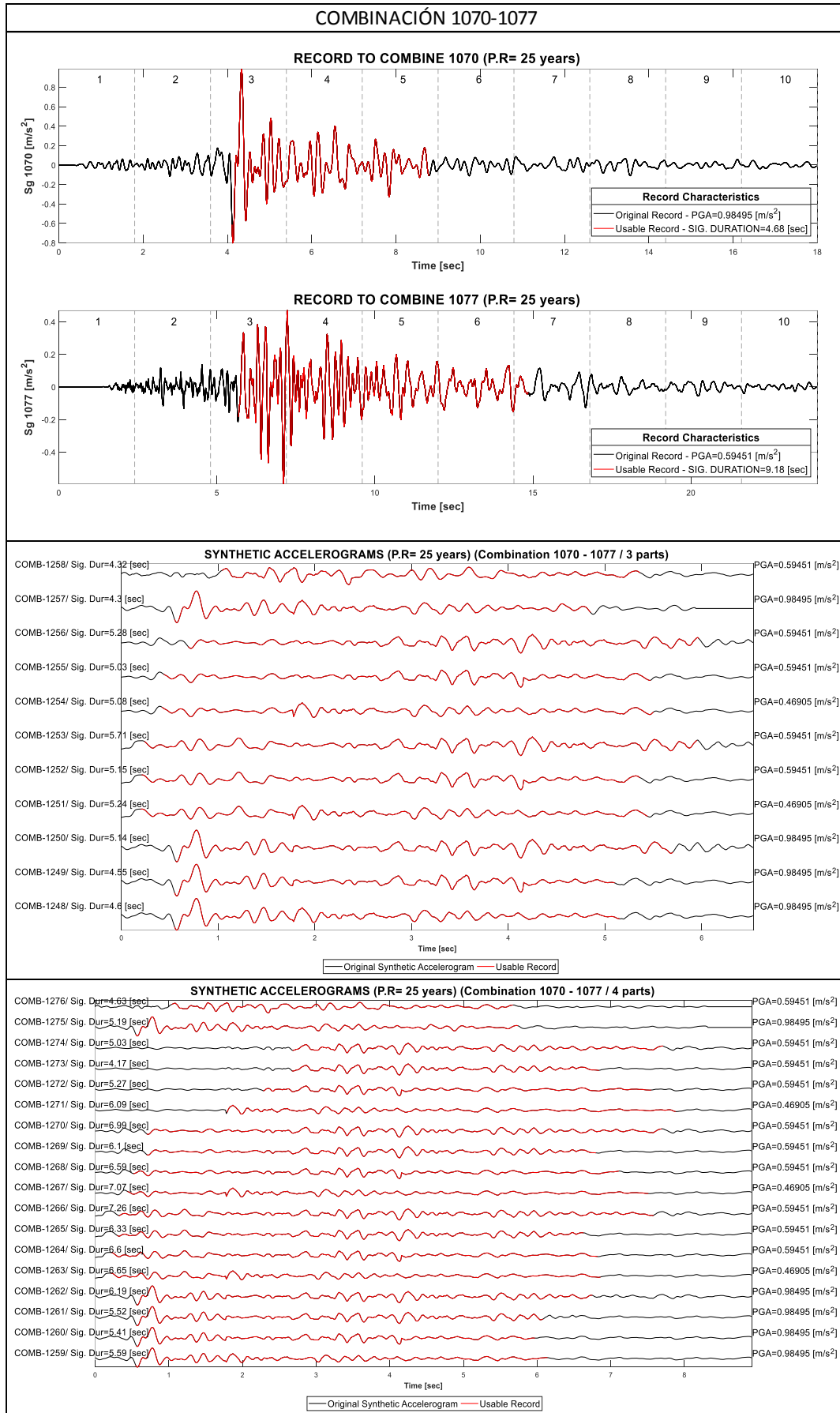
Anexo 11-59: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1068-1071. (Elaboración propia)



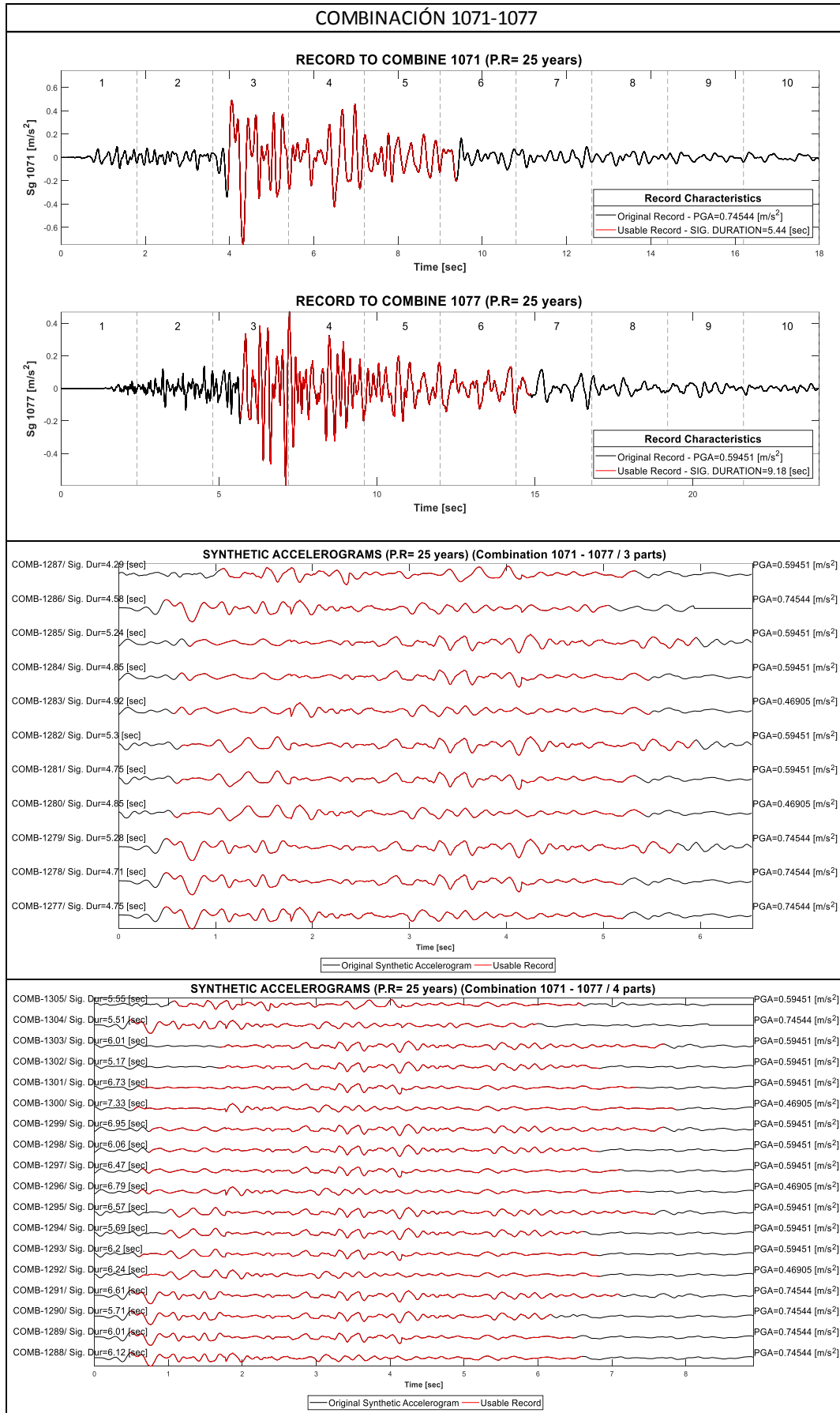
Anexo 11-60: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1068-1077. (Elaboración propia)



Anexo 11-61: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1070-1071. (Elaboración propia)



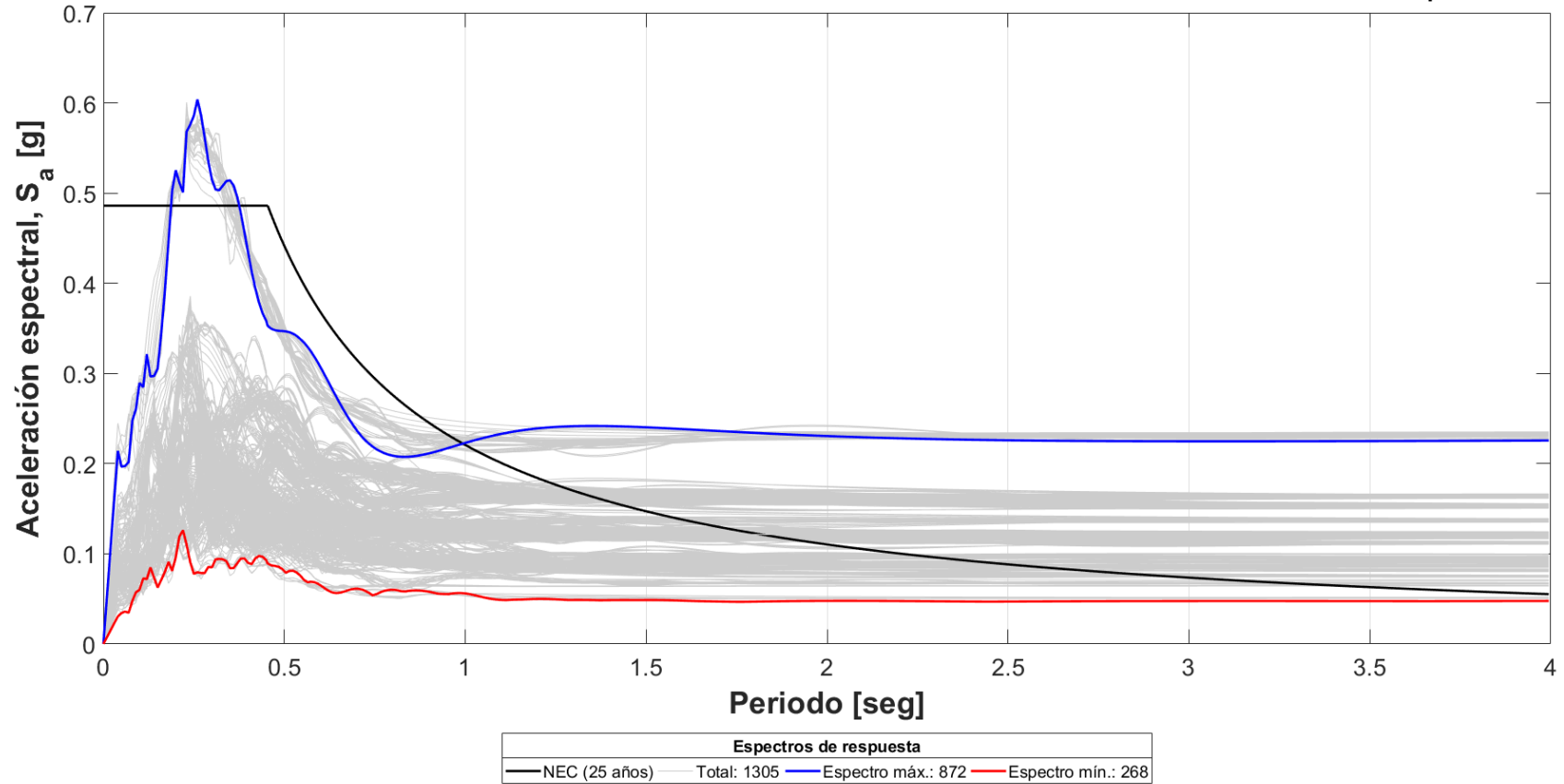
Anexo 11-62: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1070-1077. (Elaboración propia)



Anexo 11-63: Acelerogramas sintéticos- combinación registros reales 1071-1077. (Elaboración propia)

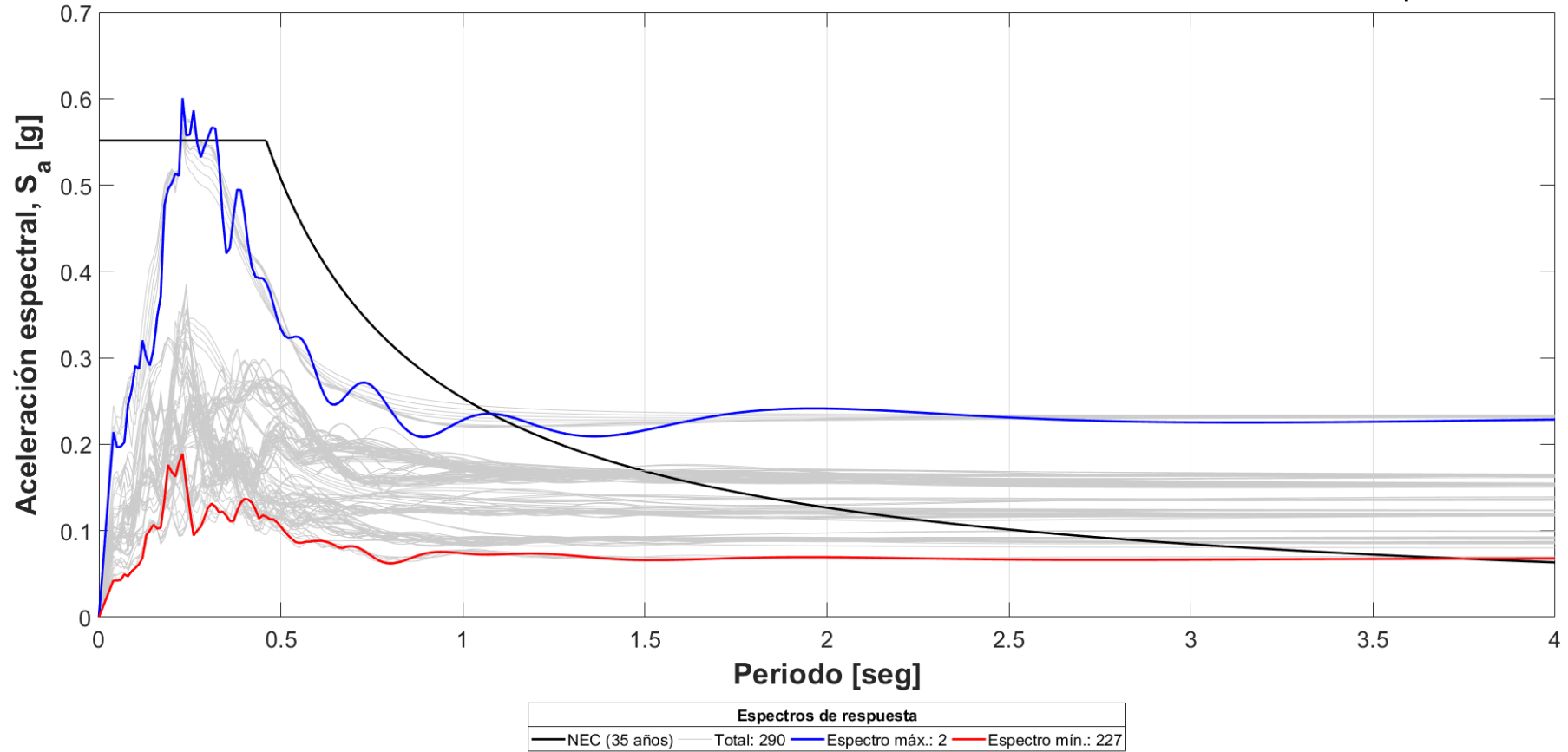
6.12 Espectros de respuesta de acelerogramas sintéticos

ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA BASE DE DATOS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS ( $T_r = 25$  AÑOS)



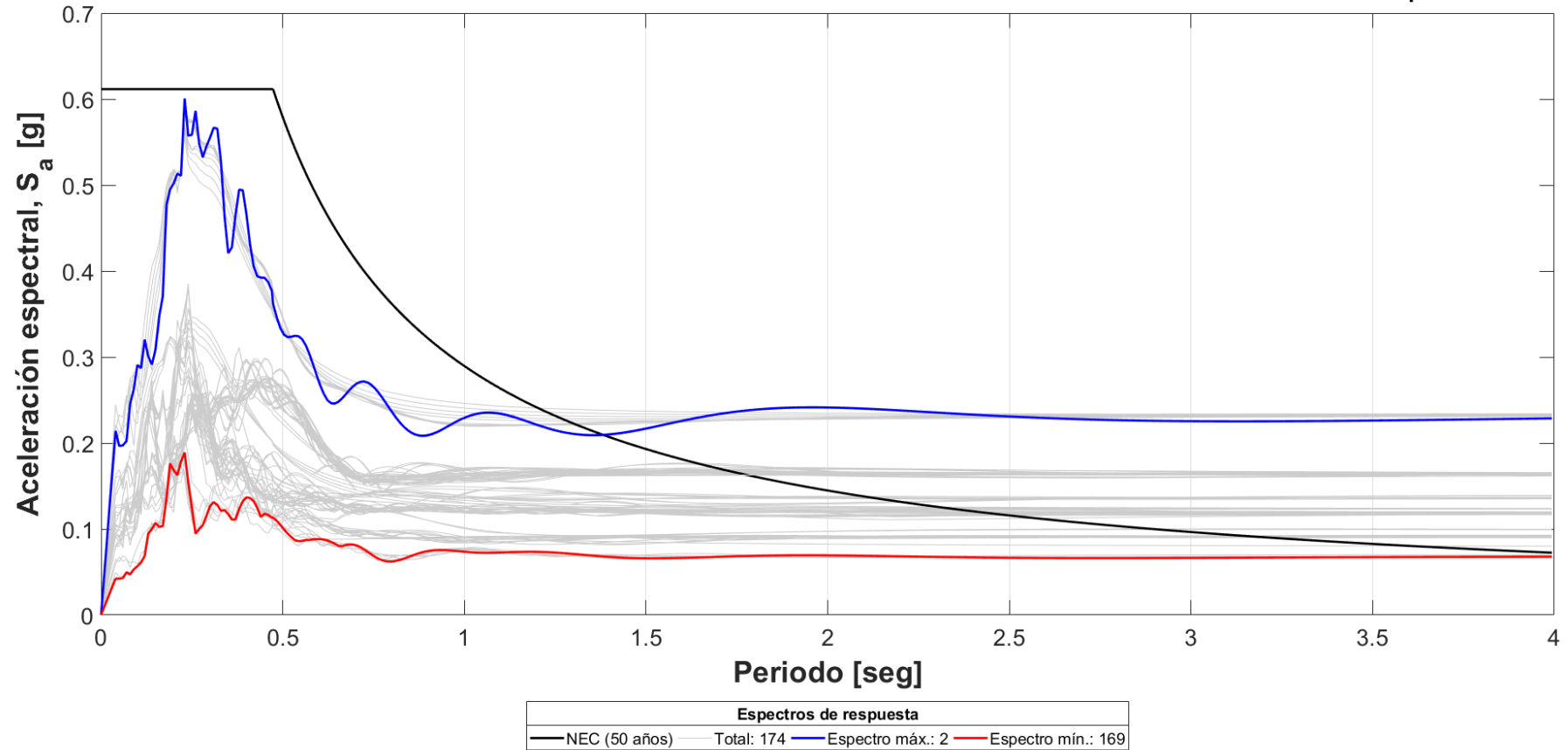
Anexo 12-1: Espectros de respuesta de Acelerogramas Sintéticos generados para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA BASE DE DATOS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS ( $T_r = 35$  AÑOS)



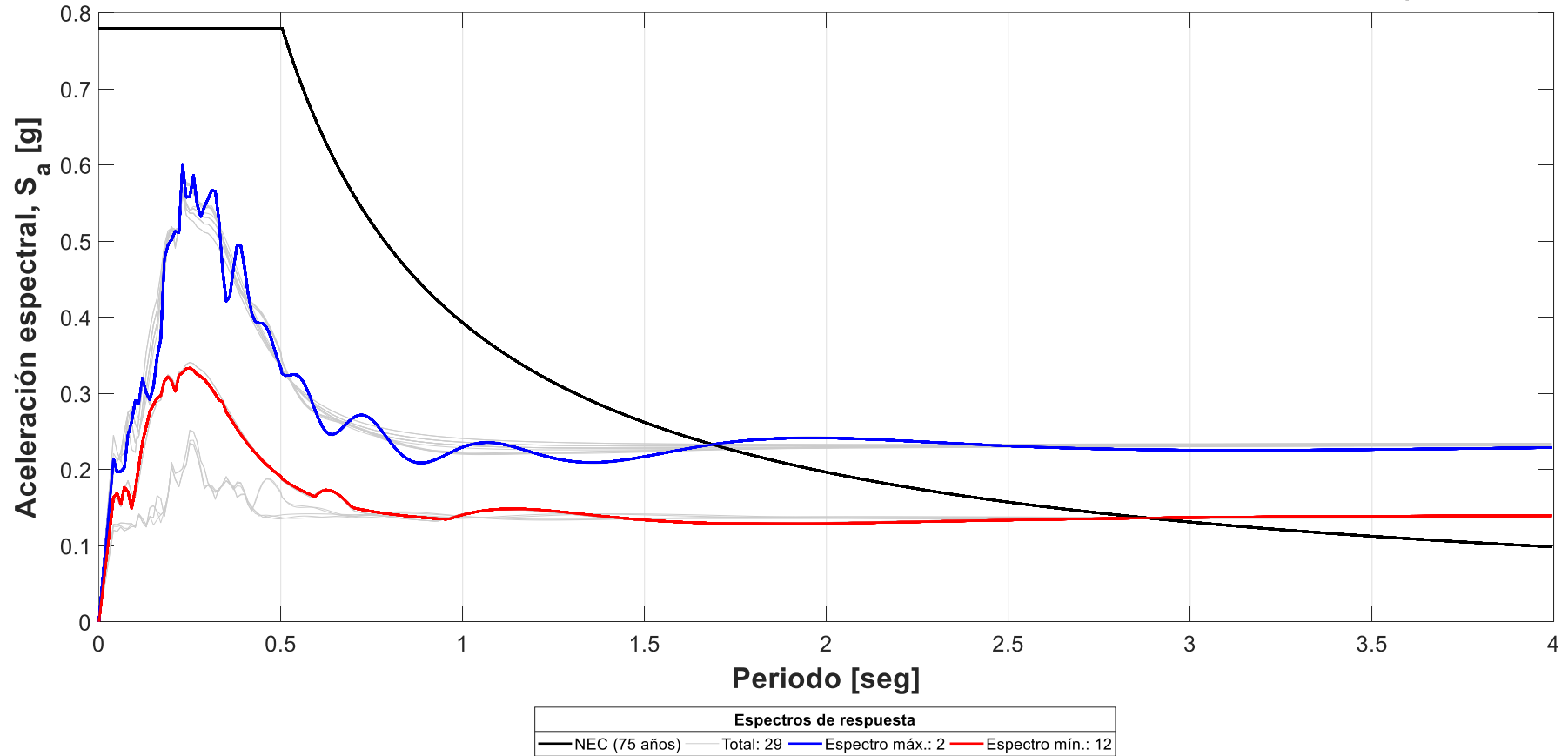
Anexo 12-2: Espectros de respuesta de Acelerogramas Sintéticos generados para periodo de retorno 35 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA BASE DE DATOS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS ( $T_r = 50$  AÑOS)



Anexo 12-3: Espectros de respuesta de Acelerogramas Sintéticos generados para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

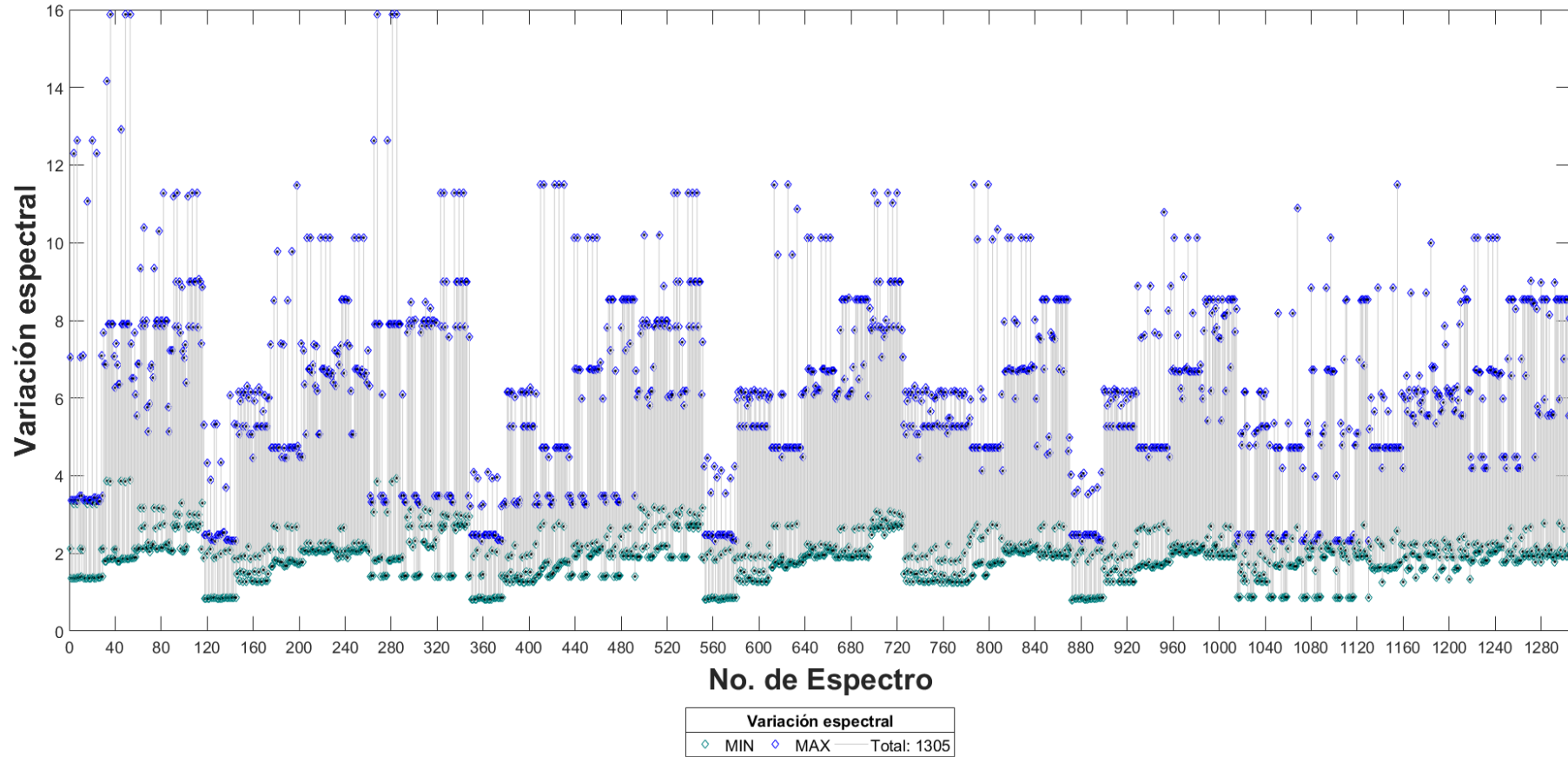
ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA BASE DE DATOS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS ( $T_r = 75$  AÑOS)



Anexo 12-4: Espectros de respuesta de Acelerogramas Sintéticos generados para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

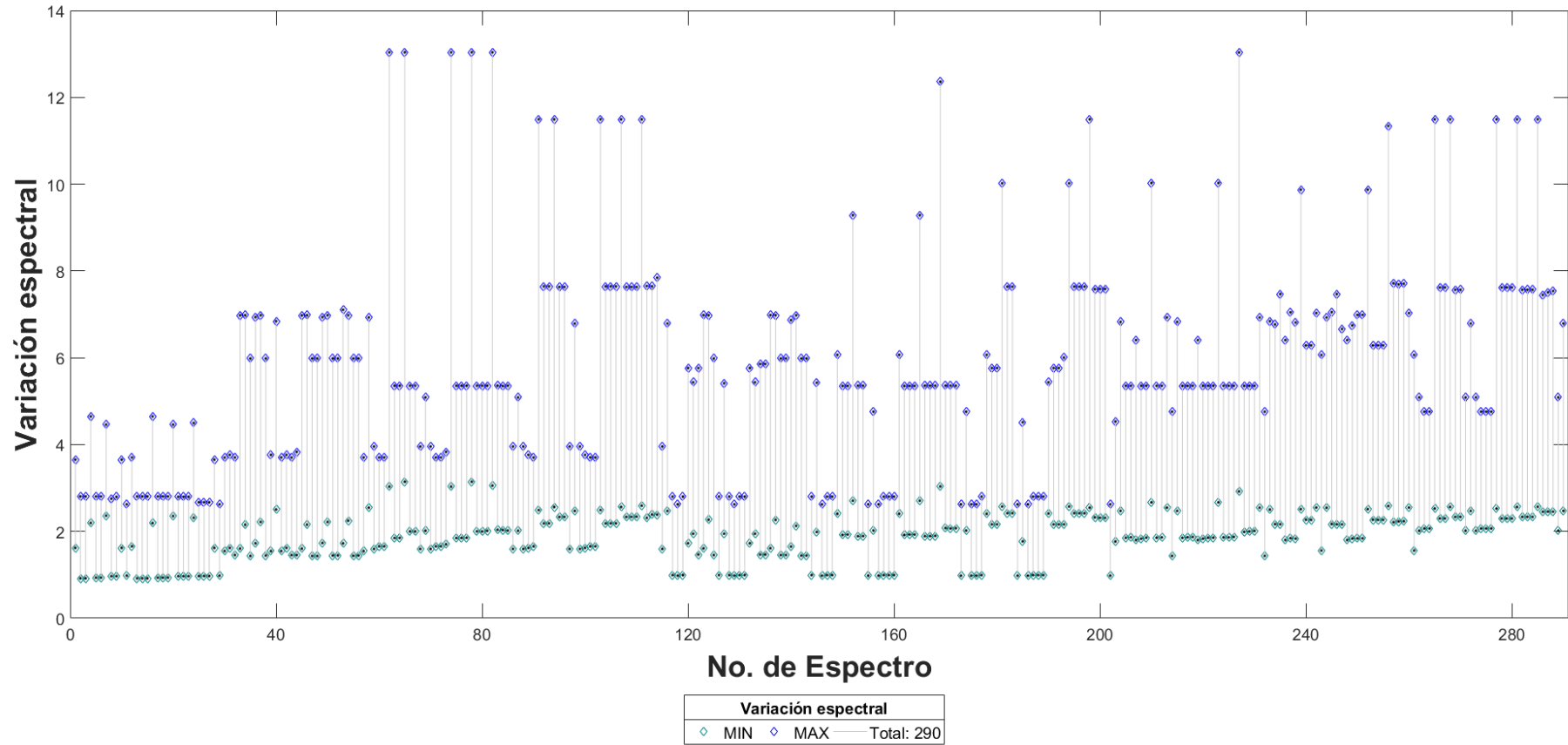
6.13 Variación espectral acelerogramas sintéticos

