

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**T E S I S**

**Generación de acelerogramas sintéticos mediante estudios  
probabilísticos de peligro sísmico aplicables a la Provincia de  
Pasco, Región Pasco - 2022**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Civil**

**Autor:**

**Bach. Patricia Virginia PALACIN ESPINOZA**

**Asesor:**

**Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL**

**Cerro de Pasco – Perú – 2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**T E S I S**

**Generación de acelerogramas sintéticos mediante estudios  
probabilísticos de peligro sísmico aplicables a la Provincia de  
Pasco, Región Pasco - 2022**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Mg. José Germán RAMIREZ MEDRANO**

**PRESIDENTE**

---

**Mg. Pedro YARASCA CORDOVA**

**MIEMBRO**

---

**Mg. Jose Luis SOSA SANCHEZ**  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión Facultad de Ingeniería**

**Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 161-2023-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

**Tesis:**

**“GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS MEDIANTE ESTUDIOS PROBABILÍSTICOS DE PELIGROS SÍSMICO APLICABLES A LA PROVINCIA DE PASCO, REGIÓN PASCO-2022”**

**Apellidos y nombres de los tesistas**

**Bach. PALACIN ESPINOZA, Patricia Virginia**

**Escuela de Formación Profesional**

**Ingeniería Civil**

**Apellidos y nombres del Asesor**

**Dr. REQUIS CARBAJAL, Luis Villar**

**Índice de Similitud**

**14 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 9 de noviembre del 2023

  
UNDA UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
**Luis Villar Requis Carbajal**  
DOCTOR EN CIENCIAS - DIRECTOR

## **DEDICATORIA**

A mi adorada madre Julia, cuyo amor incondicional y sabiduría han sido mi luz en momentos de incertidumbre y mi guía en el camino de la vida.

A la memoria imborrable de mi amado padre Antonio cuyo legado de fortaleza y dedicación sigue siendo mi inspiración constante en el camino de la vida.

A mi querido hijo Joaquín, cada día contigo es un regalo lleno de alegría y aprendizaje. Eres mi mayor motivación para ser la mejor versión de mí y construir un futuro lleno de oportunidades para ti.

A Dios, agradezco por su constante presencia en mi vida día a día, por ser mi refugio en momentos difíciles y por guiarme con su sabiduría divina. Cada desafío superado y cada logro alcanzado son un testimonio de su amor y gracia en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi alma mater, la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por brindarme la inestimable oportunidad de llevar a cabo este proceso de titulación. Es un privilegio llevar con honor el nombre de la UNDAC y ser parte de esta prestigiosa institución educativa.

Además, deseo extender mi gratitud a mi respetado asesor y a los distinguidos profesores de la facultad, cuya labor han sido cruciales en la orientación y desarrollo de este proyecto de investigación.

Quiero expresar también mi profundo agradecimiento a mi madre, quien me ha brindado su apoyo incondicional a lo largo de este trayecto. Asimismo, deseo reconocer a Dios como mi fuente principal de apoyo y motivación, proporcionándome la fortaleza necesaria para perseverar cada día sin desfallecer.

## RESUMEN

La Provincia de Pasco es reconocida por su alto riesgo sísmico, con antecedentes de sismos importantes en su historial. Además, se han identificado zonas a lo largo del margen peruano con una notable acumulación de energía, lo que sugiere la posibilidad de ocurrencia de terremotos de gran magnitud en el futuro para esta provincia. Debido a estos factores, surge una imperante necesidad de llevar a cabo estudios detallados, como los análisis no lineales tiempo-historia. Sin embargo, la disponibilidad de registros sísmicos aptos para tal fin es limitada. Por esta razón, se realiza la presente investigación con el propósito de generar acelerogramas sintéticos que faciliten el estudio del comportamiento de las estructuras en esta área geográfica

Esta investigación busca determinar los valores máximos de aceleración del suelo (PGA) para distintos periodos de retorno. Se evaluó el riesgo sísmico utilizando el software CRISIS 2015, específicamente adaptado a la Provincia de Pasco. Asimismo, se tuvo en cuenta la influencia de la geología local en el comportamiento de las ondas de corte, lo que permitió obtener espectros de peligro uniforme y posteriormente ajustar estos espectros conforme a la metodología FEMA-356 para obtener espectros de diseño. Finalmente, se empleó el software SEISMOARTIF para generar los acelerogramas sintéticos correspondientes a diferentes periodos de retorno.

Los resultados revelaron que es factible estudiar el análisis probabilístico de peligro sísmico para la Provincia de Pasco, a pesar de la limitada información existente de registros sísmicos importantes. Se obtuvo registros sísmicos sintéticos que posibilitan el estudio de estructuras especiales, la evaluación por desempeño y el diseño de futuras edificaciones que lo requieran.

**Palabras clave:** redes neuronales artificiales, detección del daño estructural, albañilería confinada, diferencias modales, modelamiento numérico.

## ABSTRACT

The Pasco Province is known for its high seismic risk, with a history of significant earthquakes. Additionally, areas along the Peruvian margin have been identified with a notable accumulation of energy, suggesting the potential occurrence of large magnitude earthquakes in the future for this province. Due to these factors, there is an urgent need to conduct detailed studies, such as nonlinear time-history analyses. However, the availability of seismic records suitable for this purpose is limited. For this reason, the present research is carried out with the purpose of generating synthetic accelerograms to facilitate the study of structural behavior in this geographical area.

This research aims to determine the maximum values of ground acceleration (PGA) for different return periods. Seismic risk was evaluated using the CRISIS 2015 software, specifically adapted to the Pasco Province. Additionally, the influence of local geology on shear wave behavior was taken into account, allowing for the derivation of uniform hazard spectra, which were subsequently adjusted according to the FEMA-356 methodology to obtain design spectra. Finally, the SEISMOARTIF software was used to generate synthetic accelerograms for various return periods.

The results revealed the feasibility of conducting probabilistic seismic hazard analysis for the Pasco Province, despite limited available information on significant seismic records. Synthetic seismic records were obtained, enabling the study of special structures, performance assessment, and the design of future buildings that may require it.

**Keywords:** artificial neural networks, structural damage detection, confined masonry, modal differences, numerical modeling.

## INTRODUCCIÓN

La Provincia de Pasco, ubicada en la vertiente oriental de los Andes, en la zona central del territorio peruano y se considera una zona de elevado peligro sísmico debido a los sismos de gran magnitud registrados en la región andina del Perú. A pesar de esto, los valores de PGA (Aceleración Pico de Suelo) no han sido considerablemente elevados, lo que indica la vulnerabilidad sísmica de la provincia de Pasco. Además, se ha identificado la existencia de áreas con acumulación importante de energía sísmica a lo largo del margen peruano, lo que plantea la posibilidad de terremotos de gran magnitud en el futuro. La falta de información y estudios específicos para ciudades contiguas como Cerro de Pasco ha generado preocupación en cuanto a la preparación y planificación ante un posible terremoto a gran escala en la costa peruana.

Esta vulnerabilidad sísmica es un problema real que debe abordarse desde el estado del arte, aplicando nuevas tendencias en la evaluación estructural como los análisis no lineales de tiempo-historia. Sin embargo, en la provincia de Pasco, estos estudios son limitados debido a la falta de registros acelerográficos de sitio, que son necesarios para comprender el comportamiento del suelo ante los fenómenos sísmicos.

La escasa información registrada sobre estos eventos en la Provincia de Pasco, la vulnerabilidad de las construcciones y la necesidad de contar con registros para realizar análisis no lineales de tiempo-historia en la evaluación de las construcciones, ha motivado a estimar acelerogramas de grandes terremotos que podrían ocurrir y su comportamiento en la Provincia de Pasco.

La presente investigación se centra en estudiar las fuentes sismogénicas ubicadas en la región y abordar diversos problemas estadísticos, probabilísticos y operacionales relacionados con el peligro sísmico en la Provincia de Pasco. El objetivo principal que se plantea es determinar los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos mediante estudios probabilísticos. Además, se estudian los problemas específicos relacionados con las características de las fuentes sismogénicas, el peligro sísmico para diferentes periodos de retorno, la tasa de

excedencia de aceleraciones máximas, la duración de los acelerogramas sintéticos y los valores de los espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	

### CAPITULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	2
1.3.	Formulación del problema .....	3
1.3.1.	Problema general .....	3
1.3.2.	Problemas Específicos: .....	3
1.4.	Formulación de objetivos.....	3
1.4.1.	Objetivo General: .....	3
1.4.2.	Objetivos Específicos:.....	4
1.5.	Justificación de la investigación.....	4
1.6.	Limitaciones de la investigación .....	4

### CAPITULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio .....	6
2.1.1.	Peligro sísmico en el Perú (Alva y Castillo, 1993) .....	7
2.1.2.	Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú (Alva y Escalaya, 2005).....	8

2.1.3.	Re - evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú (Tavera, 2014) .....	9
2.1.4.	Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local (Orosco, Haarala y Barbat, 2006) .....	9
2.1.5.	Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico-estructurales (Flores y Ayes, 2018) .....	10
2.2.	Bases teóricas – científicas .....	11
2.2.1.	Peligro sísmico .....	11
2.2.2.	Fuentes sismogénicas .....	15
2.2.3.	Acelerogramas sintéticos .....	19
2.2.4.	Espectro de respuesta .....	26
2.3.	Definición de términos básicos .....	30
2.4.	Formulación de hipótesis.....	31
2.4.1.	Hipótesis general .....	31
2.4.2.	Hipótesis específica .....	31
2.5.	Identificación de variables .....	31
2.5.1.	Variable independiente .....	31
2.5.2.	Variable dependiente .....	31
2.5.3.	Variable interviniente .....	32
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	32

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1.	Tipo de investigación.....	34
3.2.	Nivel de investigación.....	35
3.3.	Métodos de investigación .....	35
3.4.	Diseño de investigación.....	35
3.5.	Población y muestra .....	35

3.5.1. Población.....	35
3.5.2. Muestra.....	36
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	36
3.6.1. Técnicas de recolección de datos .....	36
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.....	37
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	37
3.8. Tratamiento estadístico .....	37
3.9. Orientación ética, filosófica y epistémica .....	37

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. Descripción del trabajo de campo .....	38
4.1.1. Determinación de la velocidad de ondas de corte.....	38
4.1.2. Análisis probabilístico del peligro sísmico .....	45
4.1.3. Mapas de peligro sísmico obtenidos .....	49
4.1.4. Espectro de peligro uniforme (EPU).....	53
4.1.5. Espectro de diseño según la metodología FEMA-356.....	54
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados .....	56
4.2.1. Generación del acelerograma sintético .....	56
4.2.2. Construcción del espectro de respuesta para 1GDL.....	62
4.3. Prueba de hipótesis.....	69
4.3.1. Prueba de Hipótesis General .....	69
4.3.2. Prueba de Hipótesis Especificas.....	70
4.4. Discusión de resultados .....	71

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de variable independiente. ....	32
Tabla 2: Operacionalización de variable dependiente. ....	33
Tabla 3: Fuentes sismogénicas.....	46
Tabla 4: Valor de Mw en las 33 fuentes sismogénicas .....	48
Tabla 5: Características significativas del acelerograma para un $T_r=2475$ años .....	58
Tabla 6: Características significativas del acelerograma para un $T_r=1000$ años .....	59
Tabla 7: Características significativas del acelerograma para un $T_r=475$ años .....	60
Tabla 8: Características significativas del acelerograma para un $T_r=100$ años .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Genesis de los sismos .....	13
Figura 2: Mapa sísmico del Perú de foco intermedio.....	17
Figura 3: Mapa sísmico del Perú de foco profundo. ....	18
Figura 4: Interfaz del software SeismoArtif.....	20
Figura 5: Función de intensidad constante.....	21
Figura 6: Función de intensidad trapezoidal.....	21
Figura 7: Función de intensidad trapezoidal exponencial .....	22
Figura 8: Función de intensidad exponencial .....	22
Figura 9: Función de intensidad personalizada .....	23
Figura 10: Función de intensidad según acelerograma.....	23
Figura 11: Registro acelerográfico de El Centro, California.....	28
Figura 12: Respuesta de deformación de 3 diferentes sistemas de 1GDL con distintos periodos de vibración.....	28
Figura 13 Espectro de respuesta de deformación para el registro de El Centro.....	29
Figura 14: Ubicación de la zona en estudio.....	40
Figura 15: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cerro de Pasco 22-K-I.....	42
Figura 16: Ensayo de refracción sísmica perfil C-1 .....	43
Figura 17: Ensayo de refracción sísmica perfil C-2 .....	44
Figura 18: Ensayo de refracción sísmica perfil C-3 .....	44
Figura 19: Ensayo de refracción sísmica perfil C-4 .....	45
Figura 20: Mapa Sísmico del Perú.....	46
Figura 21: Fuentes Interface .....	47
Figura 23: Fuentes Corticales .....	47
Figura 24: Mapa de peligro sísmico con $T_r=100$ años.....	50
Figura 25: Mapa de peligro sísmico con $T_r=475$ años.....	51
Figura 26: Mapa de peligro sísmico con $T_r=1000$ años.....	51
Figura 27: Mapa de peligro sísmico con $T_r=2475$ años.....	52

Figura 28: Mapa de peligro sísmico para la Región de Pasco con $T_r=475$ años .....	53
Figura 29: Espectros de peligro uniforme para $T_r=100, 475, 1000$ y $2475$ años.....	54
Figura 30: Espectro elástico según FEMA-356 para $T_r=1000$ años .....	55
Figura 31: Espectro elástico según FEMA-356 para $T_r=475$ años .....	56
Figura 32: Señal sintética obtenida para $T_r=475$ y $1000$ años.....	62
Figura 33: Espectros de respuesta para acelerograma con $T_r=475$ años .....	64
Figura 34: Espectros de respuesta para acelerograma con $T_r=1000$ años .....	65
Figura 35: Método de determinación del espectro de respuesta .....	66
Figura 36: Espectro de respuesta incluyendo el tiempo para $T_r=475$ años .....	67
Figura 37: Escalograma para $T_r=475$ años .....	68
Figura 38: Espectro de respuesta incluyendo el tiempo para $T_r=1000$ años .....	68
Figura 39: Escalograma para $T_r=475$ años .....	69

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La Provincia de Pasco, se encuentra ubicada en la vertiente oriental de los andes y zona central del territorio peruano, esta zona central andina del Perú es también considerada de elevado peligro sísmico, debido a que se han registrado sismos de gran magnitud en zonas andinas como el Huaytapallana (Junín), Ayacucho, Cusco y Arequipa.