VARIACIÓN ESPECTRAL - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (meseta) ( $T_r = 25$  AÑOS)



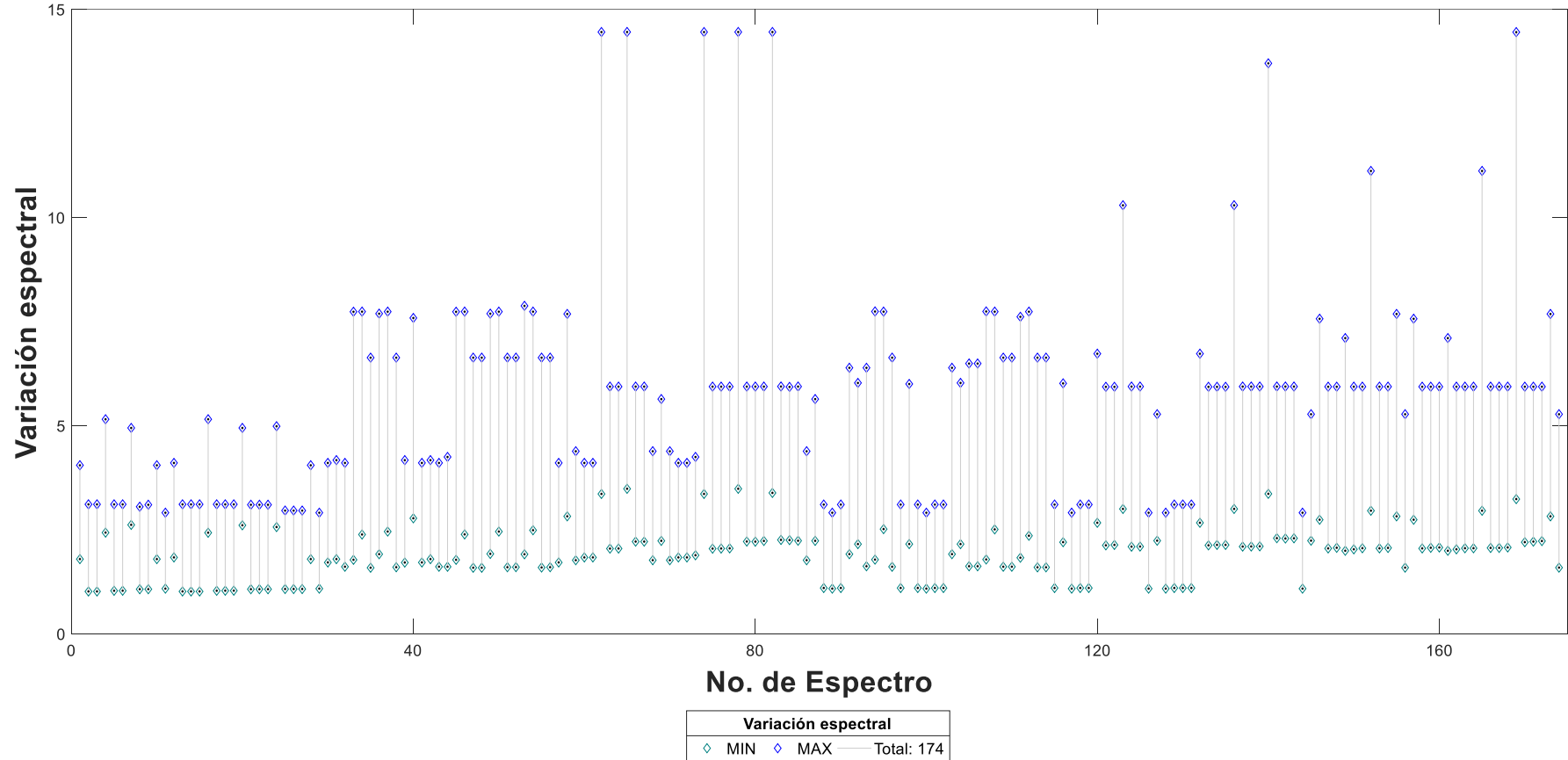
Anexo 13-1: Variación espectral de acelerogramas sintéticos para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

VARIACIÓN ESPECTRAL - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (meseta) ( $T_r = 35$  AÑOS)



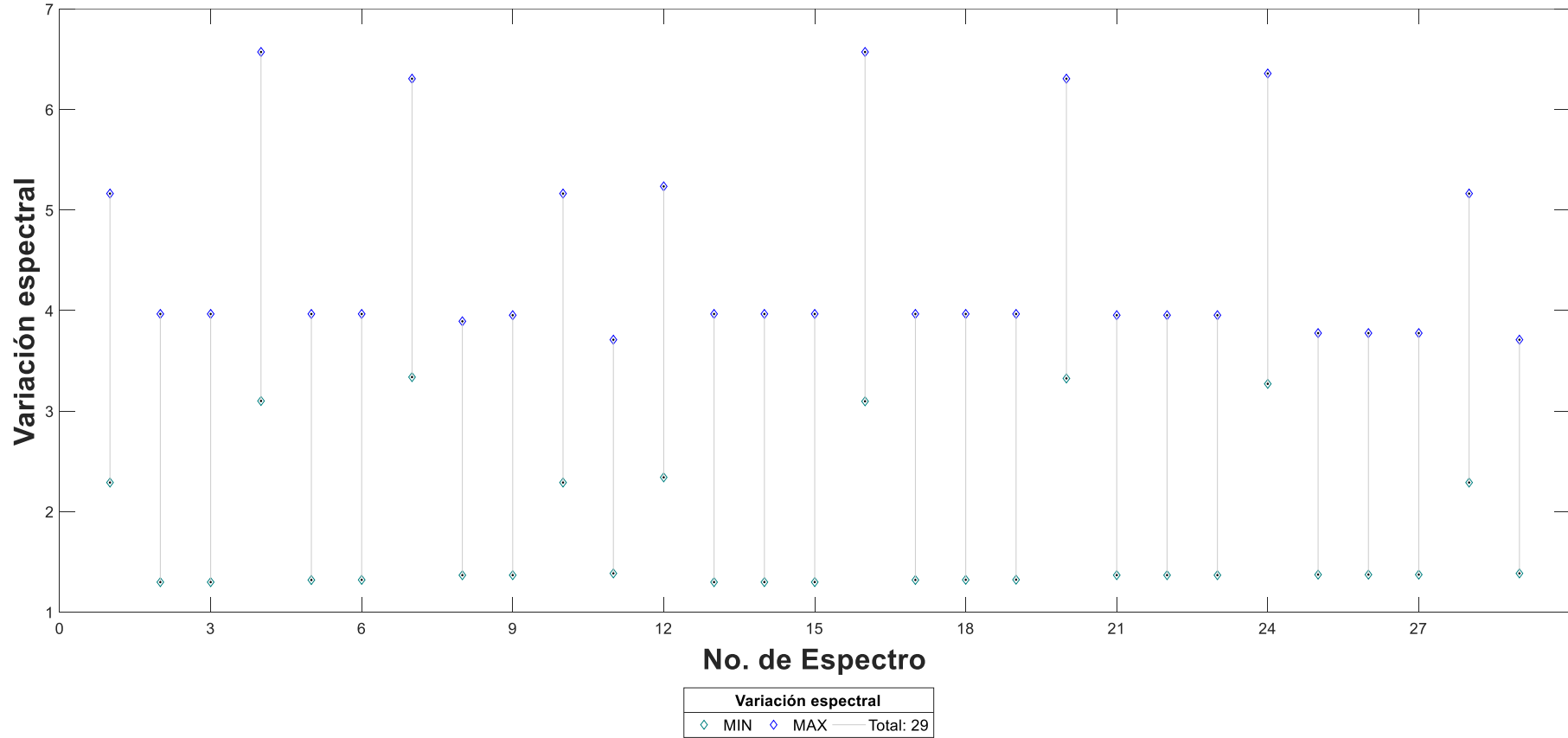
Anexo 13-2: Variación espectral de acelerogramas sintéticos para periodo de retorno 35 años. (Elaboración propia)

VARIACIÓN ESPECTRAL - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (meseta) ( $T_r = 50$  AÑOS)



Anexo 13-3: Variación espectral de acelerogramas sintéticos para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

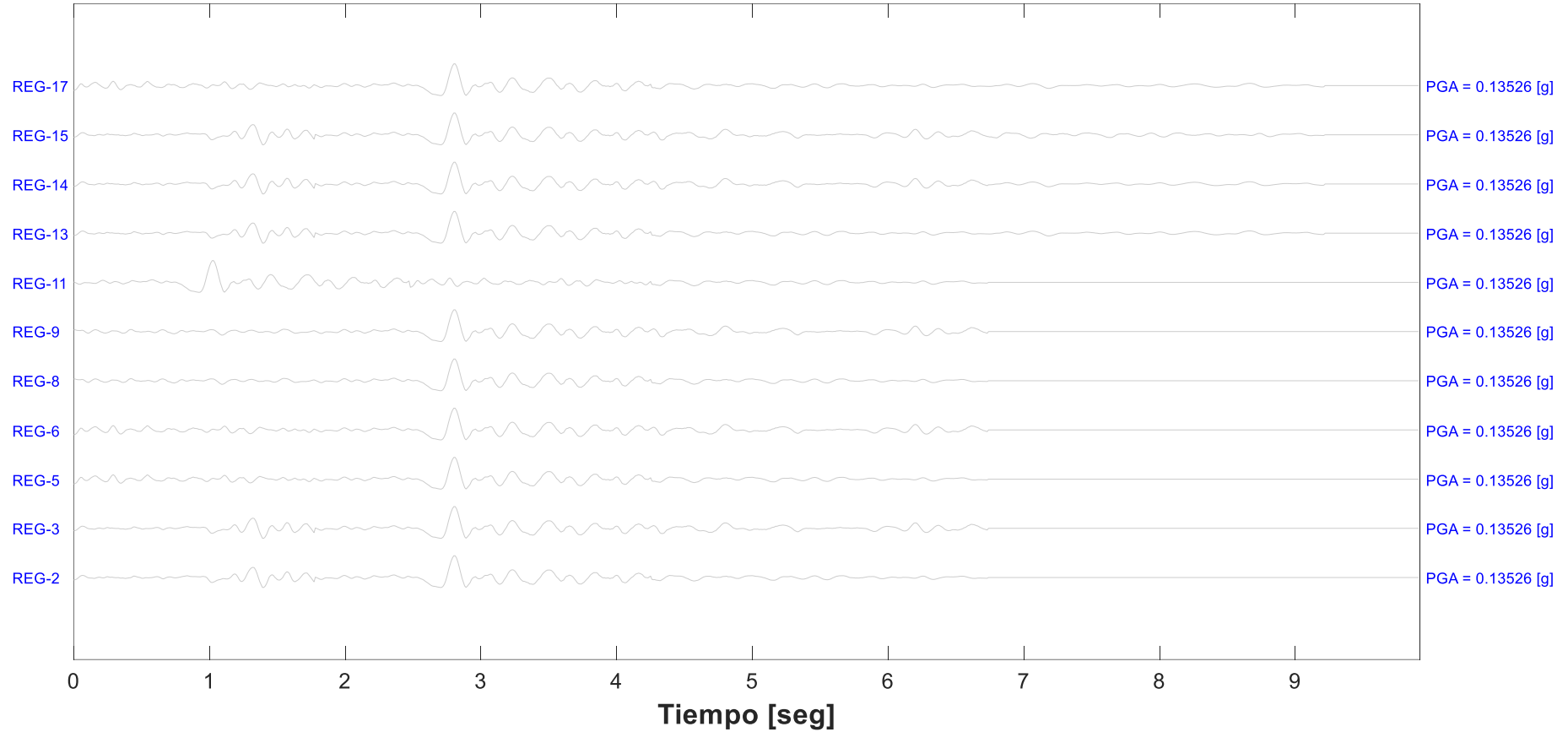
VARIACIÓN ESPECTRAL - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (meseta) ( $T_r = 75$  AÑOS)



Anexo 13-4: Variación espectral de acelerogramas sintéticos para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