Según el mapa de máximas intensidades sísmicas elaborado por la Comisión Multisectorial de Reducción de Riesgos en el Desarrollo (CMRRD) en 2003, la Región Pasco a registrado intensidades sísmicas de VII y VIII, no obstante, los valores de PGA no fueron considerablemente elevados, lo que evidencia la vulnerabilidad sísmica y la predominante tendencia a la construcción informal de las ciudades, sin embargo, la provincia de Pasco no es vulnerable solo a la sismicidad local. Según Tavera (2017) a lo largo del margen peruano, actualmente existe al menos tres áreas con importante acumulación de energía sísmica, también conocidas como zonas de acoplamiento sísmico, que darán lugar a terremotos de gran magnitud en el futuro. El peligro de un terremoto a gran escala en la costa peruana, es de gran preocupación nacional, ante este escenario se han realizado estudios y planes de contingencia para

Lima Metropolitana y alrededores, sin embargo, existe poca información para las ciudades contiguas como Cerro de Pasco.

Según INDECI el 85% de viviendas en la Provincia de Pasco son informales, siendo el material predominante para la construcción los bloques de concreto que son elaborados artesanalmente. La vulnerabilidad sísmica de la Provincia de Pasco es real y es un problema que debe ser resuelto desde el estado del arte, por lo que se deben aplicar las nuevas tendencias para el evaluación estructural que son los análisis no lineal tiempo - historia, sin embargo, para la provincia de Pasco estos estudios son limitados ya que actualmente no se posee uno de sus principales requisitos que son los registros acelerográficos de sitio, que sirvan como sismos semilla para entender el comportamiento del suelo ante estos fenómenos.

Es así que el silencio sísmico de al menos 274 años que presenta el país, la poca información registrada de estos eventos en la Provincia de Pasco, la vulnerabilidad de las construcciones y la necesidad de tener registros para realizar análisis no lineal tiempo - historia para la evaluación de las construcciones han motivado a estimar acelerogramas de grandes terremotos que podrían ocurrir y su comportamiento en la Provincia de Pasco.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

Se establece los límites y alcances de la presente investigación, definiendo claramente qué aspectos serán abordados y cuáles serán excluidos.

- Periodo de estudio: Se abarca un periodo entre los años 2022 y 2023, durante el cual se llevaron a cabo las etapas usuales de investigación académica.
- Área geográfica: El área investigación será en la ciudad de Cerro de Pasco en Perú.
- Alcance: Se estudiará como modelo característico las fuentes sismogénicas ubicadas en la Región.

### **1.3. Formulación del problema**

La presente investigación ante los diversos problemas estadísticos, probabilísticos y operacionales busca responder las siguientes preguntas:

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuáles serán los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico?

#### **1.3.2. Problemas Específicos:**

- ¿Cuál son las características de las fuentes sismogénicas en la Provincia de Pasco?
- ¿Cuál es el peligro sísmico para periodos de retorno de 475 y 2475 años para un tiempo de exposición de 50 años?
- ¿Cuál es la tasa de excedencia de aceleraciones máximas (PGA) para la provincia de Pasco?
- ¿Cuál será la duración, en segundos, de los acelerogramas sintéticos?
- ¿Cuáles serán los valores máximos de los espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años?
- ¿Cuál es el valor de los espectros de diseño siguiendo la metodología FEMA-356?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General:**

Conocer los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos:**

- Determinar las características de las fuentes sismogénicas en la Provincia de Pasco.
- Obtener los valores del peligro sísmico para periodos de retorno de 475 y 2475 años para un tiempo de exposición de 50 años.
- Graficar la tasa de excedencia de aceleraciones máximas (PGA) para la provincia de Pasco.
- Determinar la duración, en segundos, de los acelerogramas sintéticos.
- Comprobar los valores máximos de los espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años.
- Cuantificar los valores de los espectros de diseño siguiendo la metodología FEMA-356.

#### **1.5. Justificación de la investigación**

Debido a que el Perú es considerado un país con alta actividad sísmica y estudios científicos actuales indican zonas de acoplamiento sísmico de aproximadamente 470 km de longitud en la costa, la cual podría liberar toda la energía acumulada durante más de 270 años. Surge la necesidad de estudiar el comportamiento sísmico más probable de grandes terremotos que podrían ocurrir en la Provincia de Pasco, ya que en la actualidad existe limitada información al respecto y no se disponen de registros de eventos de moderada y alta magnitud que puedan ser utilizados en análisis no lineal tiempo – historia para evaluaciones por desempeño o diseño de futuras edificaciones que lo requieran.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

Para la realización del presente estudio se encontraron las siguientes limitaciones:

- Escases de información primaria relevante para la zona de estudio.
- Financiamiento para la elaboración de la investigación.
- Potencia de cómputo.
- Antiguados estudios de gestión de riesgos y desastres para la provincia de Pasco.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

El 26 de Mayo del 2019 a las 02:41:12 (hora local) ocurrió un sismo con epicentro al Sur de Lagunas en el departamento de Loreto, según el CEOIS y REDACIS, el sismo tuvo una magnitud de 8.0 Mw y el máximo valor de PGA registrado para este evento fue de -81.08 cm/s<sup>2</sup> en la dirección EO. La región Pasco no fue ajena a los daños causados por este terremoto reporta el Diario La República, informando sobre viviendas rusticas que presentan grietas verticales en toda la altura del muro, derrumbe de cercos perimétricos en la localidad de Yanahuanca, provincia de Daniel Alcides Carrión y desmoronamiento de rocas en el distrito de Gollarisquizga, así también el INDECI perteneciente a la Provincia de Pasco, mediante Informe N° 32012 reporto asentamientos en viviendas de albañilería, que por la gravedad del daño, se alertó el posible colapso y la declaración de inhabitabilidad de algunas viviendas, cabe resaltar que la mayoría de estas viviendas se encontraban en pésimas condiciones sismorresistentes, esto debido a la predominante construcción informal que produce una alta vulnerabilidad estructural ante fenómenos sísmicos.

Actualmente se cuenta con investigaciones sobre peligro sísmico y generación de acelerogramas sintéticos, los cuales serán referencia para la presente investigación, cabe resaltar que algunos de estos estudios han utilizado información y procedimientos disponibles en su época de investigación, dichos estudios aportaron información valiosa sobre metodologías de investigación, aceleraciones sísmicas, espectros de peligro uniforme, fuentes sismogénicas, etc. Que posteriormente fueron utilizados en las actualizaciones de la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.

Se hace una revisión de los trabajos más relevantes con respecto al tema de investigación.

#### **2.1.1. Peligro sísmico en el Perú (Alva y Castillo, 1993)**

Este trabajo obtuvo valores actualizados de aceleración para la evaluación del peligro sísmico, evaluando la distribución espacial de la actividad sísmica y las características Neotectónicas en el Perú, se definió 20 fuentes sismogénicas con características particulares y se presentaron como áreas, ya que en la época no existían suficientes datos como para modelar las fallas como fuentes lineales, se agrupó las fuentes en Fuentes de Subducción y Fuentes Continentales, modelando las fuentes de subducción como la interacción de la placa Sudamericana y de Nazca. Para la determinación de los parámetros sismológicos se han considerado diferentes características como la magnitud mínima de homogeneidad, pendiente de la distribución Gutenberg-Richter, tasa media anual de actividad sísmica, magnitud máxima y para determinar las profundidades representativas de los hipocentros en las zonas sismogénicas se realizó un análisis estadístico de cálculo de frecuencias de sismos versus profundidad.

El estudio obtiene el peligro sísmico según los parámetros sismológicos ya mencionados, las profundidades representativas de los hipocentros de las fuentes y la selección de las leyes de atenuación adecuadas

a las fuentes sismogénicas. Cabe resaltar que los valores de aceleraciones máximas presentadas en esta investigación deben considerarse como valores medios esperados en suelo firme, donde no se considera la influencia de las condiciones locales del suelo, ni los efectos de la interacción suelo – estructura.

### **2.1.2. Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú (Alva y Escalaya, 2005)**

En el trabajo presentado se realizó una revisión del pasado sísmico del Perú, reafirmando las fuentes sismogénicas propuestas por Castillo (1993), sin embargo, para este estudio se han considerado las fuentes sismogénicas como áreas, basándose en las características tectónicas de nuestro país, así como el mapa de distribución de epicentros agrupándose en fuentes de Subducción y Fuentes Continentales.

Para cuantificar la relación de recurrencia de la actividad sísmica se utilizó la expresión propuesta originalmente por Ishimoto - Ida (1939) y posteriormente adecuada por Richter (1958). La información sismológica fue obtenida del catálogo sísmico del proyecto SISRA (1985) y actualizados hasta el año 2003 por el IGP (2003).

Para la evaluación del peligro sísmico se consideró la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se proyecta la estructura. Se pudo observar que existía una amplia incertidumbre de resultados debido a que algunas leyes de atenuación no son adaptables al Perú, siendo las leyes para sismos de subducción las más adecuadas debido al menor rango de variación en los resultados.

Esta investigación actualizó los datos sísmicos hasta el año 2003 y utilizó la escala de magnitud de momento ( $M_w$ ) para cuantificar las magnitudes sísmicas.

### **2.1.3. Re - evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú (Tavera, 2014)**

El IGP (Instituto Geofísico del Perú) realizó la evaluación del peligro sísmico probabilístico en el país haciendo uso de eventos sísmicos registrados en los periodos de 1960 al 2012 proveniente de la unificación de los catálogos del IGP, que han permitido construir una base de datos sísmico homogénea en cuanto al umbral mínimo de magnitud y escala de magnitud Mw. Para la evaluación de las diversas leyes de atenuación se utilizaron los lineamientos de acuerdo al procedimiento de Alva (2005), así como las propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997).

El estudio presenta como resultado mapas de peligro sísmica (PGA) que en la presente investigación servirán como insumo base para la elaboración espectros de peligro uniforme.

### **2.1.4. Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local (Orosco, Haarala y Barbat, 2006)**

En este trabajo de investigación se presenta un modelo de generación de acelerogramas artificiales consistente con la sismicidad local de la región de estudio, donde no se hace uso de un registro muestra como semilla de generación, en la formulación de esta metodología se usó el concepto de espectro evolutivo, donde la evolución en el campo frecuencial esta materializado por una discretización del espectro de amplitudes de Fourier, definiendo un proceso uniformemente modulado en cada franja y utilizando técnicas de regresión para definir la función de amplitud que es uno de los puntos claves del modelo que se presentó en la investigación.

Mediante los procedimientos antes mencionados se pudo comprobar que tanto la aceleración máxima como la energía de los registros de la base de datos utilizadas siguen una distribución similar con respecto a la distancia epicentral y la magnitud del sismo, el modelo no cuantifica automáticamente

estos parámetros porque las funciones de amplitud resultantes pueden ser defectuosas y no describir apropiadamente la variación temporal de la señal.

Se concluyo que la aceleración máxima, duración efectiva y duración total se determinan mediante fórmulas de regresión con los parámetros determinados para la base de datos usada o bien por consideraciones específicas del lugar de estudio y fines de simulación, en cuanto a la duración de los sismos sintéticos los parámetros obtenidos de la regresión lineal mostraron resultados satisfactorios.