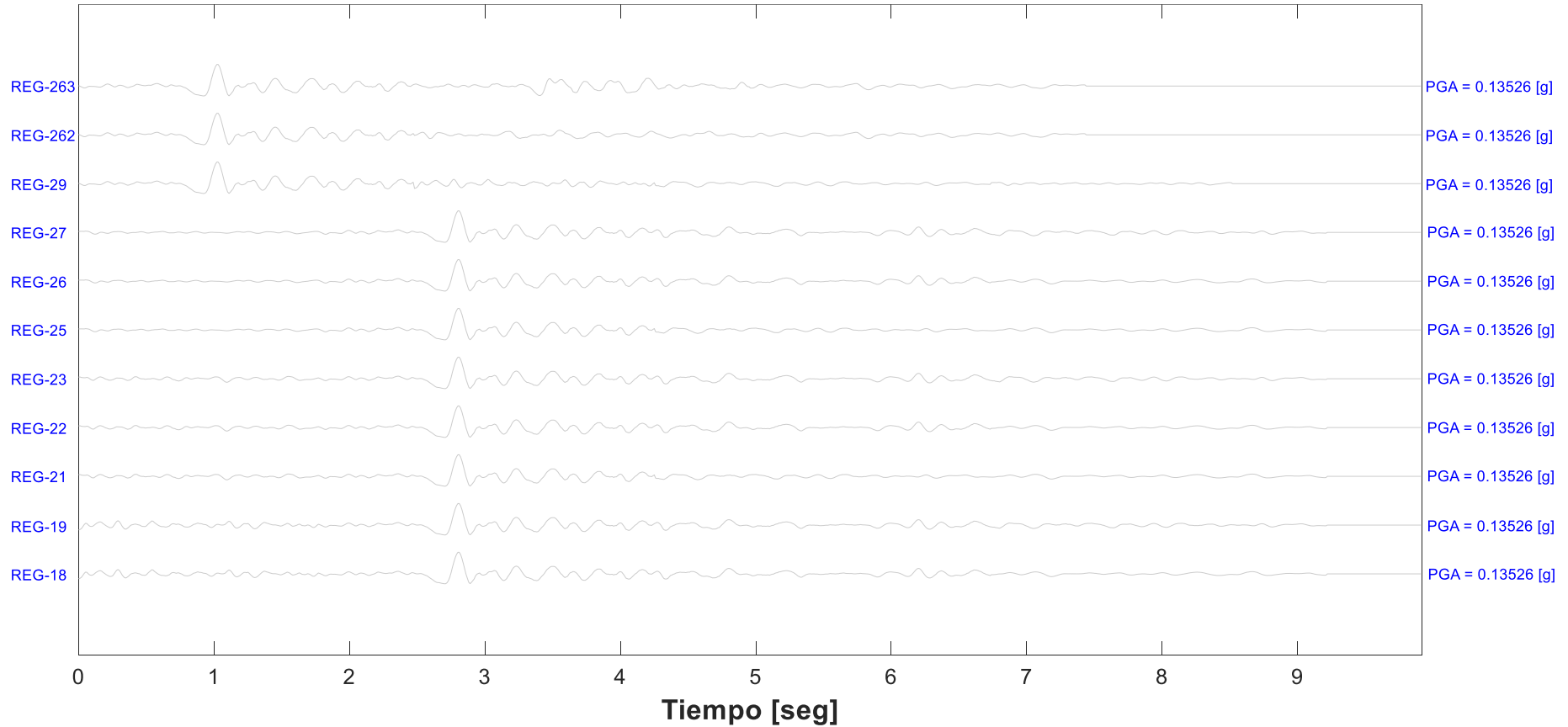
6.14 Acelerogramas sintéticos válidos

**ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)**



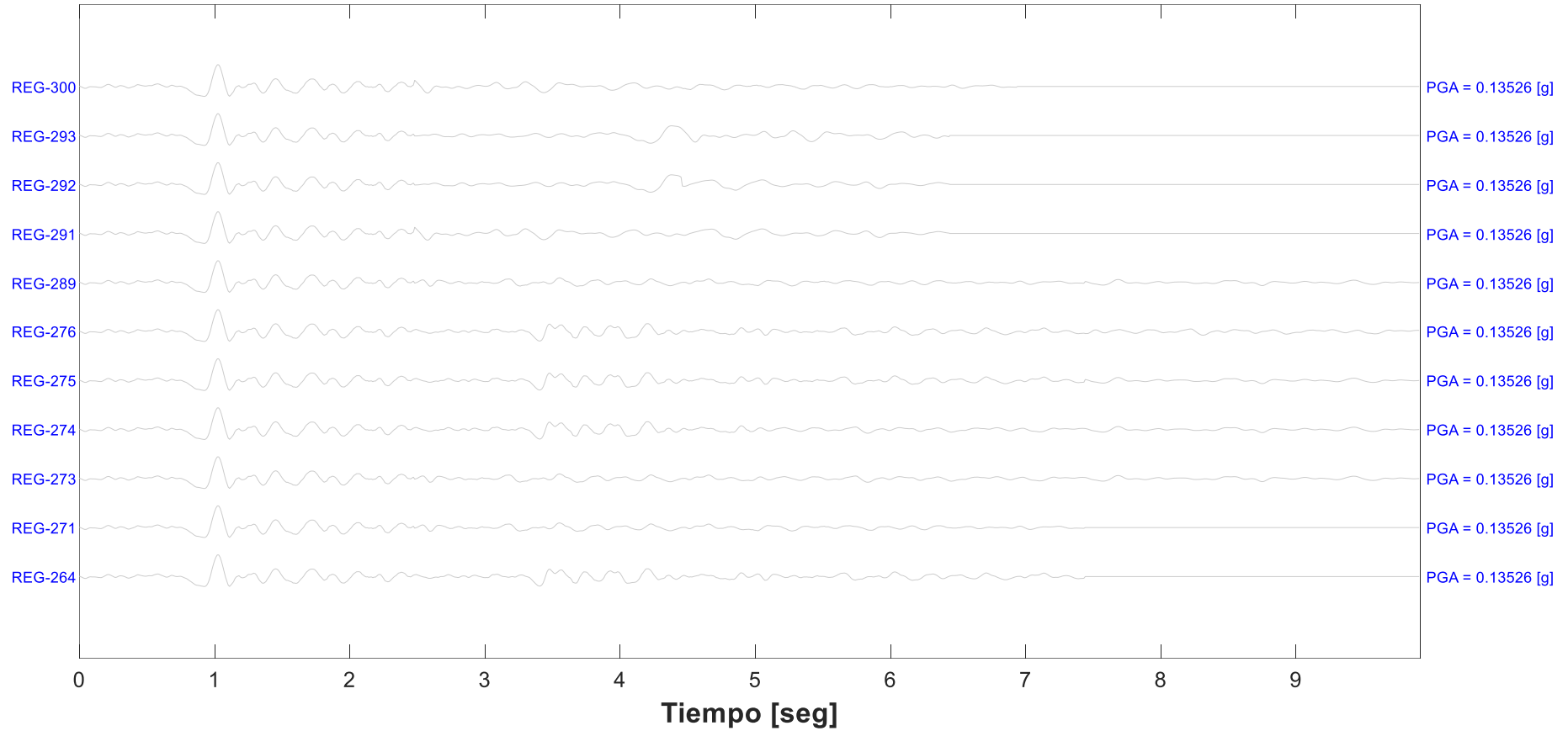
Anexo 14-1: Acelerogramas sintéticos válidos [1 - 11] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



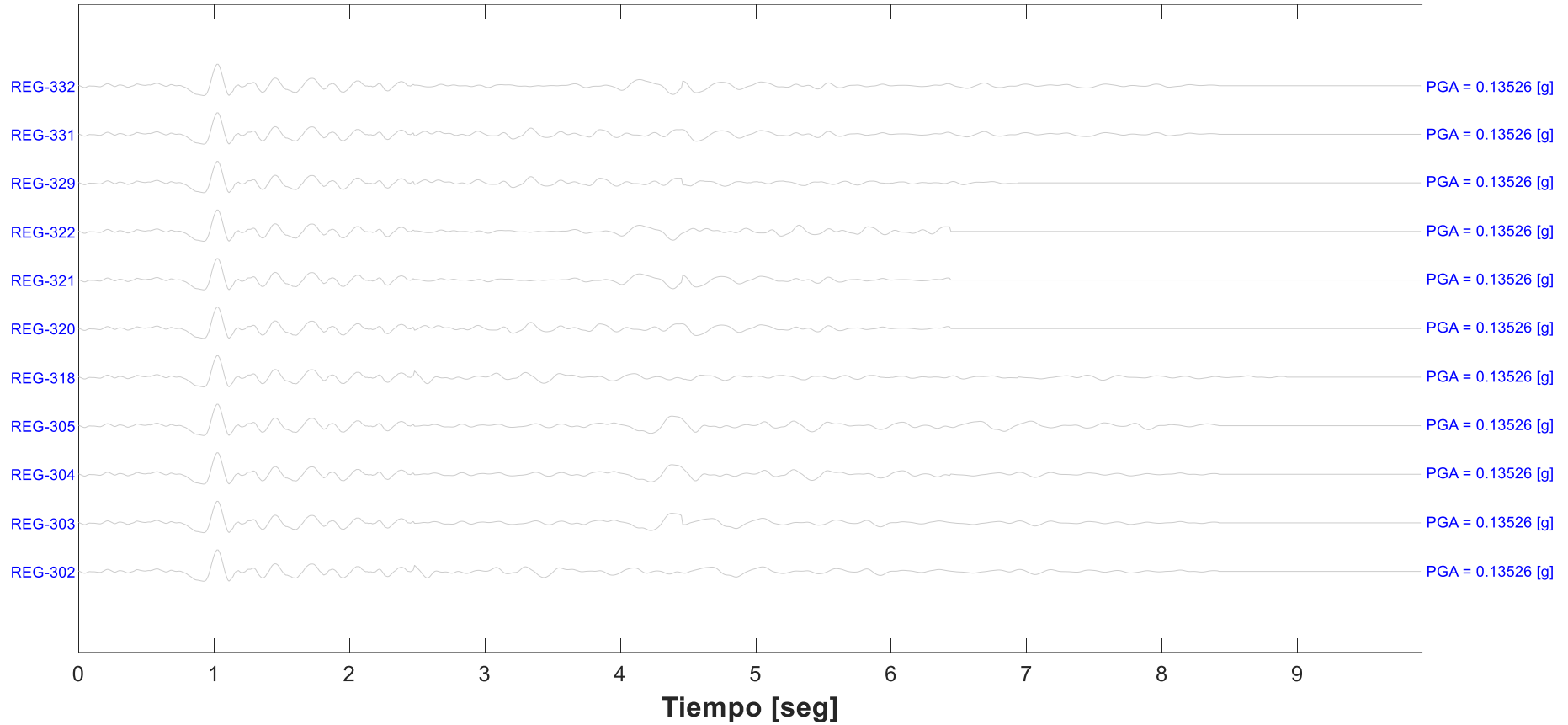
Anexo 14-2: Acelerogramas sintéticos válidos [12 - 22] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



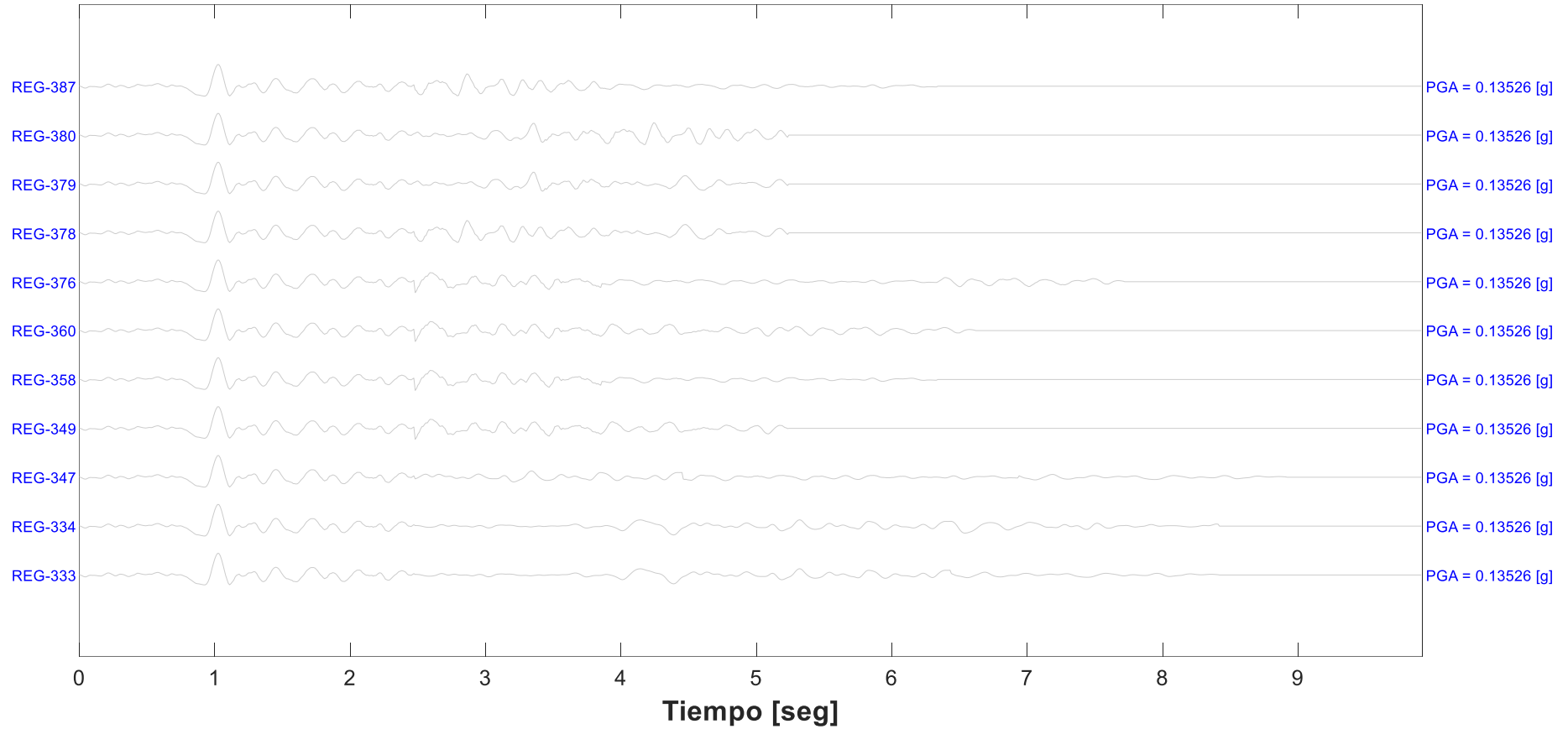
Anexo 14-3: Acelerogramas sintéticos válidos [23 - 33] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



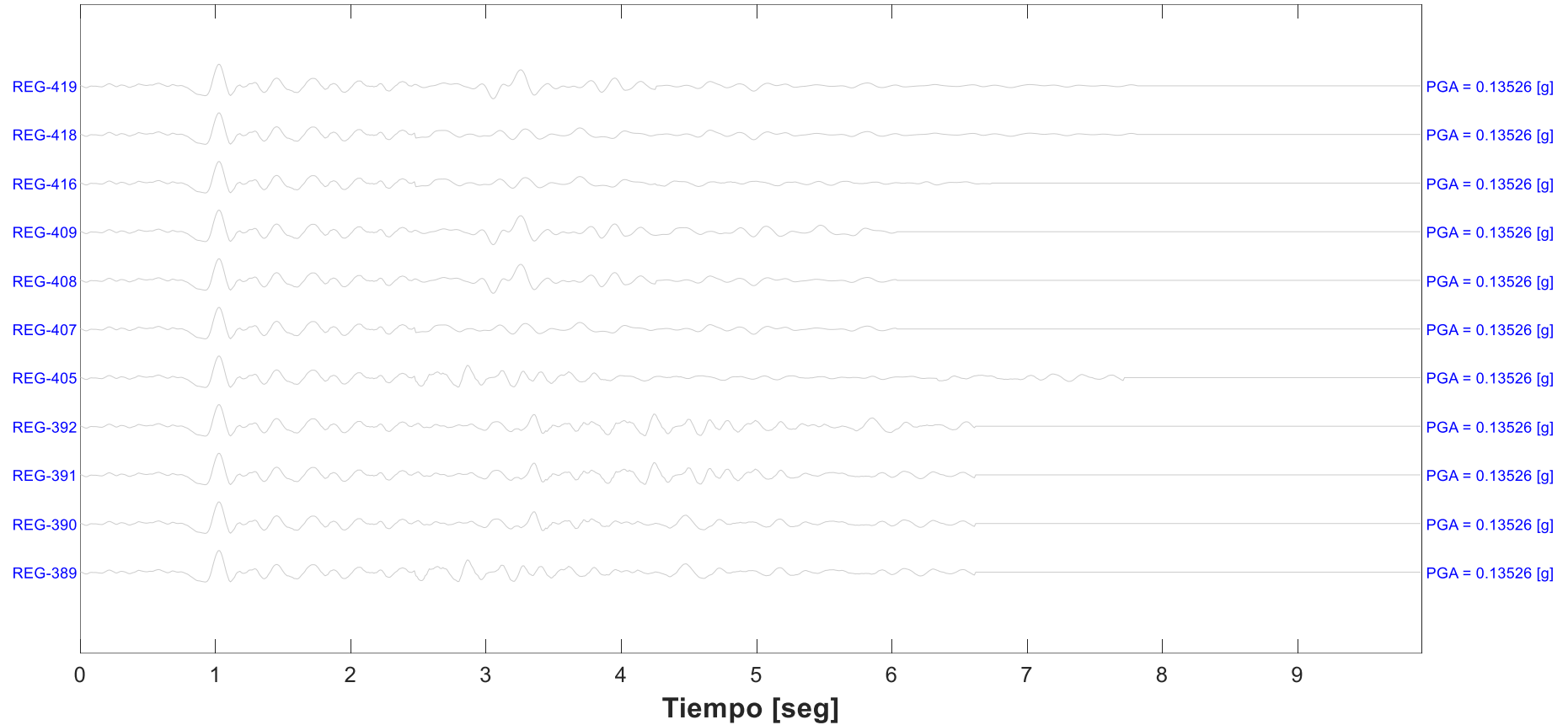
Anexo 14-4: Acelerogramas sintéticos válidos [34 - 44] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



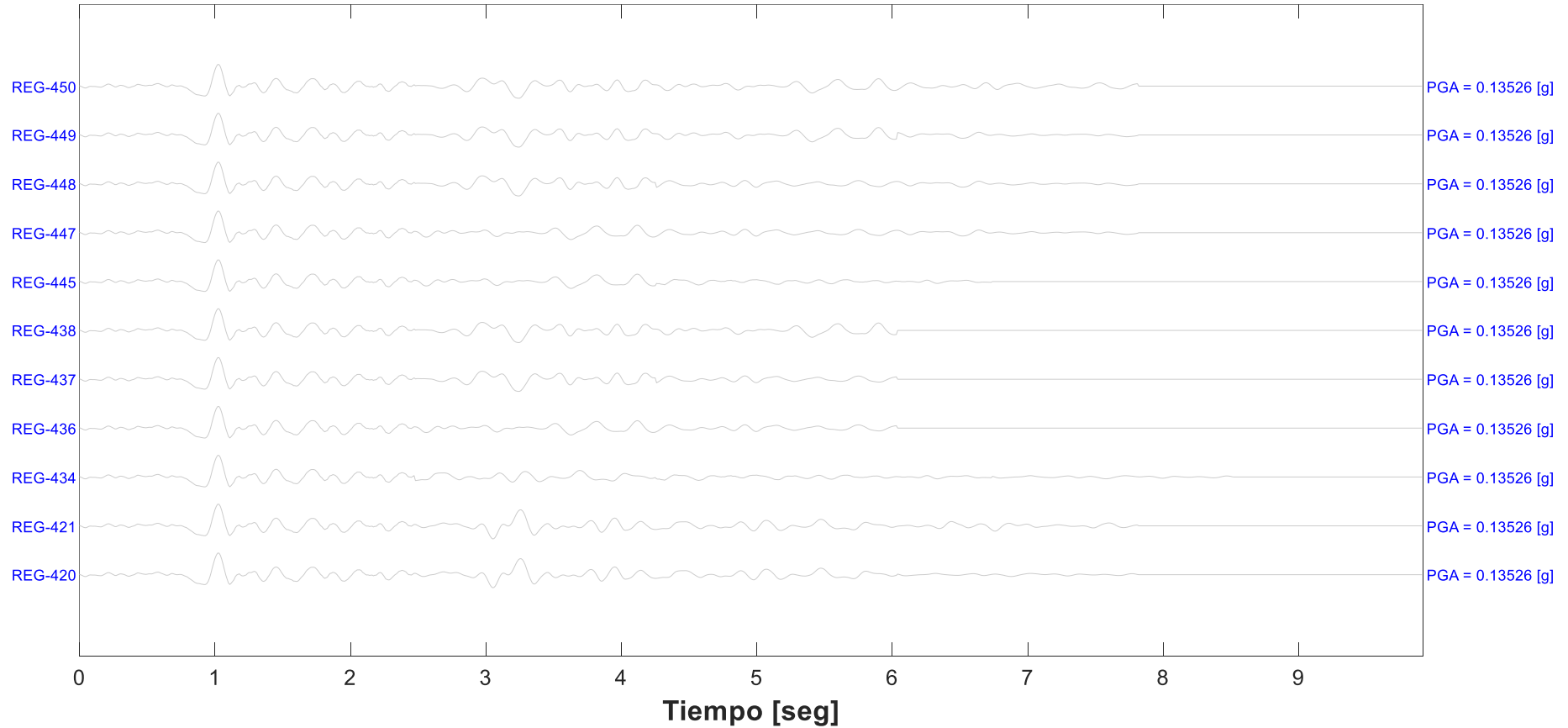
Anexo 14-5: Acelerogramas sintéticos válidos [45 - 55] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



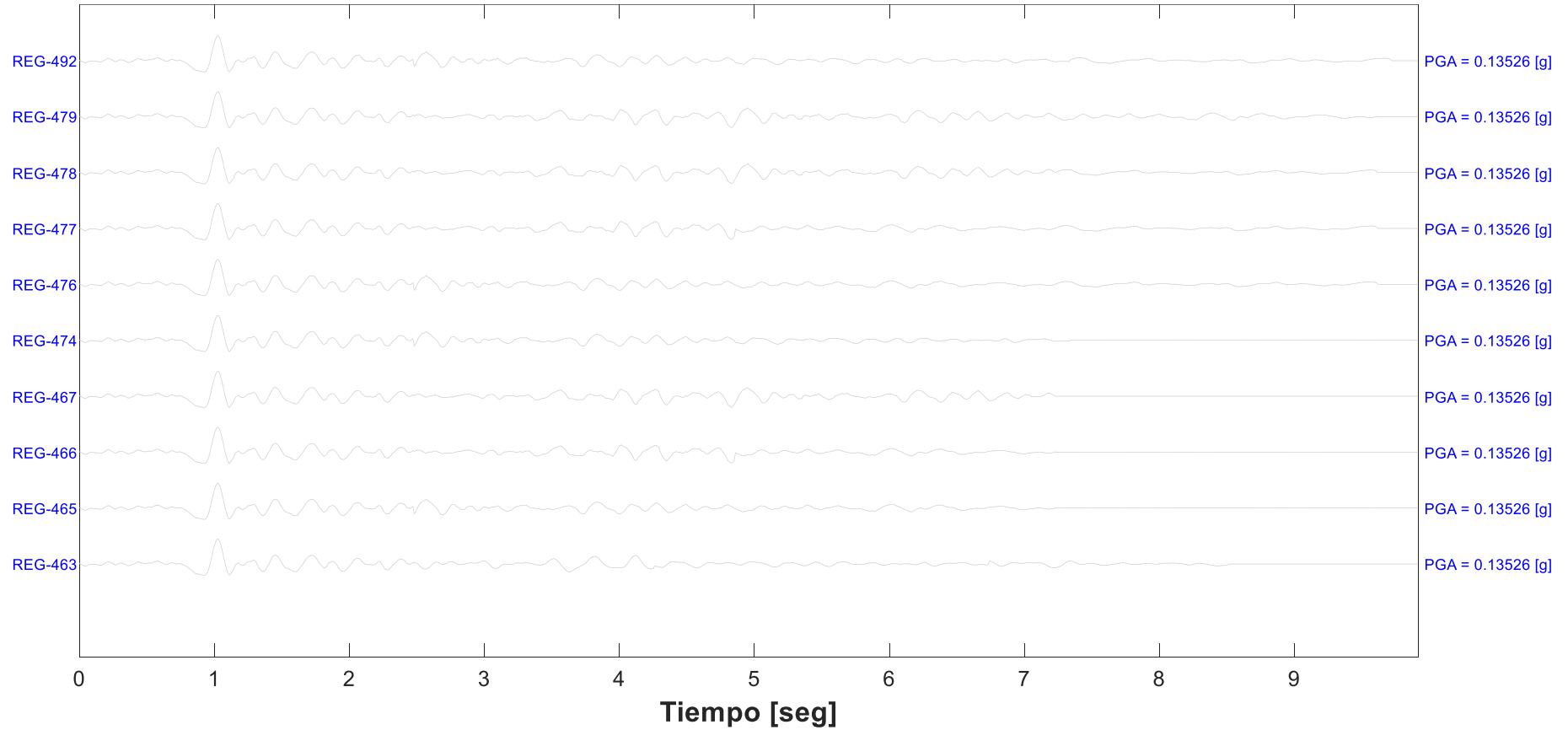
Anexo 14-6: Acelerogramas sintéticos válidos [56 - 66] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)



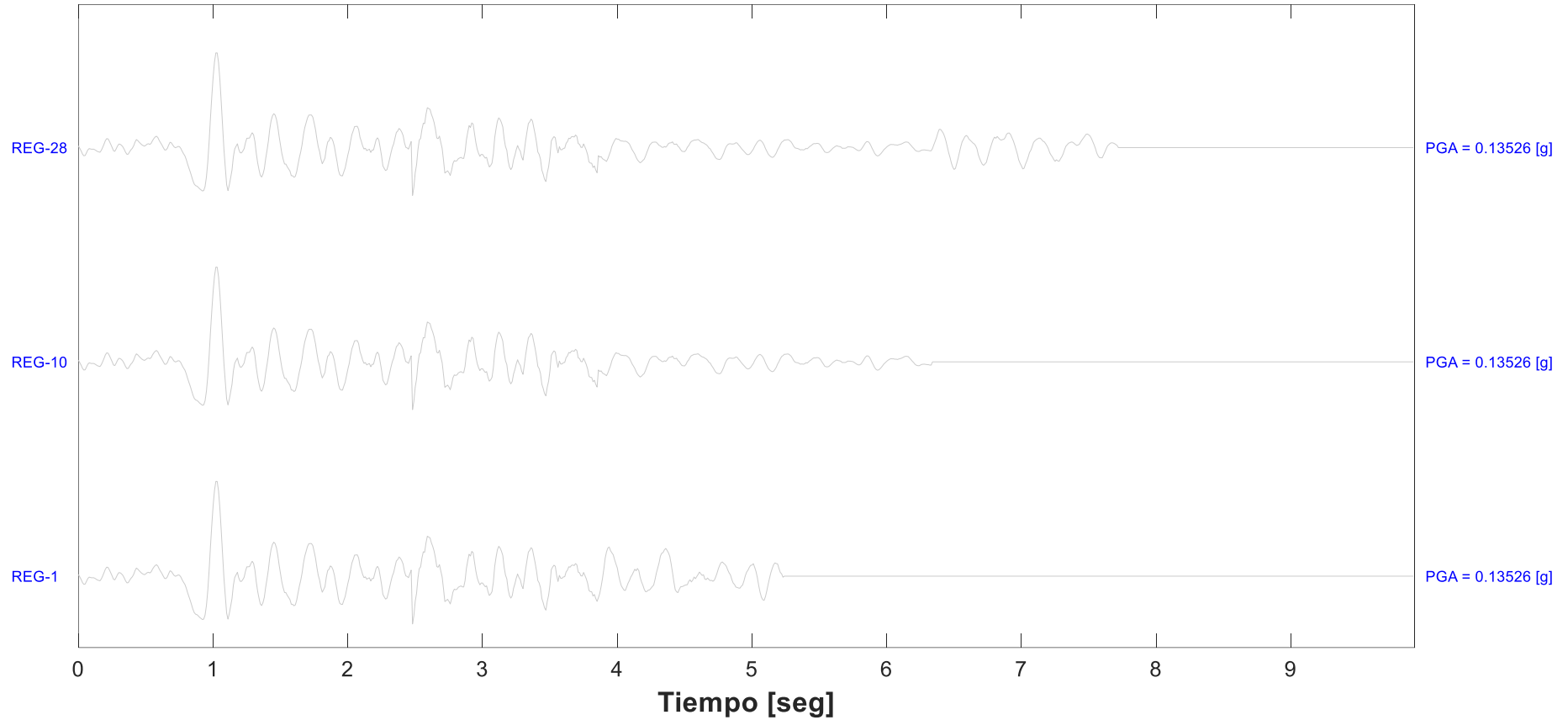
Anexo 14-7: Acelerogramas sintéticos válidos [67 - 77] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

**ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 25$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)**



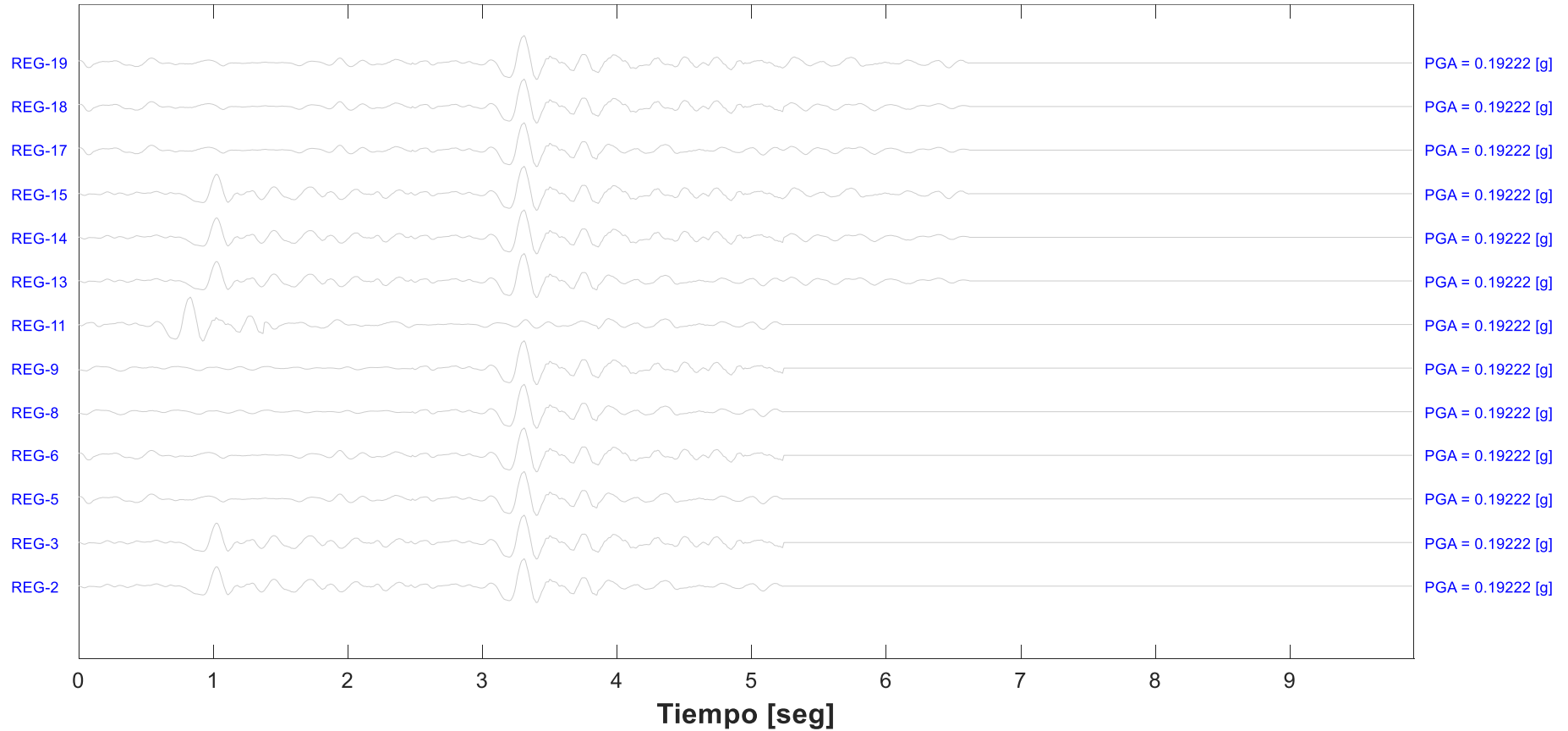
Anexo 14-8: Acelerogramas sintéticos válidos [78 - 87] para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 35$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.7)