#### **2.1.5. Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico-estructurales (Flores y Ayes, 2018)**

En este trabajo se muestra una secuencia analítica hacia la generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets donde el acelerograma es escalado de manera directa por un factor constante, típicamente este factor es elegido para lograr un ajuste al PGA o un ajuste a la zona cercana al periodo fundamental de la estructura estudiada, la finalidad de la generación de acelerogramas artificiales es alterar las amplitudes de una señal tal que su respuesta espectral coincida con algún parámetro del espectro de peligro uniforme, se debe generar el ajuste espectral en la zona cercana al periodo fundamental de la estructura analizada. Actualmente los análisis en el dominio del tiempo son más comunes y esto conduce a una solución aceptable de la ecuación del movimiento para sistemas no lineales, la característica principal de los wavelets radica en la presentación de las señales en el dominio conjunto tiempo – frecuencia, que es muy adecuado para focalizar las mediciones al generar los acelerogramas sintéticos, aunque estos pueden sobreestimar la respuesta del sistema, cubren el rango de frecuencias que pudieran presentarse en un sitio para diferentes movimientos del suelo.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

Un terremoto ocurre cuando la tensión en el suelo excede la resistencia de la roca, provocando una ruptura repentina o un deslizamiento violento de los lados opuestos de la roca. Estos esfuerzos pueden actuar perpendiculares a la falla, empujando las rocas entre sí, o paralelas a la falla, moviendo las rocas unas contra otras. La resistencia a la tracción de las rocas está relacionada con el tamaño de estas tensiones y con el coeficiente de fricción de los materiales que las forman, la falla sucede al formarse una tensión lo suficientemente grande como para superar la resistencia a la rotura en el manto rocoso (Nava, 2011).

### **2.2.1. Peligro sísmico**

El peligro sísmico es definido según el EERI (Earthquake Engineering Research Institute) como un fenómeno físico asociado con un probable sismo que puede producir efectos adversos en las actividades humanas (fenómenos asociados a los sismos: sacudimiento del terreno, falla del terreno, fallamiento geológico, licuefacción, expansión lateral, deslizamientos, derrumbes, reptación, etc.). El análisis de los peligros permite identificar y hacer el seguimiento espacial y temporal de los fenómenos o eventos para determinar su potencial, origen, características, comportamiento y la exposición del universo de elementos que pueden afectar (Ocola, 2005).

La liberación repentina de energía en la zona de ruptura de una falla provoca la propagación de ondas sísmicas internas, las cuales, al llegar a la superficie de la corteza y reflejarse en ella, generan ondas superficiales. Las ondas internas surgen debido a las deformaciones longitudinales (de compresión) o transversales (de corte) de la roca. Estas ondas viajan alejándose de la falla y su amplitud tiende a disminuir con la distancia. Las ondas longitudinales se transmiten mediante compresión directa y viajan a mayor

velocidad; son las primeras en registrarse en una estación sismográfica y se les conoce como ondas primarias o, de manera simplificada, ondas P.

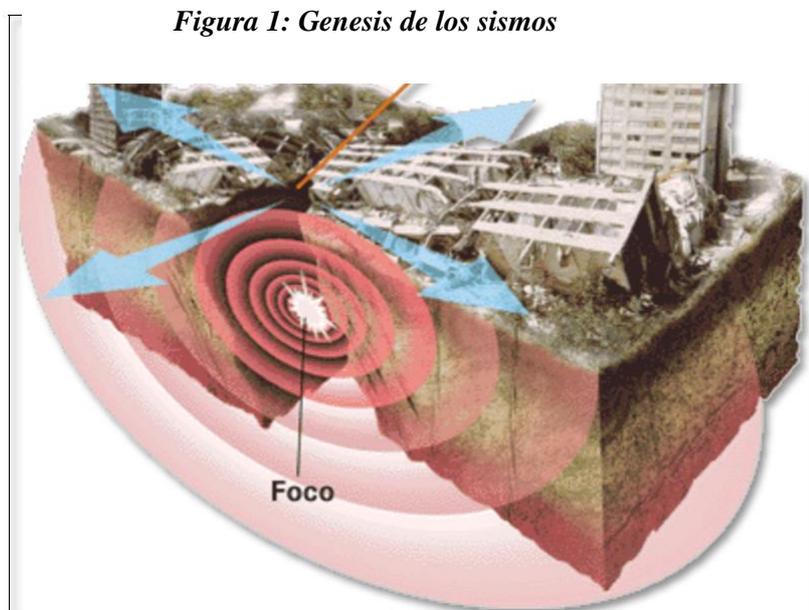
Por otro lado, las ondas transversales resultan de efectos de corte y se detectan después de las ondas primarias, por lo que se les llama ondas secundarias o, también, ondas S. A continuación, se ilustra esquemáticamente cómo se propagan las ondas P y S. Existen diversas clases de ondas superficiales, siendo las más relevantes en ingeniería las ondas L (ondas de Love) y las K (ondas de Rayleigh). Las ondas L ocurren en formaciones estratificadas y vibran en un plano paralelo a la superficie terrestre y perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Por su parte, las ondas R se transmiten en un plano perpendicular al borde de la tierra.

El registro de las ondas sísmicas permite caracterizar el temblor que las generó, así como investigar aspectos relacionados con la estructura interna de la Tierra. Además, la diferencia en tiempo entre la llegada de las ondas P y S facilita el cálculo de la distancia epicentral. Las distintas velocidades de propagación, así como la forma en que se reflejan en las capas internas del planeta, han contribuido a desarrollar teorías sobre su estructura interna. Por ejemplo, las ondas J', por su naturaleza, no se propagan en líquidos debido a la falta de resistencia al movimiento; esto sugiere que, en el núcleo externo de la Tierra, su comportamiento es similar al de un líquido.

Las ondas sísmicas se originan en la zona de ruptura y se dispersan en todas las direcciones, lo que implica que en un punto dado puede haber una combinación específica de ellas. No se puede determinar si un terremoto es oscilatorio o trepidatorio basándose únicamente en las sensaciones de las personas en un lugar determinado. El movimiento del suelo durante un terremoto consta de seis componentes (tres de traslación y tres de rotación).

Al analizar un sismo, es esencial considerar parámetros tanto generales como locales. Entre los primeros se incluyen la ubicación, el tipo de falla y la

energía liberada, mientras que los parámetros locales abarcan el tipo y momento de llegada de las ondas sísmicas que determinaron ciertos niveles de aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno, la génesis de los sismos se muestra en la Figura 1.



**Fuente: <http://ohotart.16mb.com/>**

Por otro lado, el enfoque del análisis probabilístico se enfoca en un área de estudio que debe representar la generación de un evento sísmico característico en una fuente identificada y localizada a la menor distancia de la zona de estudio. (Tavera, 2006).

El análisis del peligro sísmico mediante estudios determinísticos permite estimar el movimiento sísmico del suelo que posee condiciones más desfavorables para el área de estudio, sin embargo, este método no facilita información con respecto a la probabilidad de ocurrencia sísmica para un evento de magnitud predominante, ni de la probabilidad de que este ocurra en la ubicación exacta asumida en el análisis, tampoco provee información sobre los niveles de magnitud del movimiento sísmico que pueden ser esperados en un determinado periodo de tiempo, es decir los valores de aceleraciones espectrales determinísticos no están asociados a una probabilidad de excedencia

determinada ni a un periodo de exposición específico. Además, no cuantifica los efectos de las incertidumbres de los parámetros asumidos en el proceso de estimar las características del movimiento sísmico (H. Tavera, SEDAPAR 2017).

Los resultados que se logran conseguir de un análisis probabilístico de peligro sísmico son las curvas de peligro sísmico (gráficas de los niveles esperados del movimiento del suelo como función de probabilidad) y espectros de peligro uniforme, las cuales son herramientas fundamentales para el desarrollo de los mapas nacionales de peligro sísmico y para las disposiciones modernas de diseño sísmico en los códigos nacionales de edificios (Teshamariam Y Goda, 2013).

Conocer el riesgo sísmico es uno de los factores más importantes para la proyección de construcciones, especialmente centros de salud, centros de enseñanza, centros de investigación, entre otros. Situadas en regiones sísmicas. Aunque es factible construir edificios que resistan grandes aceleraciones sísmicas sin incursionar en el rango inelástico, generalmente no es costeable hacerlo, sobre todo en los países en desarrollo donde los ciudadanos no pueden costear edificaciones de tal magnitud (Ocola, 2005). Es importante reconocer que el desarrollo de una sociedad modifica su exposición ante los peligros potenciales en función del tiempo. Especialmente, cuando este desarrollo no es armónico con las condiciones ambientales naturales. (Nava, 2011).

La recurrencia de los terremotos es un recordatorio constante del peligro al que estamos expuestos en el Perú, a esto se debe la gran importancia de los Análisis de Peligro Sísmico para estimar las consecuencias de estos eventos, esto a fin de estimar valores de aceleraciones espectrales en suelo firme para la región y los potenciales efectos de estos sobre la infraestructura civil.

Cabe resaltar que el cálculo probabilístico del peligro sísmico está basado en un conjunto de modelos de zonas sísmicas y leyes de atenuación

adoptados para cada tipo de fuente sismogénica en específico y los análisis de confiabilidad son usados a partir de modelos estructurales y conjuntos de demandas de ductilidad simplificados. Debe aclararse que estos análisis no representan ningún intento para desarrollar e incorporar nuevos modelos de peligro sísmico que pudieran igualar o mejorar los resultados del modelo empleado en el análisis usado, ni tampoco para desarrollar e incorporar estructuras complejas.

Por lo tanto, se considera que una revisión cuidadosa de los resultados obtenidos, del modelo de peligro sísmico adoptado, así como también el posible consenso entre profesionales de la práctica y los desarrolladores de reglamentos, son necesarios para posibles implementaciones en el código de diseño (García, Pozos, Hong y Gómez, 2010).

### **2.2.2. Fuentes sismogénicas**

Las fuentes sismogénicas son zonas geográficas con similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, se puede afirmar que el potencial de generar sismos es uniforme en toda la extensión de una fuente sísmica. Esta definición es crucial para evaluar el riesgo sísmico, ya que proporciona información esencial sobre los factores físicos que influyen en la actividad sísmica de la región.

Cada fuente posee características únicas y específicas que se definen mediante diversos parámetros sismológicos, los cuales se muestran a continuación:

- Magnitud mínima de Homogeneidad ( $M_{min}$ )
- Distribución de Gutenberg-Richter ( $b$ )
- Tasa media anual de la actividad sísmica ( $m$ )
- Magnitud sísmica máxima ( $M_{max}$ )

La ecuación más utilizada en el cálculo de la sismicidad de cada fuente sismogénica es la expresión de Gutenberg-Richter:

$$\text{Log } N = a - bM$$

Donde:

N: Numero acumulativo de sismos de magnitud M

a,b: Parámetros dependientes de la zona en estudio

Es así como esta ecuación puede reescribirse como:

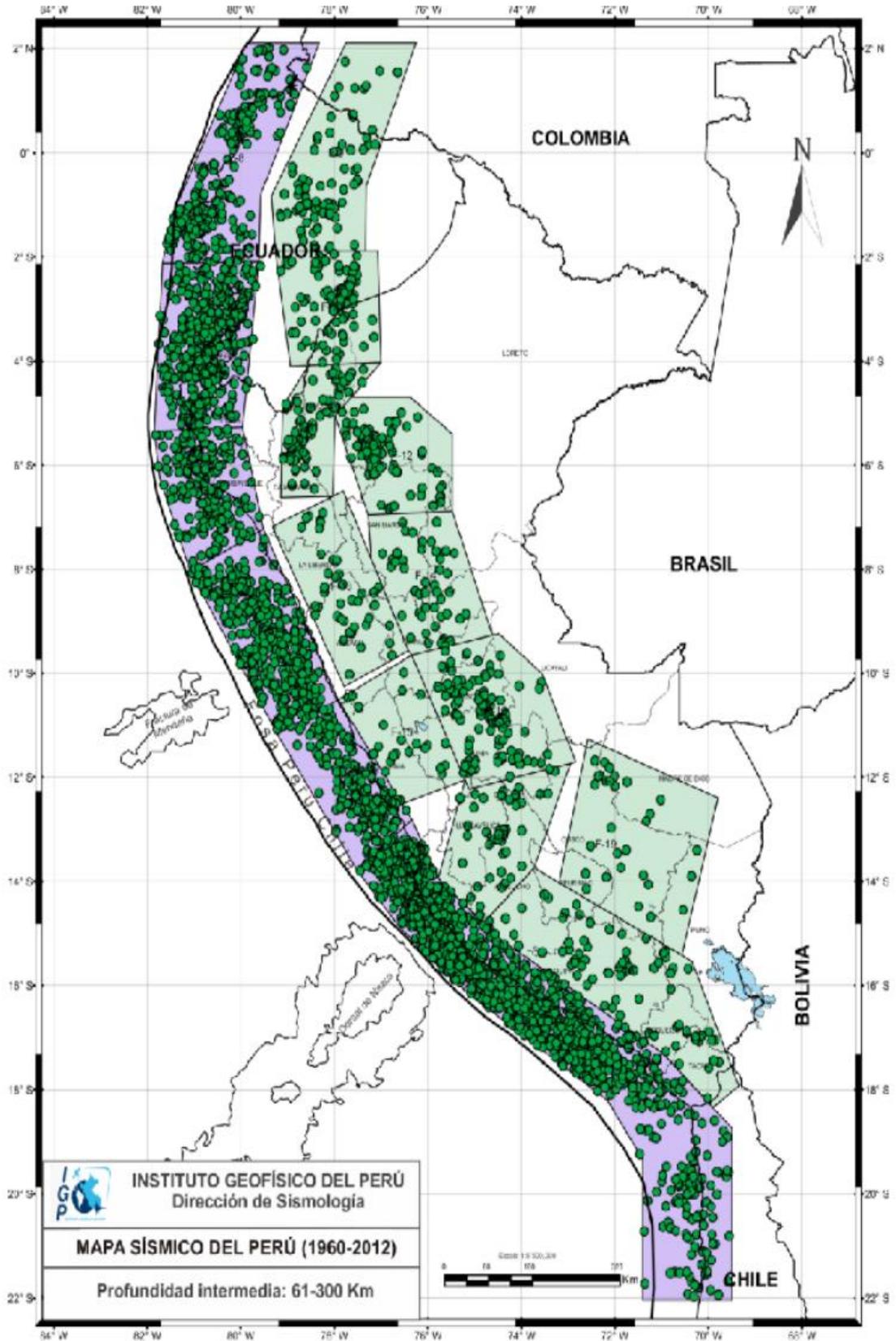
$$N = 10^a * e^{-\beta M}$$

Donde:

$$\beta = b * \ln 10$$

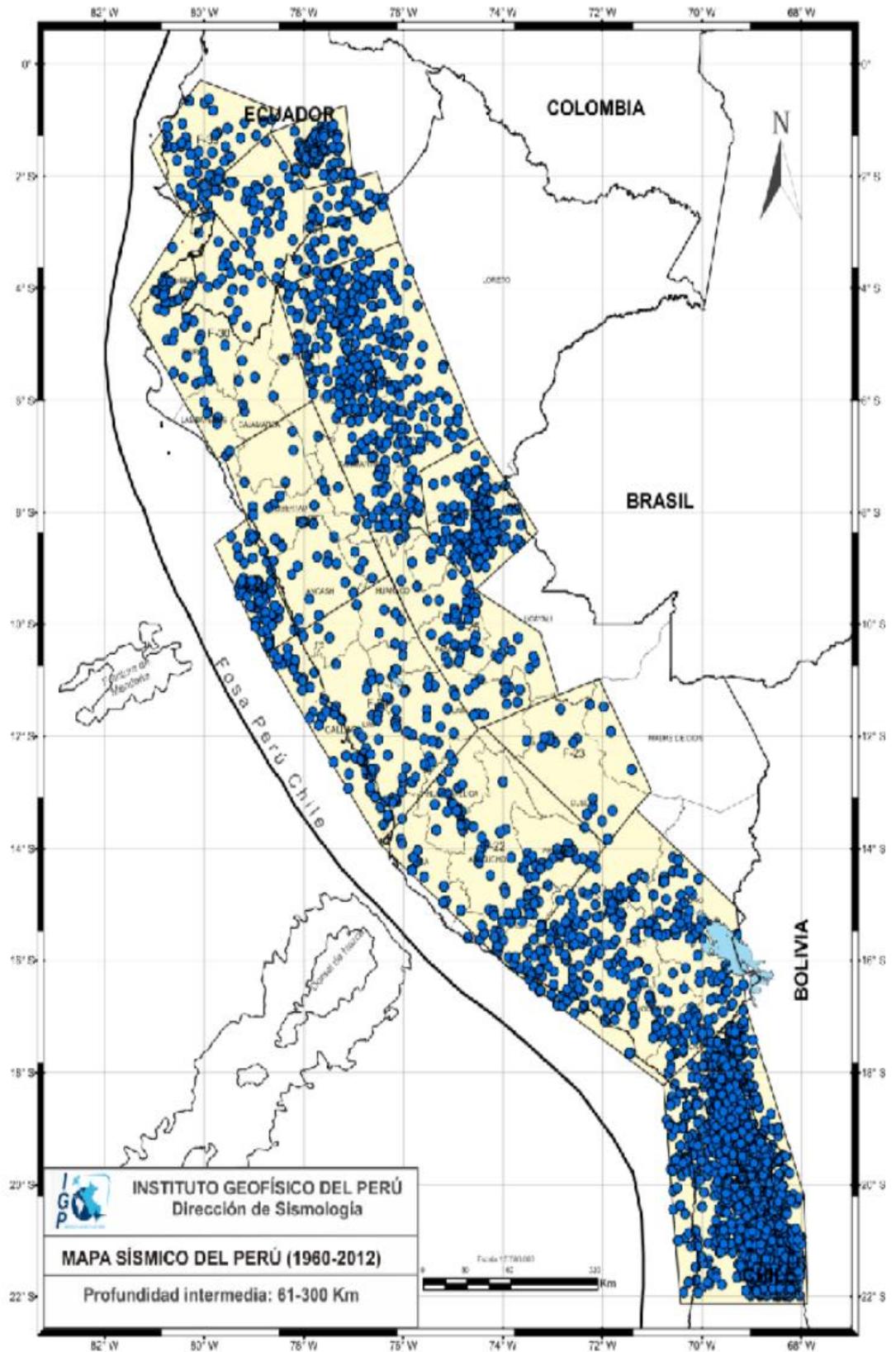
El Instituto Geografico del Peru (IGP) ha evaluado estas fuentes y propone 33 fuentes sismogénicas asociadas al proceso de subducción (interface), a los sistemas de falla corticales e intraplaca. En la figura 2 y 3 se muestra la sismicidad de foco superficial e intermedio.

**Figura 2: Mapa sísmico del Perú de foco intermedio.**



**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

**Figura 3: Mapa sísmico del Perú de foco profundo.**



**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

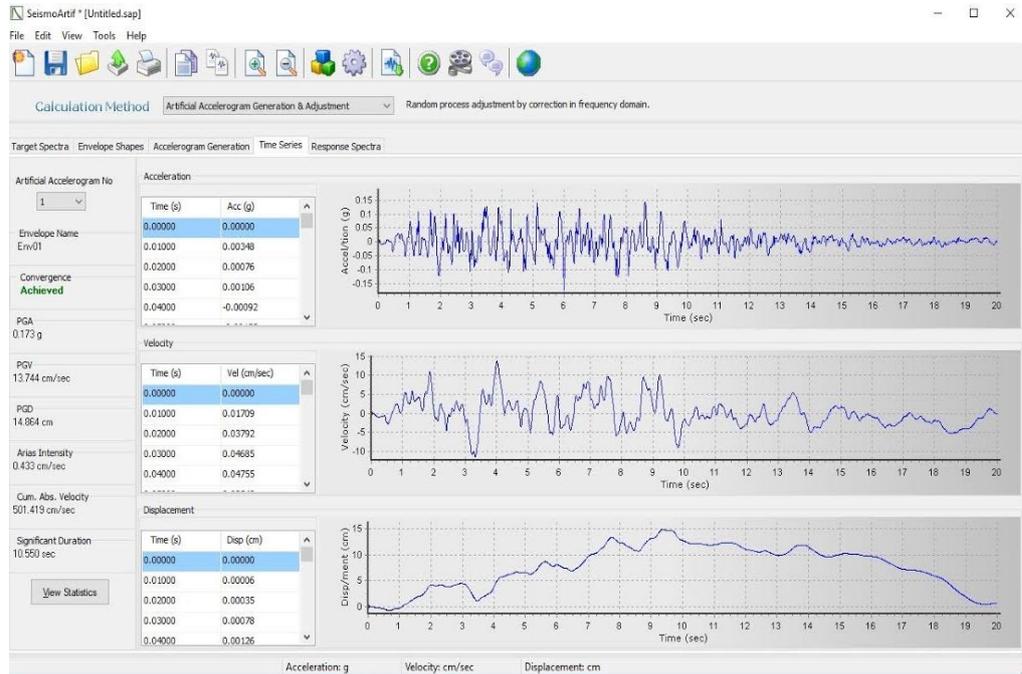
### **2.2.3. Acelerogramas sintéticos**

El parámetro de mayor interés para la ingeniería civil y la ingeniería sismorresistente es la aceleración del movimiento en el suelo, no obstante, también son importantes la velocidad y el desplazamiento que tengan las estructuras sin llegar al colapso. Estos registros capturados mediante medidores de aceleración se denominan de campo cercano, ya que el estudio se realiza en la región epicentral, donde los movimientos en la superficie son más intensos, produciéndose desplazamientos, velocidades y aceleraciones que dependen fundamentalmente de la magnitud del sismo y de su distancia al epicentro.

Se necesita contar con acelerogramas sintéticos para realizar un análisis dinámico de la estructura y la entrada de datos sísmicos necesitara ser definida en series de tiempo de aceleración, estos registros generalmente deberán ser compatibles con el espectro de respuesta elástico que representa las acciones sísmicas de diseño en el lugar de estudio (Piedra y Rubio, 2018).

La generación de acelerogramas sintéticos permite la simulación dinámica no lineal de un sistema geotécnico, estructural o mixto, aunque es un problema complejo, el uso de espectros elásticos no debe considerarse como un método adecuado para generar análisis a detalle. El concepto de ajuste espectral consta en modificar un registro de aceleración semilla de tal manera que su espectro se ajuste de manera cercana al espectro objetivo (espectro de diseño, espectro de peligro uniforme, contenido frecuencial y duración). El uso de software se hace indispensable en este proceso de generar acelerogramas sintéticos por la cantidad de datos usada en el proceso, algunas compañías ofrecen diversos servicios para este fin, en este caso se opta por el uso del software SeismoArtif, en la figura 4 se muestra la interfaz del programa.

**Figura 4: Interfaz del software SeismoArtif**



**Fuente: WWW.SEISMOSOFT.COM**

Siempre es necesario examinar de manera crítica el espectro escalado, con el fin de evaluar si existe una sobre - generación o deficiencia severa para diferentes periodos al periodo objetivo (Flores y Ayes, 2018).

Los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas sintéticos generados deben ser muy estables y adecuados a los estudios de peligro sísmico presente en la normativa vigente. El uso de acelerogramas sintéticos o artificiales será cada vez más frecuente en la práctica de la ingeniería cuando los diseños geotécnicos – estructurales ante sismos se realicen con enfoques basados en desempeño, esta técnica es muy útil sobre todo en los análisis de licuación de suelos donde se presenta exceso de presión de poro a cada ciclo de carga y descarga durante todo el evento sísmico, siendo así, la duración del sismo un factor determinante en la generación de licuación de los suelos. (Flores y Ayes, 2018).

El método usado para la generación de acelerogramas sintéticos es el de Gasparini y Vanmarcke, el cual está basado en la capacidad de expandir la

aceleración de la señal en una serie de ondas sinusoidales, como se muestra en la ecuación 1.

$$a(t) = l(t) \sum_{i=1}^n A_i * \text{sen}(W_i * t - \phi_i)$$

Donde:

$\phi_i$ : Angulo de fase

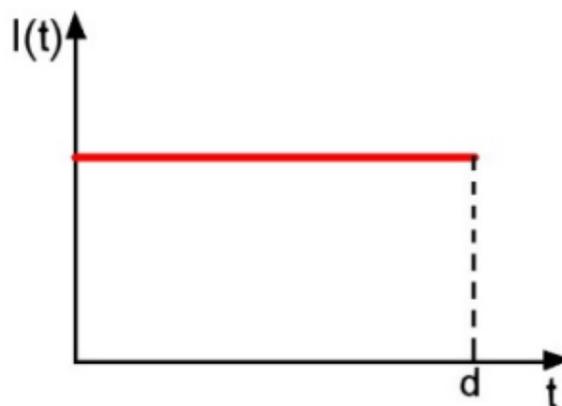
$W_i$ : Frecuencias asociadas

$A_i$ : Amplitudes de onda

$L(t)$ : Función de intensidad envolvente

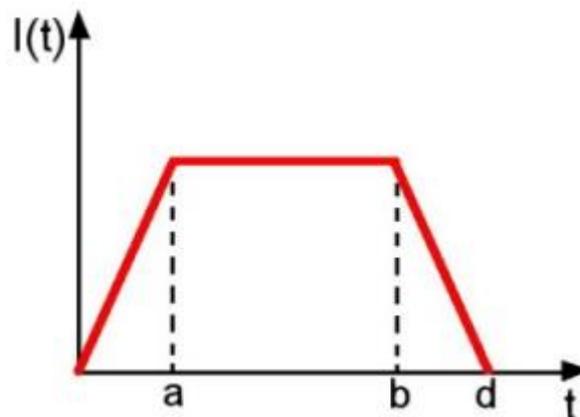
Las funciones de intensidad poseen diversos tipos, entre ellos están:

**Figura 5: Función de intensidad constante**



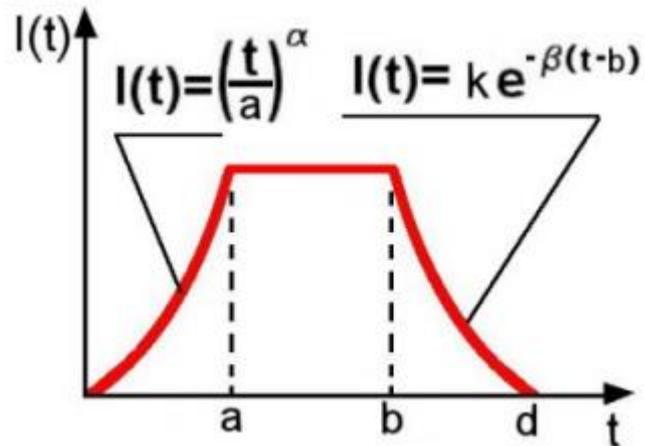
Función de intensidad constante con duración "d".