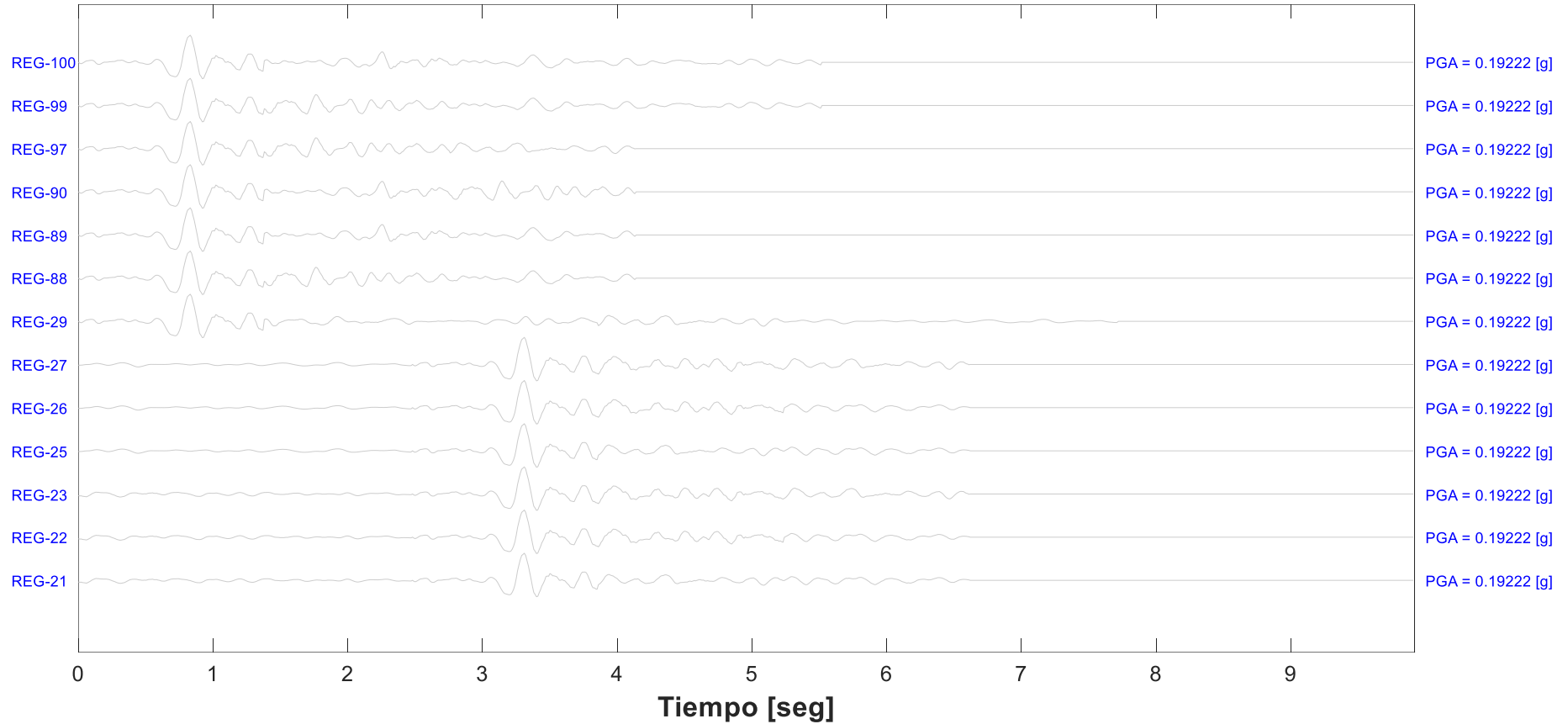
Anexo 14-9: Acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 35 años. (Elaboración propia)

**ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)**



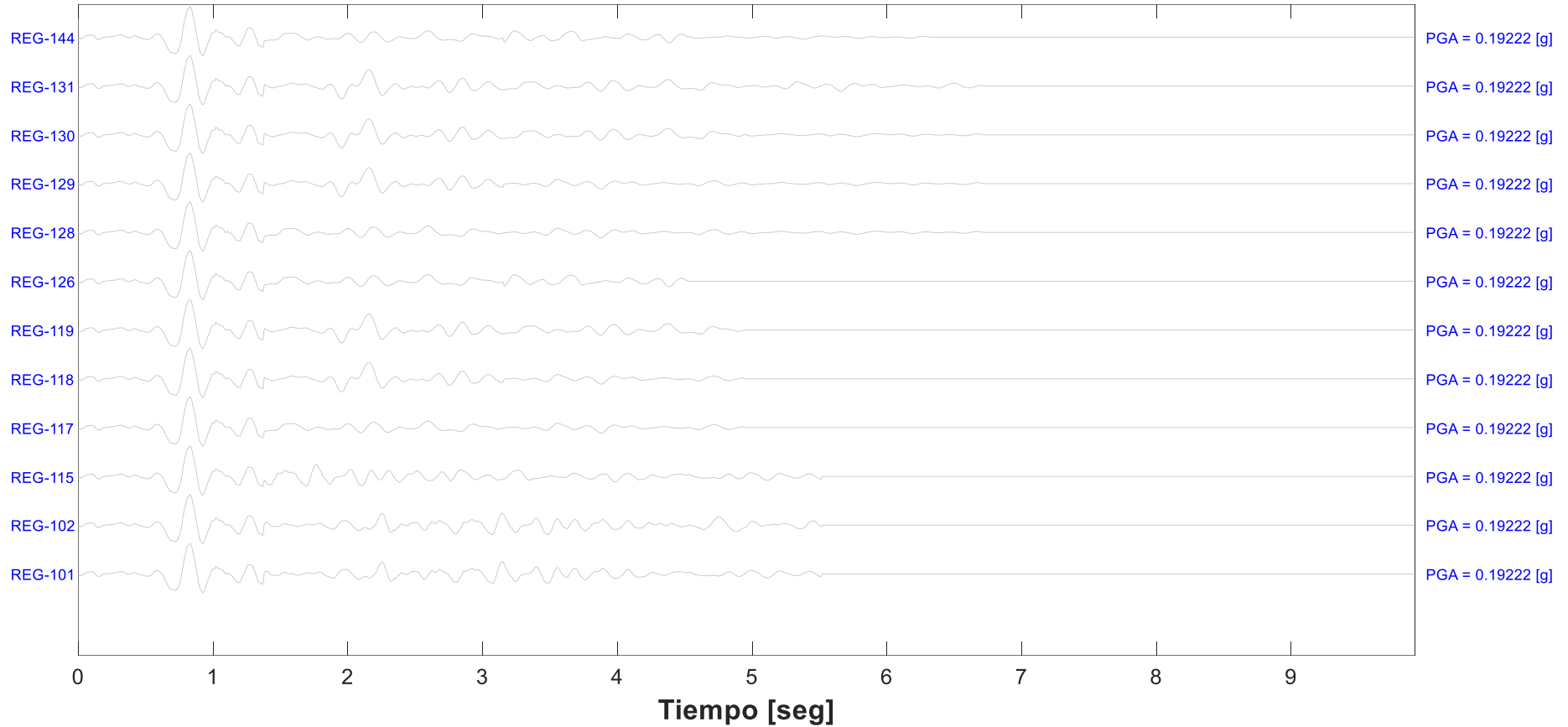
Anexo 14-10: Acelerogramas sintéticos válidos [1 - 13] para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

**ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)**



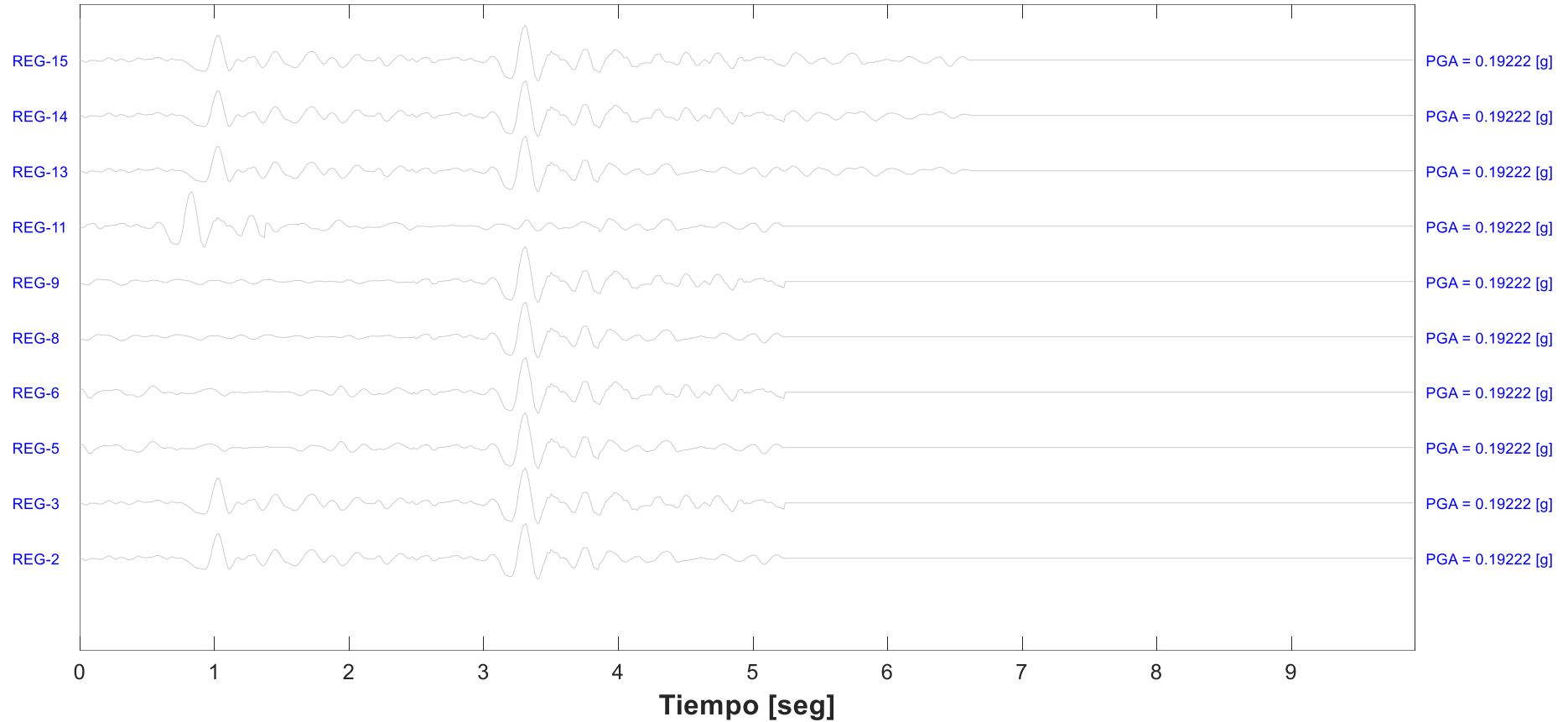
Anexo 14-11: Acelerogramas sintéticos válidos [14 - 26] para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

**ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 3.5)**



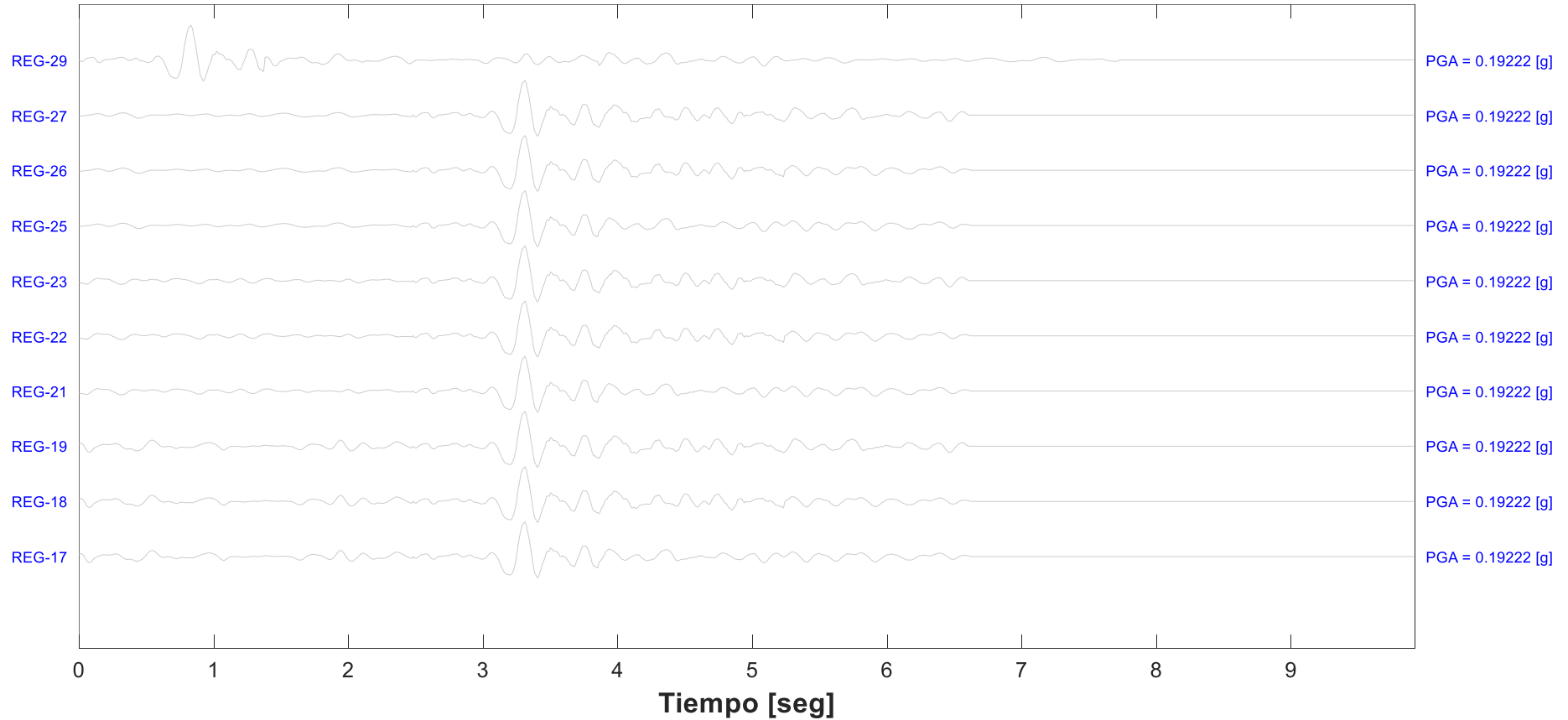
Anexo 14-12: Acelerogramas sintéticos válidos [27 - 38] para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 75$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 4)



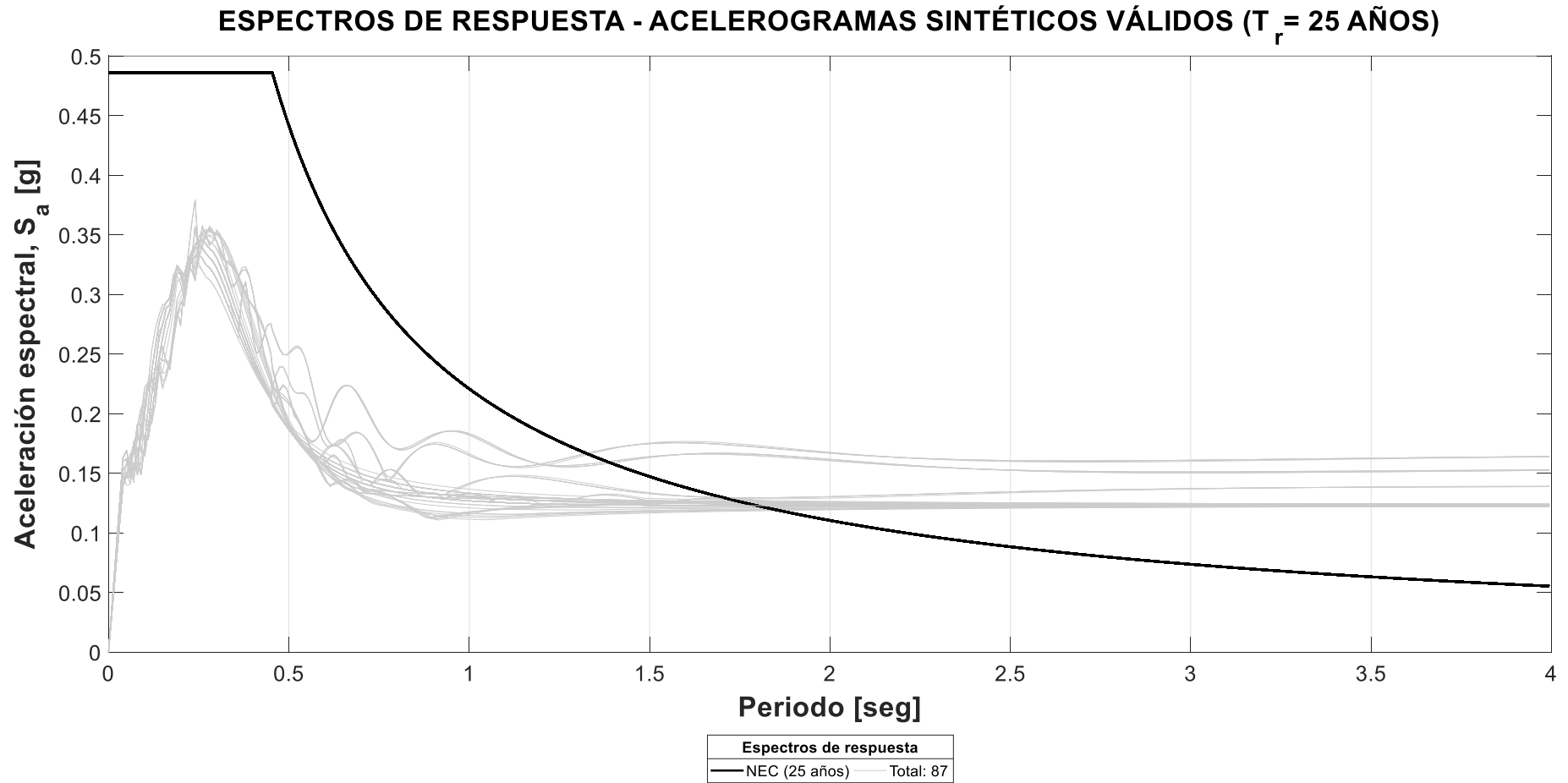
Anexo 14-13: Acelerogramas sintéticos válidos [1 - 10] para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 75$  AÑOS)(VARIACIÓN ESPECTRAL= 1 - 4)



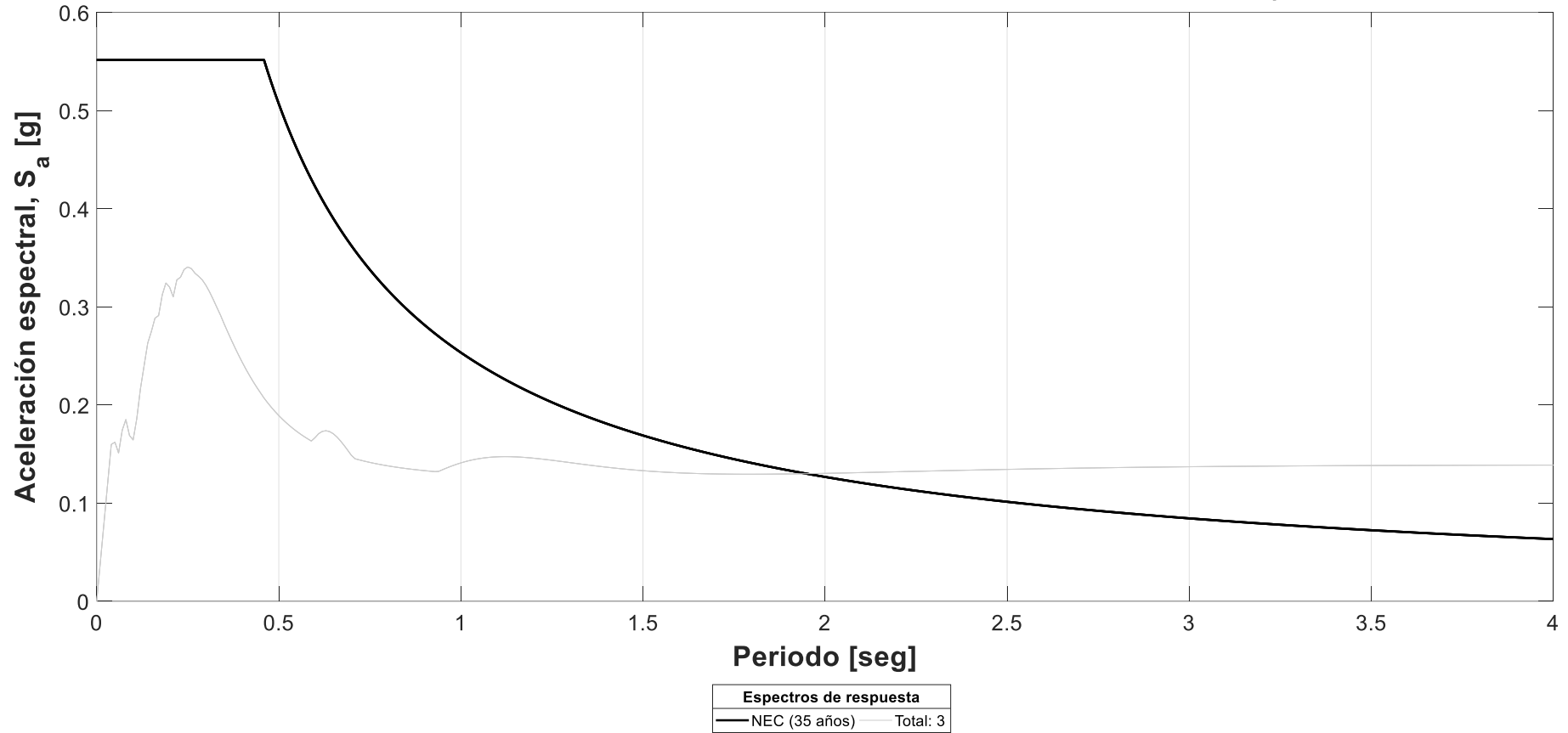
Anexo 14-14: Acelerogramas sintéticos válidos [10 - 20] para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

6.15 Espectros de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos



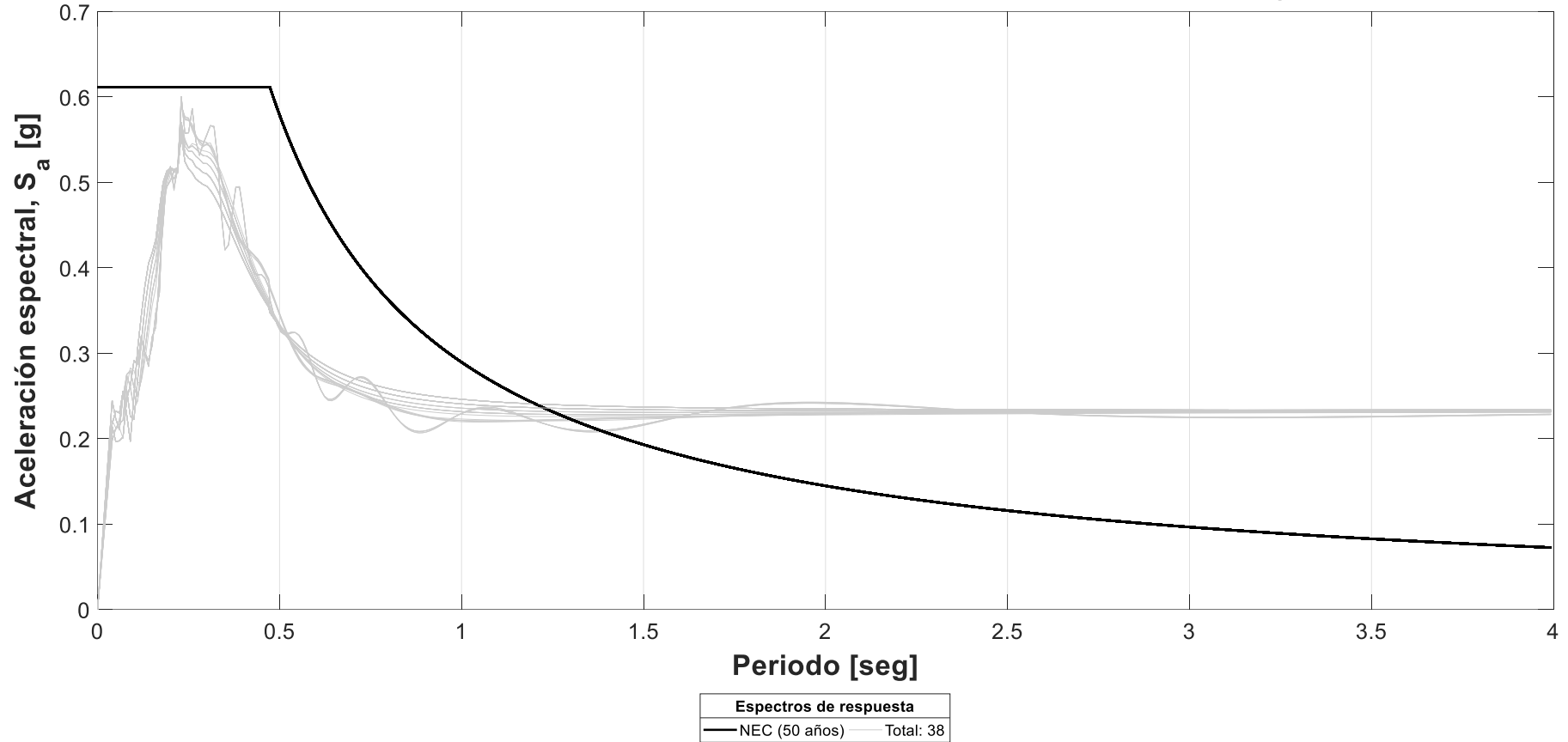
Anexo 15-1: Espectro de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS DE RESPUESTA - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 35$  AÑOS)



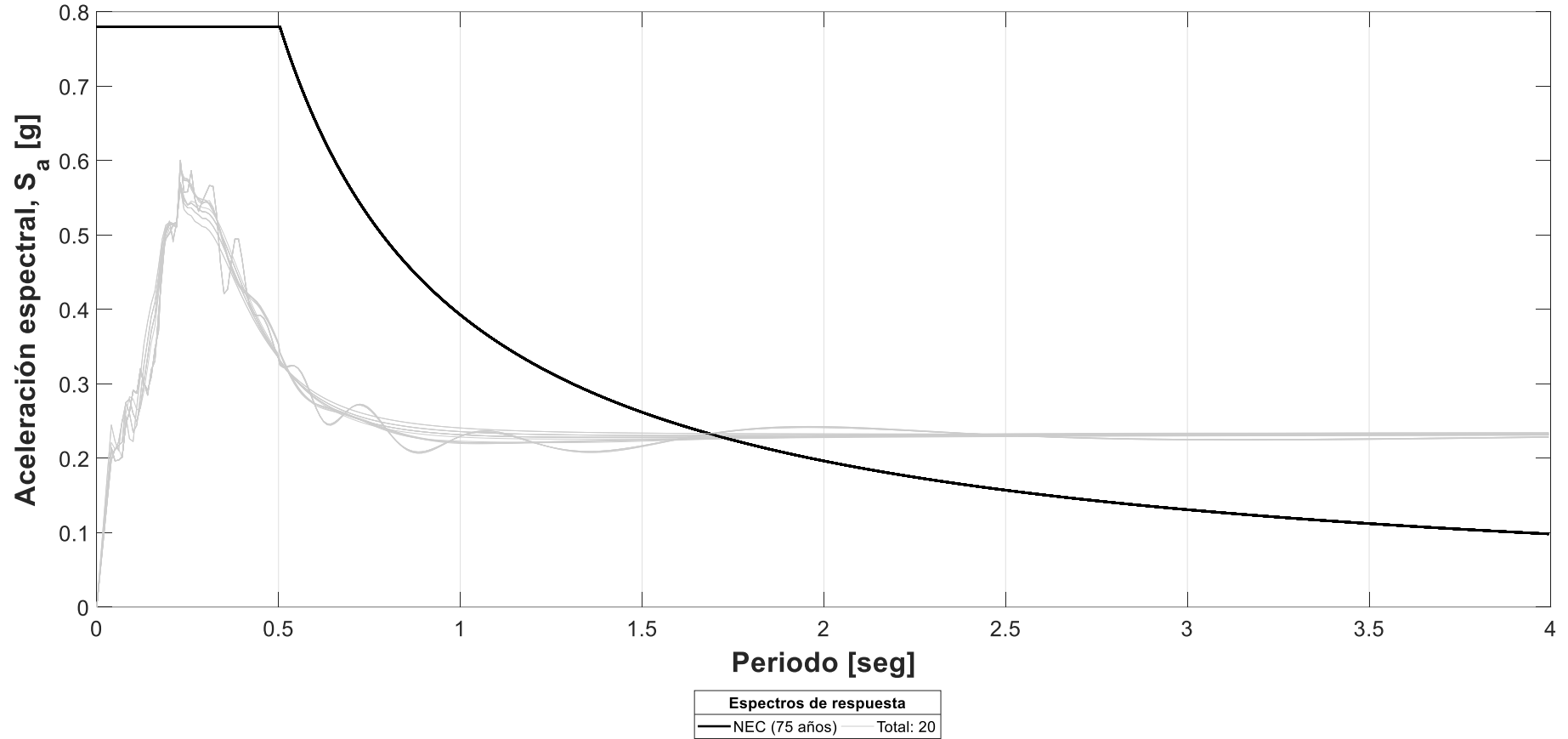
Anexo 15-2: Espectro de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 35 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS DE RESPUESTA - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 50$  AÑOS)