**Figura 6: Función de intensidad trapezoidal**



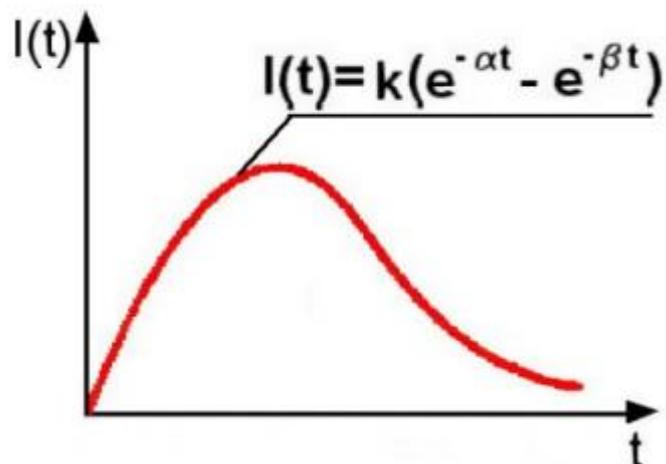
La función de intensidad presenta una forma trapezoidal, caracterizada por una fase inicial de ascenso con duración "a", seguida por una fase constante y, finalmente, una fase descendente de carácter lineal que inicia en "b" y termina en "d"

**Figura 7: Función de intensidad trapezoidal exponencial**



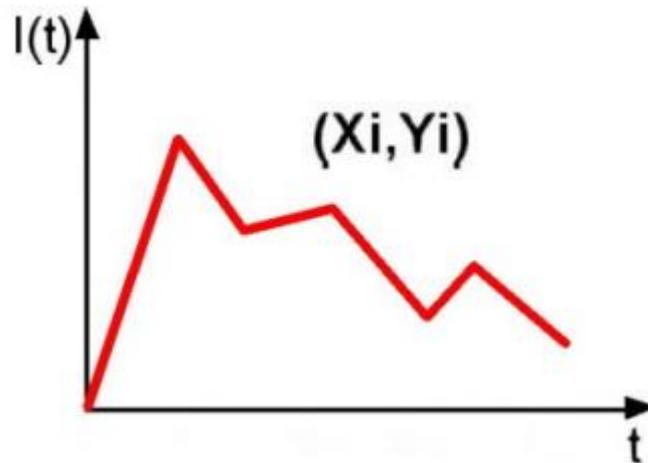
Esta función de intensidad exhibe un perfil trapezoidal, compuesto por una fase inicial de ascenso exponencial de duración 'a' y parámetro 'alpha', seguida de una fase constante, concluyendo con una fase de descenso exponencial de parámetro 'beta', que se inicia en el momento 'b'.

**Figura 8: Función de intensidad exponencial**



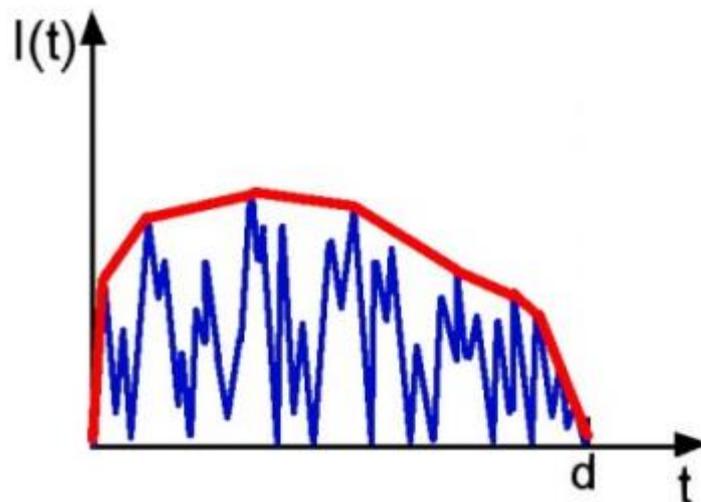
Esta función de intensidad se caracteriza por su comportamiento exponencial, determinado por los parámetros 'Alpha' y 'Beta', que gobiernan el crecimiento y decrecimiento de la misma, respectivamente.

**Figura 9: Función de intensidad personalizada**



La intensidad de esta función se adapta de manera personalizada a partir de un conjunto de puntos definidos por las coordenadas  $(X_i, Y_i)$  proporcionadas por el usuario.

**Figura 10: Función de intensidad según acelerograma**



Representación matemática que caracteriza la intensidad de un acelerograma de partida.

Los métodos para generar acelerogramas sintéticos resulta muy complejo, ya que se deben tener acelerogramas que representen lo mejor posible los movimientos esperados en un sitio particular y ser acordes con la sismicidad local (considerar magnitud y distancia probable de ocurrencia). Existen diferentes criterios para seleccionar los registros, pero no existe un acuerdo para utilizar una metodología específica.

Los métodos más populares para generar registros sísmicos utilizados para los análisis paso a paso son:

Escalamiento de registros reales: Esta metodología consiste en manejar un valor constante para las aceleraciones de los registros sísmicos, de tal forma que su espectro de respuesta de aceleraciones, alcance intensidades preestablecidas, que generalmente son las de un espectro de diseño en una banda de periodos.

Este método es de fácil aplicación, sin embargo, su uso indiscriminado resulta en utilizar sismos que no contienen características de la sismicidad de un sitio particular.

Ajuste de espectros: Mediante la adición de wavelets (funciones de onda) se modifican los espectros base o semilla, de tal forma que el espectro de respuesta de aceleraciones, se ajuste, manteniendo un rango de frecuencias, a un espectro preestablecido. Este método puede realizarse en el dominio del tiempo o frecuencia. Las ventajas de realizarse en el dominio del tiempo, es que se conservan las características no estacionarias de los registros semilla (Atik y Abrahamson, 2010).

Funciones de Green empíricas: Este método de generación de acelerogramas permite generar registros sintéticos a partir de sismos pequeños que han sido registrados en la zona de estudio, los cuales se toman como una función de Green empírica (Joyner y Boore, 1986). El método toma en cuenta diversos parámetros como la magnitud, distancia y ocurrencia sísmica, de tal

forma que las simulaciones o sismos generados artificialmente presentan características similares a la de los sismos que pueden ocurrir en un sitio en particular.

En los tres métodos expuestos, persistentemente existe una intensidad objetivo que comúnmente es el espectro de peligro uniforme, que considera los efectos del lugar en estudio o de sitio y el espectro de diseño para el sitio en particular. Por lo que es válido asumir que los criterios para la obtención de registros sísmicos, deben enfocarse en las intensidades objetivo.

Los métodos para generar acelerogramas sintéticos son muy diversos cada uno con una característica especial, pero todos son válidos teniendo en cuenta que los análisis que realizan contemplan factores de seguridad y están próximos a la realidad física, en el estudio “MÉTODOS PARA GENERAR ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS Y SU INFLUENCIA EN LA RESPUESTA NO LINEAL DE ESTRUCTURAS” (Vásquez y Juárez, 2018). Se realizaron análisis no lineal con registros sintéticos y se obtuvieron desplazamientos máximos de los sistemas de un grado de libertad y las distorsiones globales del sistema, observándose que para terreno rígido, la respuesta no lineal puede ser afectada por el método que se utilice para generar acelerogramas sintéticos, sin embargo, los resultados obtenidos variaron debido a las diferentes fuentes sísmicas, aun así las estructuras no incursionaron de manera significativa en el rango inelástico, concluyéndose que se deben generar acelerogramas sintéticos con criterio, para no subestimar o sobreestimar el comportamiento no lineal de las estructuras.

El estudio de generación de acelerogramas sintéticos es muy útil y relevante para diversas necesidades, una de sus aplicaciones más comunes son las evaluaciones por desempeño para el diseño de edificaciones ubicadas en ciertas zonas con un alto nivel de peligro sísmico, el uso de los acelerogramas sintéticos está orientado a evitar el colapso de las edificaciones

cuando estén sometidas a solicitaciones sísmicas, detectando posible daños en los elementos estructurales, mediante análisis por desempeño y tiempo historia, donde si no se posee registros reales de sismos pasados, se puede optar por el uso de los acelerogramas artificiales.

La tendencia actual es hacer análisis en el dominio del tiempo, con una solución clara de la ecuación del movimiento, sobre todo en el campo de la ingeniería estructural, mediante estos análisis podemos describir de alguna manera el comportamiento que tendrá nuestra estructura y por cuanto tiempo estaría sometida al movimiento, los análisis lineales con espectros objetivo no consideran el cambio de las condiciones estructurales conforme va pasando el tiempo, por lo tanto si conocemos el tiempo de los desplazamientos máximos, si estos están después de iniciado la fluencia pueden ser engañosos, es por ello que en los análisis tiempo historia no lineales podemos detectar diversas rotulas plásticas ya que en este modelo pseudotridimensional se incorporan las propiedades inelásticas de los materiales, sin embargo, este tipo de análisis es muy sofisticado ya que uno de sus principales requisitos es modelar los elementos resistentes con características que tengan datos consistentes o los obtenidos experimentalmente.

Se deben realizar estos análisis utilizando las dos componentes horizontales de los registros en los acelerogramas, cabe resaltar que los acelerogramas utilizados deben ser cuidadosamente seleccionados y escalados cumpliendo con las características de sitio, distancia a la falla, mecanismo de ruptura, efectos de suelo, entre otros. Se deberá poseer un mínimo de 3 pares eventos sísmicos para poder utilizar acelerogramas artificiales.

#### **2.2.4. Espectro de respuesta**

El espectro de respuesta se usa como un medio práctico para caracterizar los movimientos del terreno y sus efectos sobre las estructuras, este método resume convenientemente la respuesta máxima de todos los posibles

sistemas lineales de 1GDL a un componente particular del movimiento del terreno. También proporciona un enfoque práctico para la aplicación del conocimiento de la dinámica estructural al diseño de estructuras.

El espectro de respuesta es una representación gráfica de cómo la amplitud de la respuesta de una estructura varía en función de la frecuencia del terremoto. En el caso de los espectros de respuesta de aceleraciones, se muestra cómo la aceleración máxima experimentada por una estructura varía con la frecuencia.

La gráfica del espectro de respuesta expresa el valor máximo de una cantidad de respuesta como una función de diversos parámetros que se desea medir como el periodo natural, frecuencias angulares y frecuencia cíclica, a esto se denomina como espectro de respuesta para dicho parámetro de medición o cantidad.

Existen diversos tipos de espectros de respuesta, cada uno utilizado para un fin específico, estos espectros son:

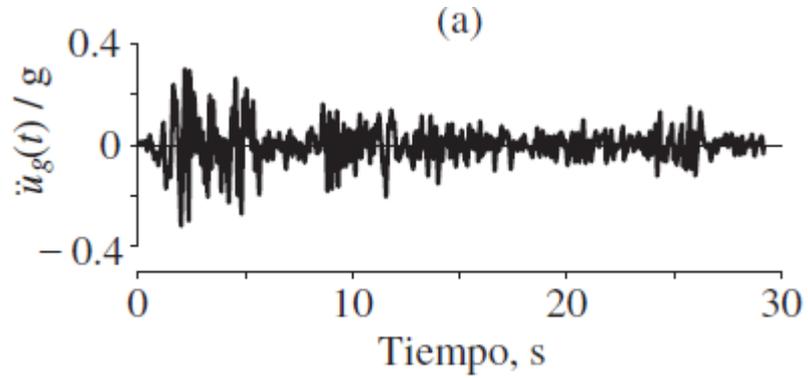
- Espectro de respuesta de deformación
- Espectro de respuesta de pseudo-velocidad
- Espectro de respuesta de pseudo-aceleración

En la presente investigación se dará énfasis en el espectro de respuesta de deformación, el cual representa de forma gráfica la variación de los desplazamientos en función de los periodos naturales de cada estructura de 1GDL.

En la Figura 1, extraída del libro de Anil K. Chopra, se presenta de manera visual el espectro de desplazamiento generado a partir de un registro acelerográfico. Este espectro ilustra de manera efectiva cómo el movimiento del terreno afecta a estructuras de un grado de libertad (1GDL). Se observan los desplazamientos resultantes en diversas estructuras, cada una con su propio período natural.