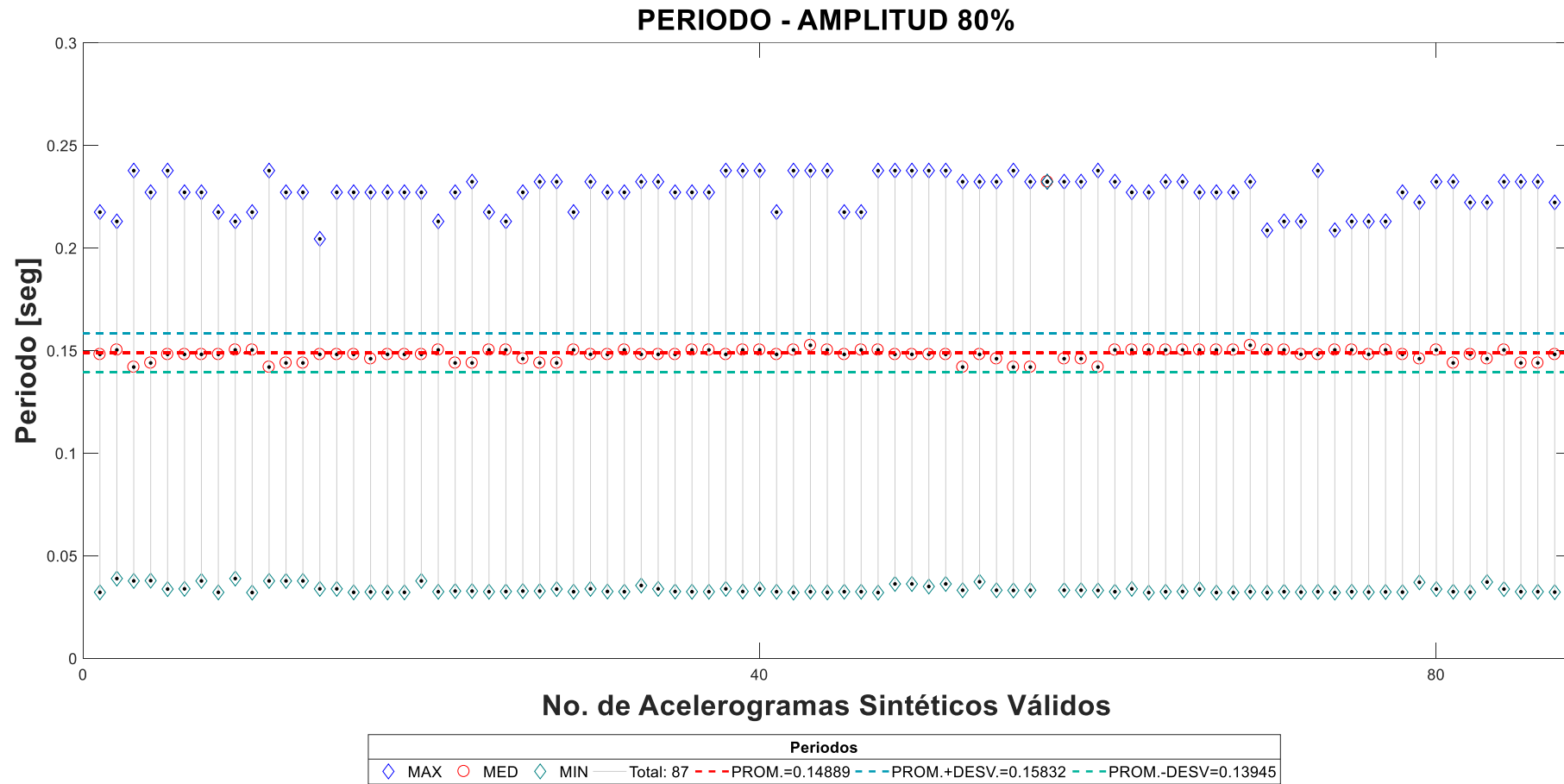
Anexo 15-3: Espectro de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)

ESPECTROS DE RESPUESTA - ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS VÁLIDOS ( $T_r = 75$  AÑOS)

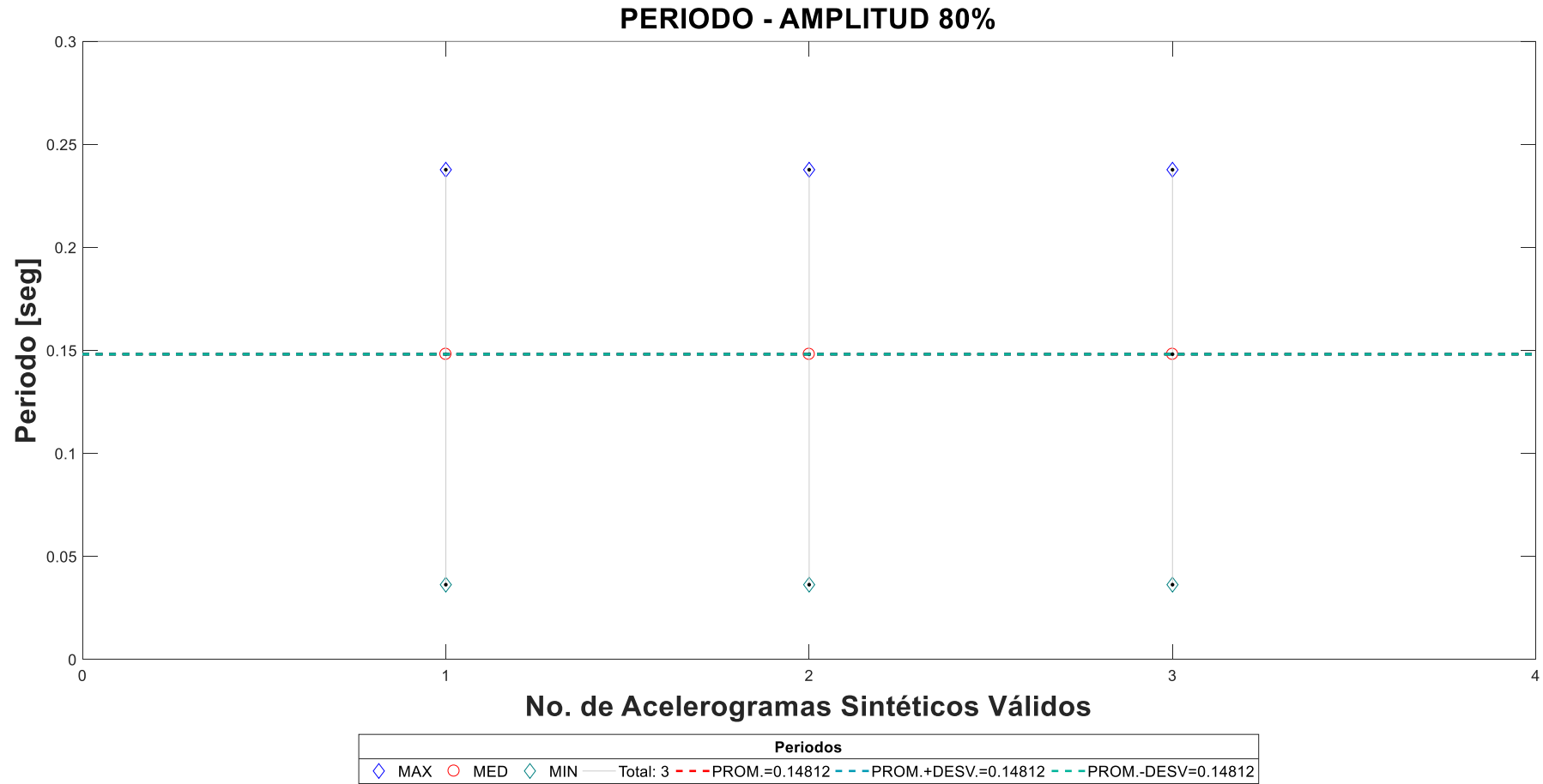


Anexo 15-4: Espectro de respuesta de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

6.16 Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos

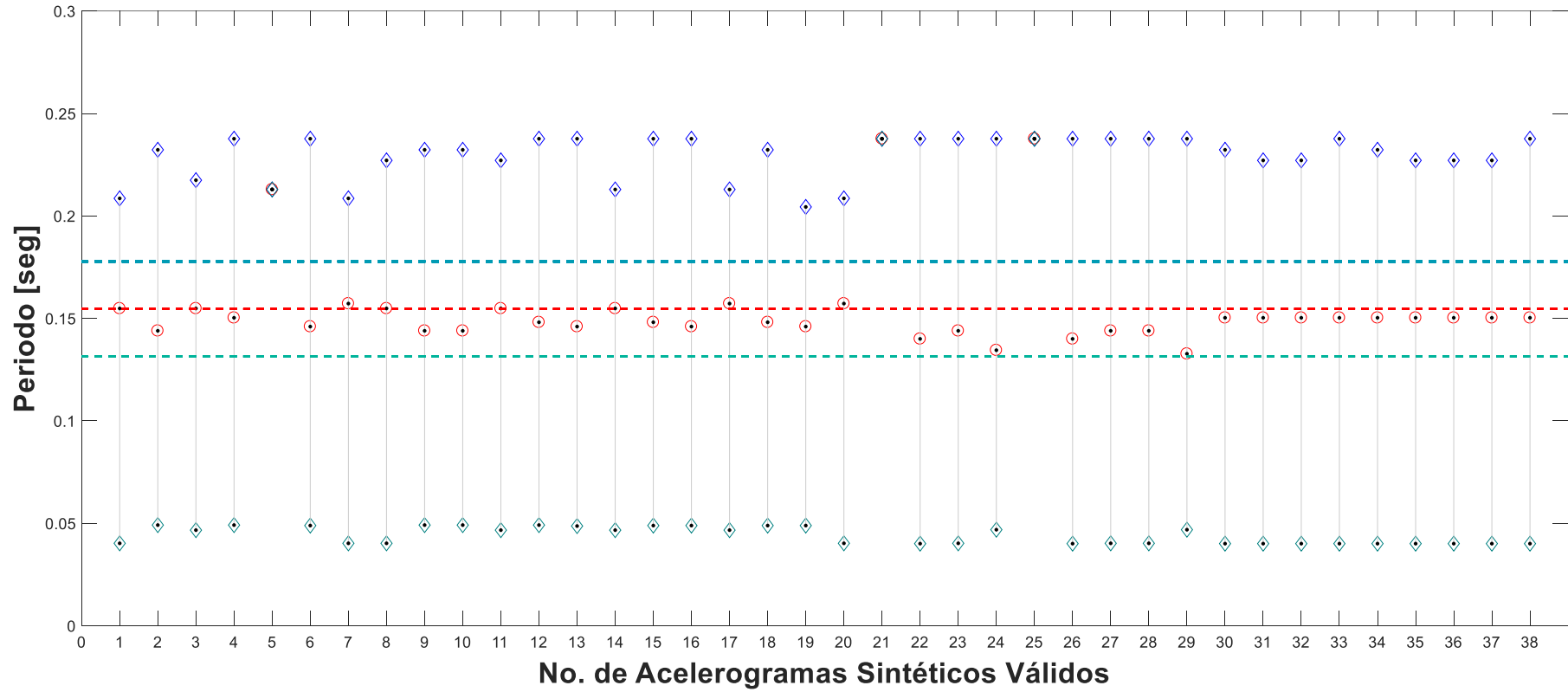


Anexo 16-1: Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 25 años. (Elaboración propia)



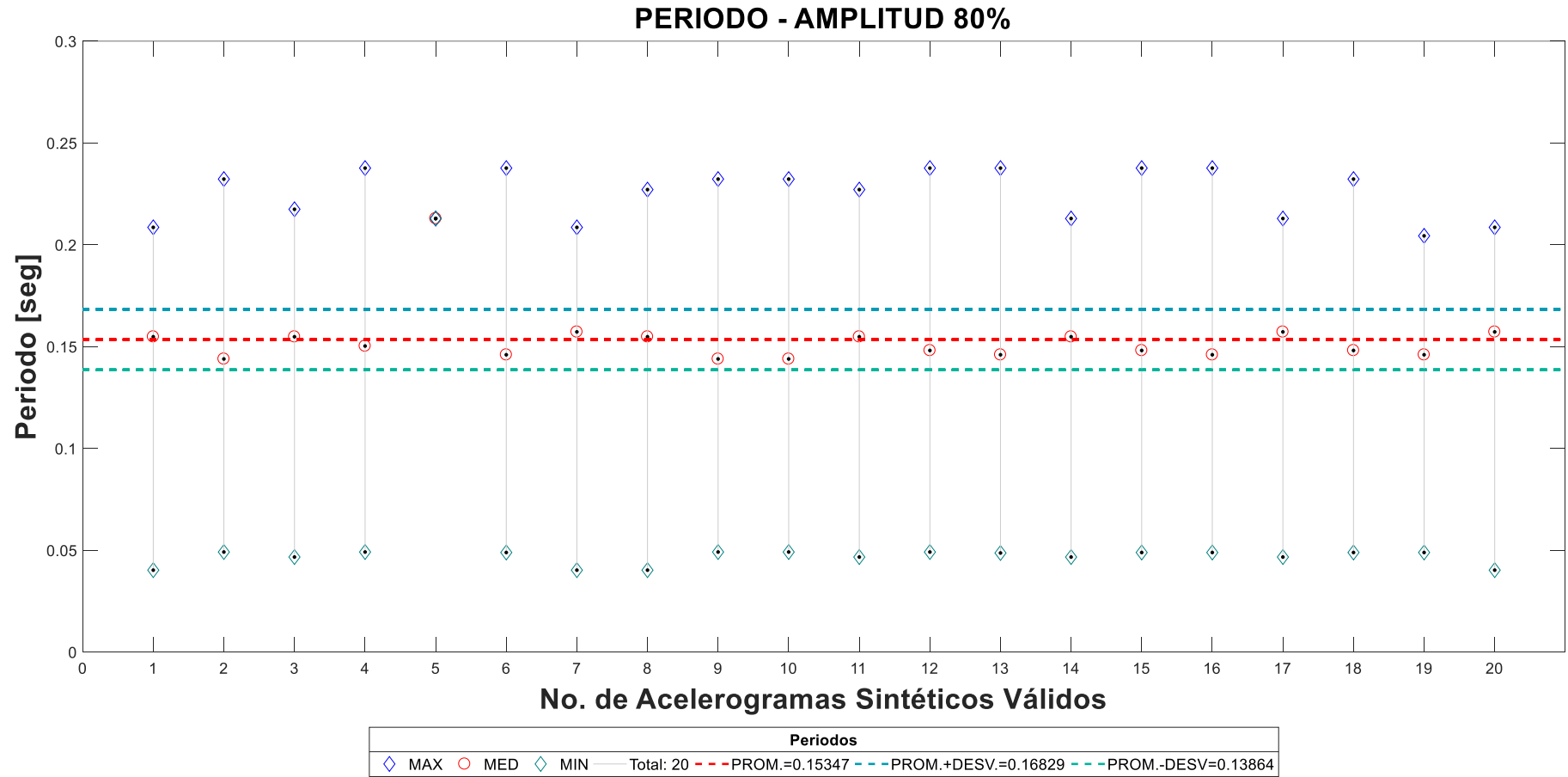
Anexo 16-2: Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 35 años. (Elaboración propia)

PERIODO - AMPLITUD 80%



Periodos						
◇ MAX	○ MED	◇ MIN	— Total: 38	- - - PROM.=0.15464	- - - PROM.+DESV.=0.17779	- - - PROM.-DESV.=0.13149

Anexo 16-3: Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 50 años. (Elaboración propia)



Anexo 16-4: Periodos predominantes de acelerogramas sintéticos válidos para periodo de retorno 75 años. (Elaboración propia)

## 6.17 Scripts para generación de acelerogramas sintéticos

### 6.17.1 Parte 1

Se adjunta el script denominado Parte 1 en versión digital en formato *.m*, el cual tiene como finalidad la obtención de los acelerogramas reales válidos para confeccionar acelerogramas sintéticos para diferentes periodos de retorno.

### 6.17.2 Parte 2

Se adjunta el script denominado Parte 2 en versión digital en formato *.m*, el cual tiene como finalidad la generación de acelerogramas sintéticos a partir de los acelerogramas reales obtenidos en la Parte 1.

### 6.17.3 Parte 3

Se adjunta el script denominado Parte 3 en versión digital en formato *.m*, el cual tiene como finalidad la obtención de acelerogramas sintéticos cuya variación espectral esté dentro de 1 – 3 frente al espectro de diseño elástico NEC para diferentes periodos de retorno.

## 6.18 Base de datos de Acelerogramas reales

Se adjuntan los 120 registros reales provisto por el Instituto Geofísico en base a las mediciones de la RENAC en versión digital con formato *.txt*.