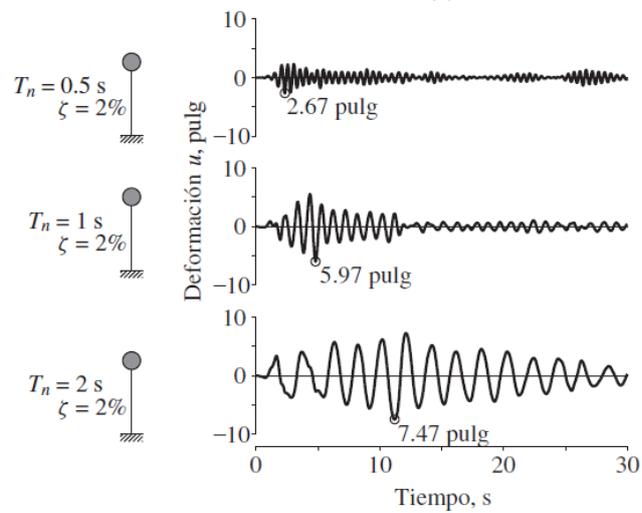
función de sus características y del tipo de movimiento sísmico al que estarán expuestas.

**Figura 11: Registro acelerográfico de El Centro, California**



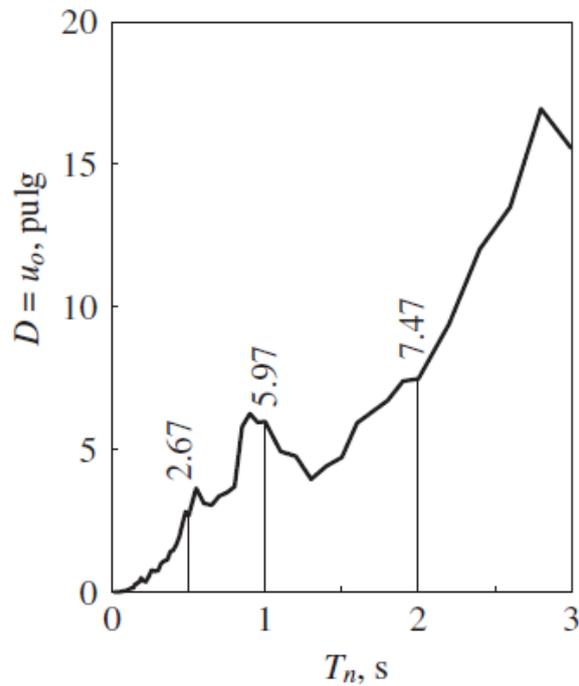
**Fuente: Dinámica de Estructuras, Anil K. Chopra**

**Figura 12: Respuesta de deformación de 3 diferentes sistemas de 1GDL con distintos periodos de vibración.**



**Fuente: Dinámica de Estructuras, Anil K. Chopra**

**Figura 13 Espectro de respuesta de deformación para el registro de El Centro**



**Fuente: Dinámica de Estructuras, Anil K. Chopra**

Esta representación gráfica es esencial para comprender cómo diferentes estructuras responden ante los movimientos sísmicos. Al comparar los desplazamientos asociados a distintos períodos naturales, se puede evaluar el comportamiento relativo de las estructuras y determinar cuál de ellas es más vulnerable o susceptible a los efectos del sismo.

Los espectros de respuesta de aceleraciones generados con acelerogramas sintéticos son una herramienta importante en el campo de la ingeniería sísmica. Estos espectros proporcionan información sobre cómo un edificio o estructura responderá a un terremoto específico en términos de aceleración. Cabe resaltar que el periodo de vibración es el tiempo necesario para que una estructura complete un ciclo completo de vibración.

Se analizan parámetros como la aceleración máxima, la velocidad máxima y el desplazamiento máximo para determinar la capacidad de la estructura para resistir el evento sísmico.

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **Peligro sísmico**

El peligro sísmico de una región se denomina a la probabilidad de que se produzcan en ella movimientos sísmicos de una cierta importancia en un plazo determinado.

#### **Acelerograma**

Es un registro de la variación de la magnitud de la aceleración del terreno en un sitio dado en función del tiempo. La aceleración se registra generalmente en tres direcciones: dos componentes horizontales, ortogonales entre sí, y una vertical.

#### **Epicentro**

Punto de la superficie terrestre situado en la vertical del foco o hipocentro de un movimiento sísmico y donde este adquiere su máxima intensidad

#### **Espectro de peligro uniforme**

Se define el espectro de aceleraciones de peligro uniforme como la curva que une las aceleraciones espectrales asociadas independientemente a cada período estructural con una probabilidad de excedencia dada en un tiempo determinado y para un cierto factor de amortiguamiento con respecto al crítico.

#### **Fuente sismogénica**

Una fuente sismogénica es una representación espacio – temporal de un fenómeno físico que se manifiesta a través de la sismicidad, es una manera de aproximar la ocurrencia espacial de sismos siendo esta capaz de generar movimientos del suelo significativos en los sitios de interés.

## **Aceleración máxima del suelo (PGA)**

Es la amplitud de la mayor aceleración absoluta registrada en un acelerograma en un sitio durante un terremoto en particular, el PGA a menudo se divide en componentes horizontales y verticales.

### **2.4. Formulación de hipótesis**

#### **2.4.1. Hipótesis general**

“Los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico, para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento de 25% debido a la aplicación de la metodología FEMA 356”

#### **2.4.2. Hipótesis específica**

- Los valores de aceleración espectral obtenidos en el espectro de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 1000 años estarán en el rango de 0.70g y 1.00g.
- Los acelerogramas sintéticos presentan aceleraciones máximas mejoradas por la metodología FEMA 356 que son muy similares a las obtenidas con acelerogramas reales.
- El tiempo de los eventos sísmicos simulados mediante los acelerogramas sintéticos presentan duraciones cercanas a 1 minuto lo que influye directamente en el daño de las estructuras durante un sismo.

### **2.5. Identificación de variables**

#### **2.5.1. Variable independiente**

Aplicación de la metodología FEMA 356.

#### **2.5.2. Variable dependiente**

Los valores de PGA para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento del 25%.

### 2.5.3. Variable interviniente

Provincia de Pasco

### 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

*Tabla 1: Operacionalización de variable independiente.*

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Aplicación de la metodología FEMA 356	El procedimiento para estimar la probabilidad de que un determinado nivel de intensidad sísmica sea excedido en un sitio y durante un periodo de tiempo se conoce como análisis de peligro sísmico probabilístico.	Aplicación de la metodología FEMA 356	<b>D1:</b> Características geotécnicas	<b>I1:</b> tipo de suelo

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2: Operacionalización de variable dependiente.**

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTO
Los valores de PGA para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento del 25%	Acelerogramas generados por programas, que simulen el fenómeno sísmico	Generación de acelerogramas	D1: acelerogramas	I1: Propiedades suelo	Formato de análisis suelo.
				I2: fallas	Formato para la cantidad de fallas
				I3: profundidad del sismo	Formato para medir la profundidad

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

Investigación Cuantitativa: Porque busca explicar o predecir el comportamiento más probable de los suelos en la provincia de Pasco ante un evento sísmico relevante, a través de un enfoque de obtención de datos numéricos, identificando tendencias, comprobando relaciones directas entre distintos fenómenos naturales y mediante herramientas estadísticas, probabilísticas y numéricas cuantificar el problema de investigación.

Investigación Aplicada: Porque mantiene una estrecha relación con los hechos conocidos y se enriquece con ellos, pero se caracteriza por su interés en la aplicación, uso y consecuencias prácticas del conocimiento, indagando el conocimiento generado para hacer, para actuar y construir una base de datos que aportaran a futuras investigaciones de riesgo sísmico, vulnerabilidad sísmica, análisis no lineal y tiempo historia de las estructuras.

Teniendo como objetivo resolver los problemas sobre incertidumbre de información acelerográfica, buscando y consolidando el conocimiento para su aplicación y por ende para el enriquecimiento del desarrollo cultural y científico.

### **3.2. Nivel de investigación**

El nivel de investigación es de tipo descriptivo porque se utilizarán 33 fuentes sismogénicas y se simularán en el software CRISIS.v18 y su respectivo análisis.

### **3.3. Métodos de investigación**

La investigación tiene la metodología descriptiva, porque se interpreta los resultados presentados

### **3.4. Diseño de investigación**

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el tipo de investigación “Descriptiva - Horizontal” porque describe, observa y luego analiza las características de las fuentes sismogénicas que afectan principalmente a Pasco, siendo estas corticales e intraplaca, así como el comportamiento más probable de las señales sintéticas, presentando una interpretación correcta de las características y rasgos importantes para la zona en estudio, siguiendo la metodología FEMA-356, que normaliza los espectros de peligro sísmico en espectros de diseño para diferentes periodos de retorno, intentando resolver el comportamiento sísmico más probable, según los mapas de peligro sísmico, que tengan lugar en el distrito de Pasco.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

Como población de estudio se consideró a las 33 fuentes sismogénicas actualizadas presentadas en el estudio “RE-EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO PARA EL PERÚ” (Tavera, Bernal, Condori, Ordaz, Zevallos, & Ishizawa, 2014).

Estas fuentes cuyas coordenadas geográficas serán usadas en la presente tesis poseen una distribución espacial de la sismicidad en el territorio peruano, siendo clasificadas en interface, intraplaca y corticales. Estas fuentes

cuyas coordenadas geográficas serán usadas en la presente tesis poseen una distribución espacial de la sismicidad en el territorio peruano, siendo clasificadas en interface, intraplaca y corticales.

### **3.5.2. Muestra**

Como muestra de estudio se consideró a las fuentes sismogénicas corticales F15 – F16 e intraplaca F24-F25, por ser estas las que afectan directamente al lugar de estudio.

## **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **3.6.1. Técnicas de recolección de datos**

- La documentación: Utilizadas como fuente de consulta, mediante los artículos científicos de evaluación del peligro asociado a los sismos y los efectos secundarios en el Perú, con el propósito de obtener datos de fuentes sismogénicas y evaluar la correcta modelación con el propósito de ampliar y profundizar los conocimientos sobre las fuentes que originan los sismos y sus efectos en la zona de estudio.
- Fuentes Bibliográficas: Con la exploración bibliográfica de los diferentes temas sobre el riesgo sísmico y su evaluación probabilística, mediante la búsqueda, recopilación, organización y valoración crítica de los temas se busca ampliar el conocimiento para verlo de forma panorámica con los diversos componentes que lo afectan.
- Con la experimentación de resultados: Se busca modelar las fuentes sismogénicas para su posterior análisis, podremos experimentar y validar los datos mediante la experimentación de diversos parámetros y metodologías propuestas en las leyes de atenuación, para verificar que los resultados del modelamiento matemático de las fuentes sismogénicas sean correctos y estén dentro del rango aceptado.

Los resultados de los mapas de peligro sísmico serán reportados en cuadros e imágenes para su mayor comprensión en la presente investigación

### **3.6.2. Instrumentos de recolección de datos**

La documentación presentada es para recopilar los datos y realizar su respectivo procesamiento.

### **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Se utilizarán diversos procesos estadísticos, obteniendo los datos previamente codificados asignando atributos o valores específicos a las 33 fuentes sismogénicas con variables que se van a transferir a una matriz de datos, mediante este proceso se podrá agrupar y estructurar según tipos de fuentes, para entender el comportamiento de estas en la zona de estudio y su posterior análisis

### **3.8. Tratamiento estadístico**

Se harán los análisis cualitativo y cuantitativo de los datos obtenidos en el estudio, a través del software R-CRISIS, con un 10% de probabilidad de excedencia que nos permitirá definir zonificaciones de peligro sísmico en base al PGA, reflejando así el peligro que generarían los terremotos intraplaca para el área de estudio, estos datos serán reportados mediante cuadros estadísticos y mapas de peligro sísmico para la Provincia de Pasco.

### **3.9. Orientación ética, filosófica y epistémica**

La investigación debe tomar en cuenta los documentos publicados y realizar su respectiva referencia de acuerdo a los formatos que solicita cada entidad.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **4.1.1. Determinación de la velocidad de ondas de corte**

El Cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k) se ubica en las mesetas interandinas de la región central de Perú, entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental. La mayor parte de su área está conformada por estas mesetas interandinas y forma parte de la cuenca del lago Junín, el punto de origen del río Marañón.

En la zona norte, el relieve se torna más abrupto, caracterizado por valles en forma de "V" que son producto de la erosión causada por la red hidrográfica del río Huallaga.

La evolución geológica se ha desarrollado en nueve etapas: Precámbrico, Paleozoico inferior, Paleozoico superior, Pérmico superior-Jurásico inferior, Jurásico superior-Cretácico, Cretácico medio-superior, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. Estos ciclos se distribuyen en cinco dominios tectonoestratigráficos: Occidental, Central, Suroccidental, Nororiental y Oriental. En la parte oriental y noroeste del cuadrángulo de Cerro de Pasco, emergen las formaciones rocosas más antiguas de la zona de estudio. El nivel de metamorfismo ha permitido clasificar estas rocas como parte del Complejo

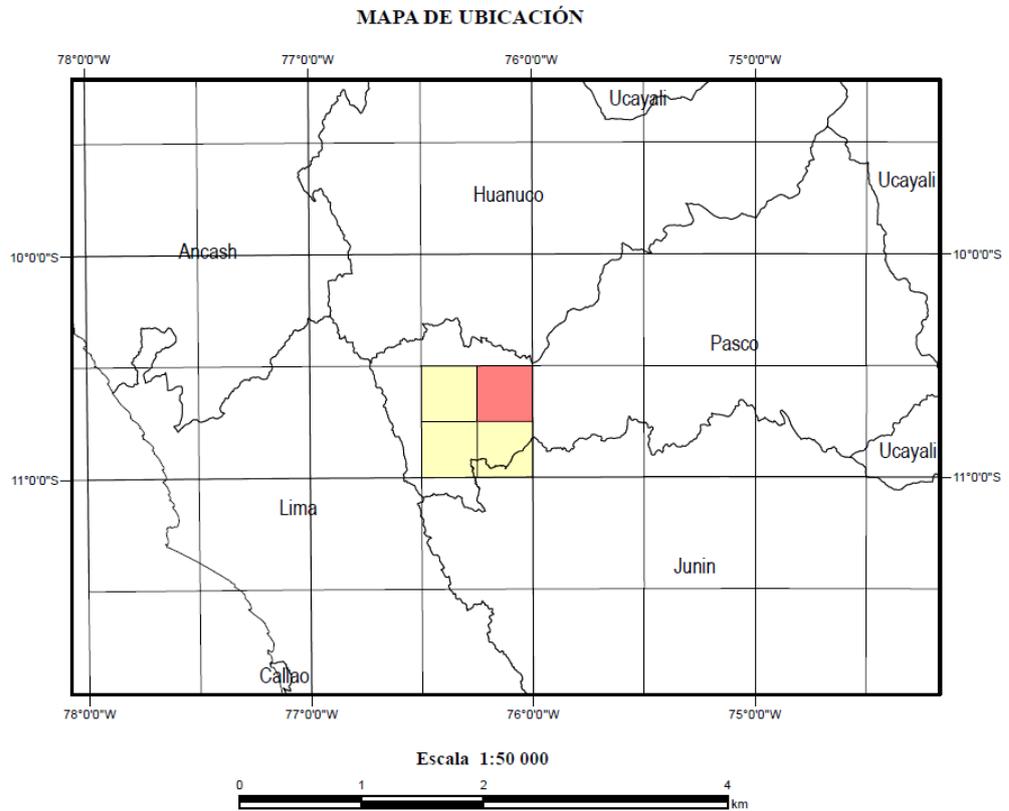
Metamórfico del Marañón, cuya edad podría remontarse al Precámbrico, aunque evidencias recientes cuestionan esta afirmación.

El Paleozoico inferior se compone de areniscas y pizarras del Grupo Cabañillas, que afloran en la parte central del área de estudio, creando una franja alargada en dirección norte-sur, que constituye la elevación de Cerro de Pasco. La porción superior del Paleozoico inferior ha experimentado erosión, lo que impide observar el límite con las secuencias del Paleozoico superior. El ciclo del Paleozoico superior y Triásico inferior se caracteriza por la presencia de areniscas y lutitas negras depositadas en un ambiente fluvial, correspondientes a la parte inferior del Grupo Ambo.

Se registra una secuencia volcánica de riolitas con flujos piroclásticos, cubierta discordantemente por una secuencia de areniscas intercaladas con calizas fosilíferas pertenecientes a los grupos Tarma-Copacabana del Pérmico inferior. El Grupo Mitu, atribuido al Pérmico medio-superior y Triásico inferior, se sitúa en discordancia sobre las areniscas y calizas de los grupos Tarma-Copacabana, compuesto principalmente de areniscas, conglomerados e intercalaciones de lavas oscuras originadas por la formación de un rift continental.

A continuación, se muestra la geología local de la zona en estudio, en la figura 14 se puede observar el mapa de ubicación de la zona en estudio.

**Figura 14: Ubicación de la zona en estudio**



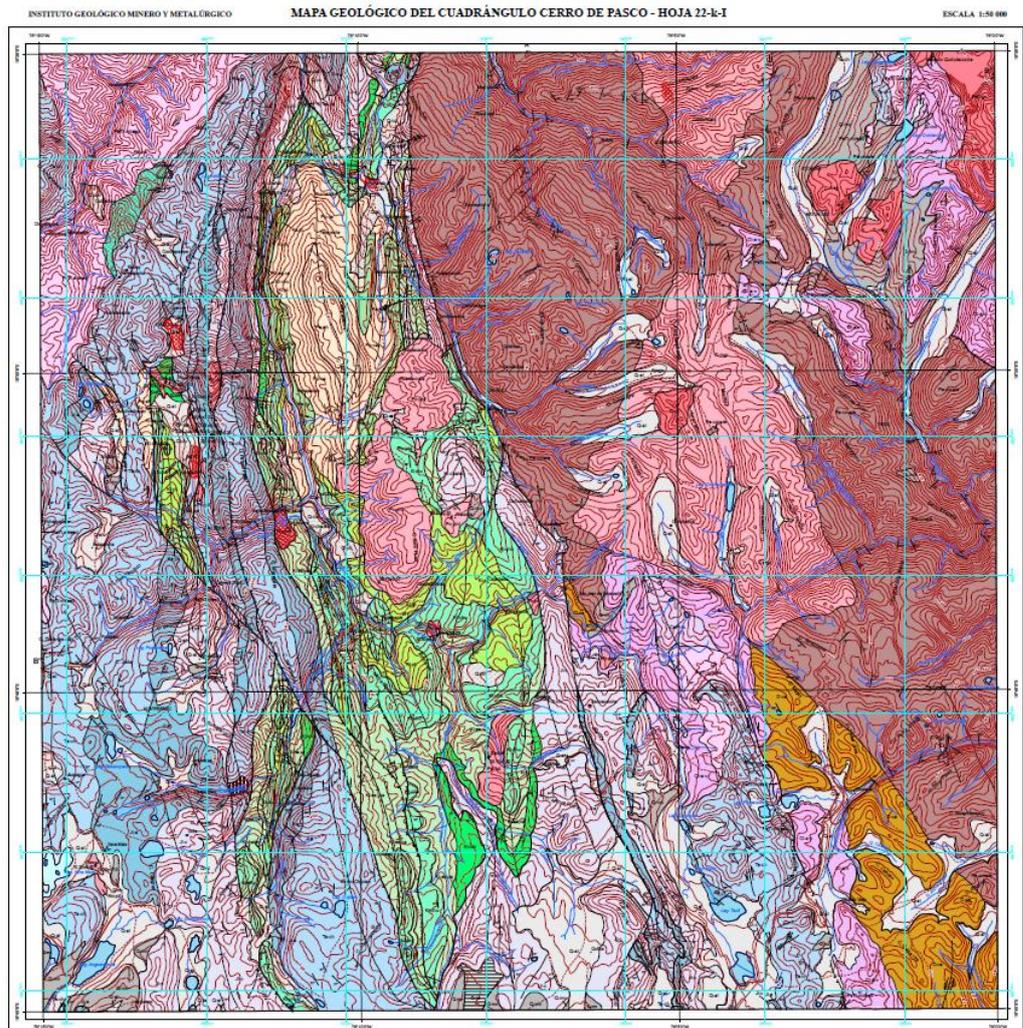
**Fuente: Carta Geográfica Nacional del Perú**

La región de Cerro de Pasco es reconocida a nivel global por albergar la mina de Cerro de Pasco. Mediante un análisis metalogenético detallado, se han identificado cinco etapas metalogenéticas significativas. La más antigua corresponde al Paleozoico inferior, caracterizada por presencia de depósitos de oro vinculados al Complejo Metamórfico del Marañón. A continuación, se presenta la etapa del Pérmico, evidenciada por la presencia de molibdeno, asociado a intrusiones de granitos. Posteriormente, surge la etapa del Eoceno superior, marcada por mineralización aurífera que corresponde a la mina Quicay. Seguida de esta, se encuentra la etapa del Oligoceno, con mineralización polimetálica que dio origen a minas notables como Milpo, Atacocha, y Machcan, entre otras. Finalmente, se observa la etapa del Mioceno,

con mineralización tanto aurífera como polimetálica, responsable de la formación de minas como Cerro de Pasco, Colquijirca y Huarón, entre otras.

Al correlacionar estas etapas metalogenéticas con áreas adyacentes, es posible identificar ocho franjas metalogenéticas regionales que se extienden más allá del Cuadrángulo de Cerro de Pasco. Estas incluyen una franja de depósitos de oro en rocas metasedimentarias del Ordovícico y Siluro-Devónico, una franja de yacimientos de pórfidos de Cu-Mo-Zn y depósitos asociados con intrusiones del Pérmico y ocurrencias de molibdeno ligadas a granitos del Carbonífero. Además, una franja de depósitos de cobre en rocas volcánicas del Cretácico, una franja de depósitos auríferos del Eoceno superior, una franja de depósitos polimetálicos en skarn, cuerpos y vetas del Oligoceno, otra franja de depósitos polimetálicos estratoligados del Oligoceno, una franja de depósitos polimetálicos asociados a diatremas volcánicas del Mioceno, y finalmente, una franja de depósitos polimetálicos relacionados a intrusiones subvolcánicas del Mioceno. La geología local según los mapas geológicos se muestra a continuación en la figura 15.

**Figura 15: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cerro de Pasco 22-K-I**



**Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú**

Para determinar la velocidad de onda de corte en los suelos ( $V_S$ ), lo más efectivo es recurrir a pruebas geofísicas de campo que permitan obtener estos valores directamente mediante alguno de los métodos de geofísica sísmica.

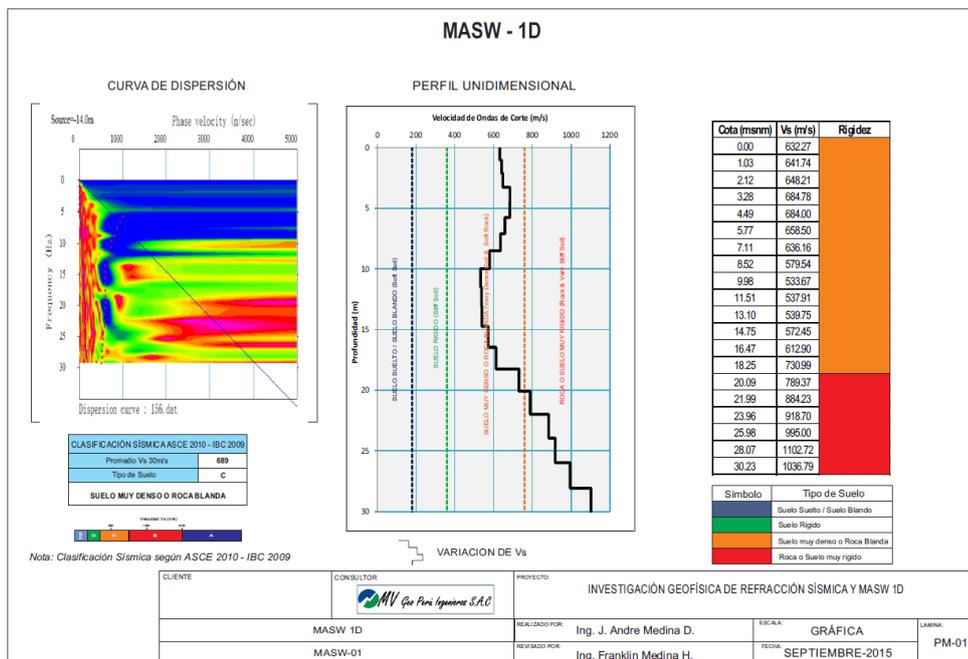
En ausencia de estas pruebas geofísicas, es común recurrir a ecuaciones empíricas para estimar la  $V_S$  a partir de las resistencias a la penetración estándar ( $N$ ). En ciertas ocasiones, se comete el error de intentar determinar la velocidad de onda de corte ( $V_S$ ) a partir de la medición de la velocidad de onda de compresión ( $V_P$ ). La velocidad de ondas de corte es una propiedad fundamental de los materiales geológicos y varía según la naturaleza

y composición de los mismos. Por ejemplo, los materiales rocosos suelen tener velocidades de ondas de corte más altas que los suelos blandos.

Esta propiedad es de gran importancia en geotecnia y sismología, ya que influye en la forma en que las ondas sísmicas se transmiten y se dispersan a través del suelo y las rocas. La determinación de la velocidad de onda de corte (VS) encuentra aplicación en diversas áreas de la geotecnia, incluyendo la evaluación del módulo de rigidez ante pequeñas deformaciones ( $GO = VS^2$ ).

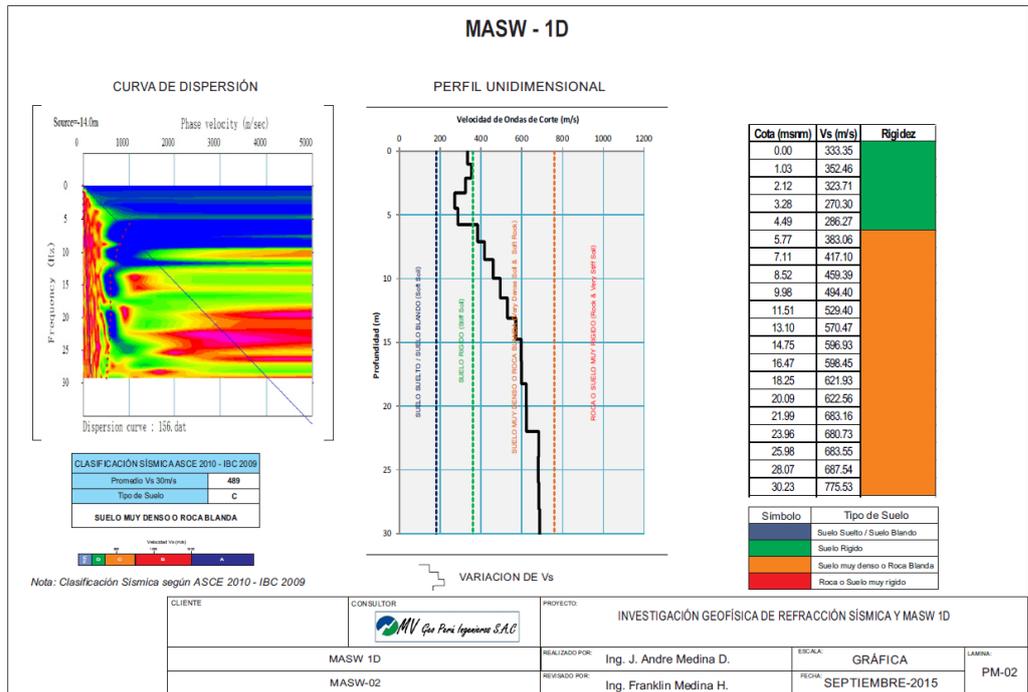
En el presente estudio, se emplearon datos recopilados de un estudio de inversión estatal, donde se obtuvieron las velocidades de ondas de corte características de la zona. Estos valores fueron esenciales para el diseño de los acelerogramas artificiales generados por computadora, contribuyendo así a una evaluación más precisa de la respuesta sísmica de la región, las Figuras 16, 17, 18 y 19 muestran los valores de onda de corte utilizadas en el presente estudio.

**Figura 16: Ensayo de refracción sísmica perfil C-1**



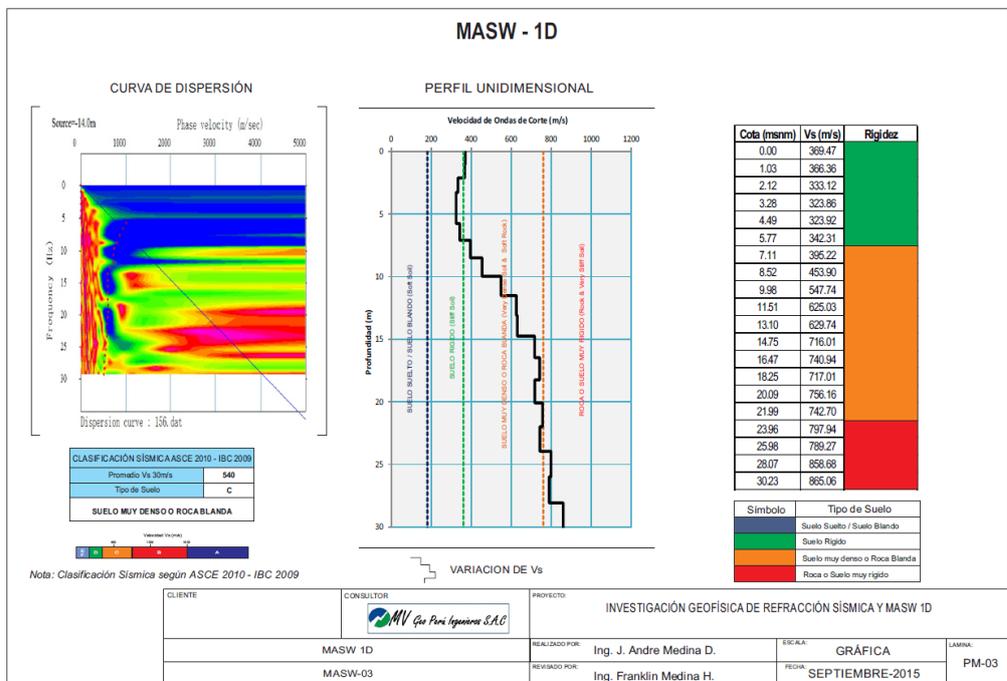
**Fuente: MV Geo Perú Ingenieros S.A.C**

**Figura 17: Ensayo de refracción sísmica perfil C-2**



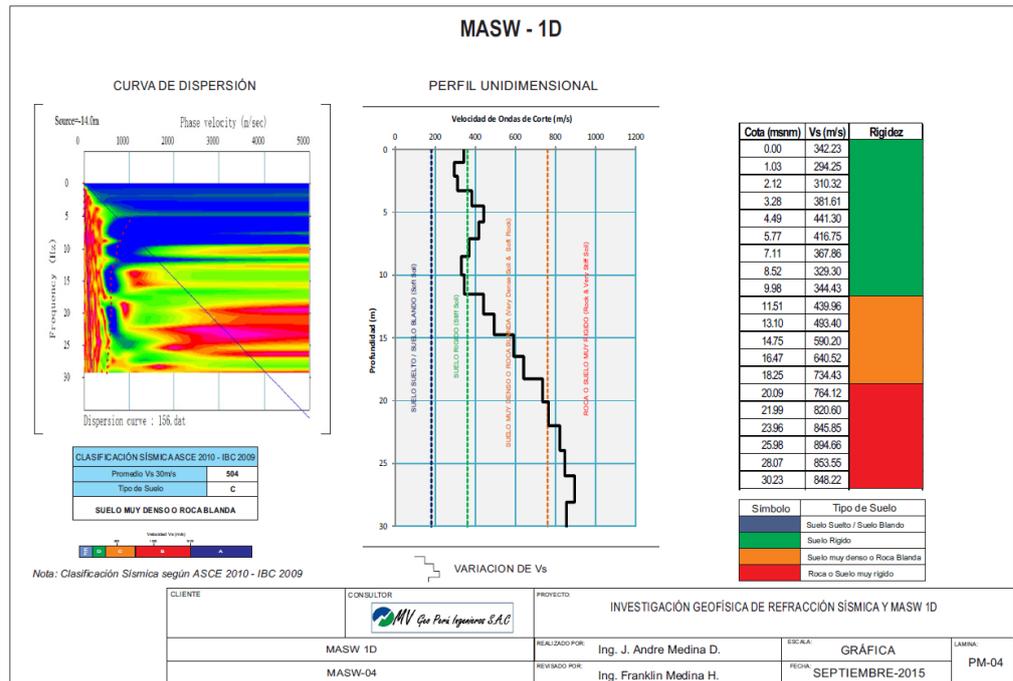
**Fuente: MV Geo Perú Ingenieros S.A.C**

**Figura 18: Ensayo de refracción sísmica perfil C-3**



**Fuente: MV Geo Perú Ingenieros S.A.C**

**Figura 19: Ensayo de refracción sísmica perfil C-4**



**Fuente: MV Geo Perú Ingenieros S.A.C**

#### 4.1.2. Análisis probabilístico del peligro sísmico

En un análisis no lineal uno de los factores relevantes es la selección de registros sísmicos a utilizar, un gran problema para la Región de Pasco es que no cuenta con registros de sismos representativos, debido a esto se recurre al análisis probabilístico de peligro sísmico, que es calculado con la herramienta CRISIS ver.18.4.2, desarrollado por Ordaz et al (2007). Cuyos datos de entrada consideran la suma de los efectos de totalidad de las fuentes sismogénicas, la distancia entre cada fuente y los puntos de interés a evaluar.

#### ➤ Fuentes sismogénicas

Se usaron 33 fuentes, las cuales fueron presentadas en el estudio “RE-EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO PARA EL PERÚ” (Tavera, Bernal, Condori, Ordaz, Zevallos, & Ishizawa, 2014).

Estas fuentes, cuyas coordenadas geográficas fueron usadas en esta tesis, se presentaron en base a la distribución espacial de la sismicidad, como se muestra en las figuras 21, 22 Y 23 relacionada con el proceso de subducción

(interface), sistemas de falla (corticales) y a la geometría de la placa de Nazca por debajo del continente (intraplaca) correspondientemente.

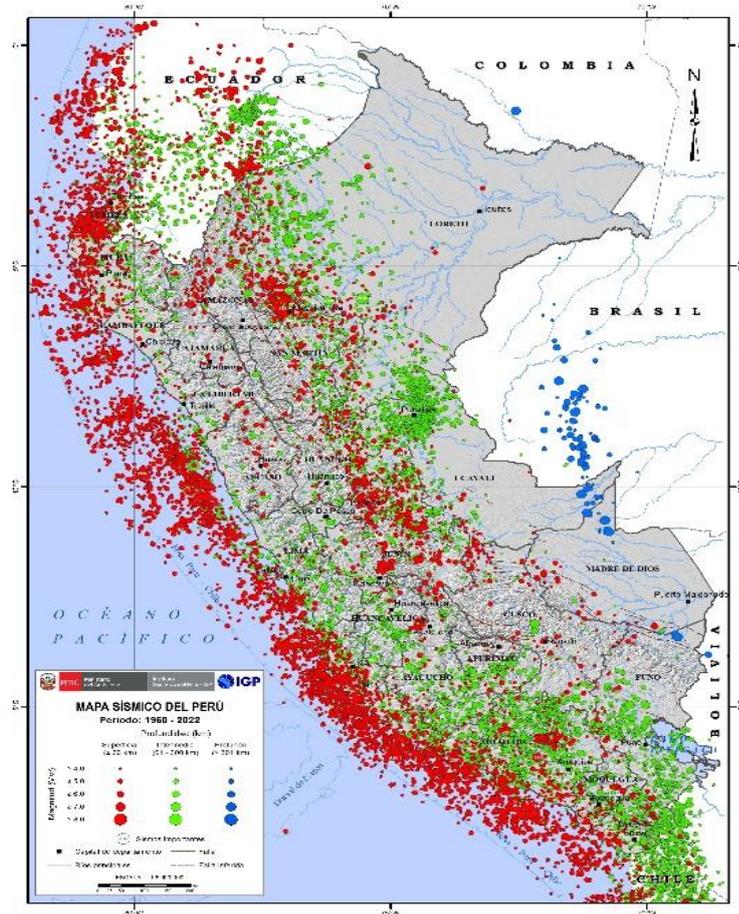
En la tabla 4 se muestra la distribución de las 33 fuentes sismogénicas.

**Tabla 3: Fuentes sismogénicas**

Fuentes Sismogénicas	Interface	F1	-	F8
	Corticales	F9	-	F19
	Intraplaca	F20	-	F33

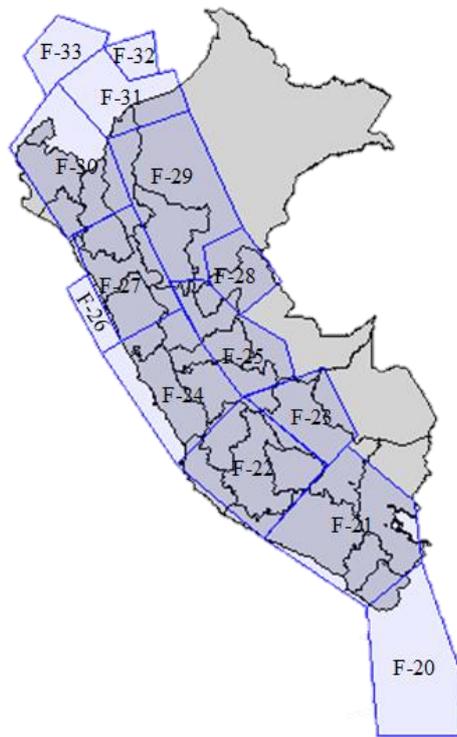
**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

**Figura 20: Mapa Sísmico del Perú**



**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

**Figura 21: Fuentes Interface**



**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

**Figura 22: Fuentes Corticales**



**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

Para la recurrencia sísmica se usó el modelo de (Gutenberg y Richter, 1956). Cuyos parámetros sismológicos se muestran en la tabla, donde:

**Mmin:** Magnitud mínima significativa para cada fuente.

$\lambda$ : Tasa de excedencia de la magnitud mínima.

$\beta$ : Coeficiente logarítmico de cada fuente.

Mmax: Valor máximo esperado en cada fuente.

**Tabla 4: Valor de Mw en las 33 fuentes sismogénicas**

FUENTE	Mw			
	Mmin	Mmax	$\beta$	Tasa
F-1	5.2	8.8	1.84	2.03
F-2	4.3	8.2	1.66	11.54
F-3	4.3	8	1.78	12.83
F-4	4.3	8.6	1.69	4.24
F-5	4.3	7.7	1.6	9.09
F-6	4.3	7	2.07	4.48
F-7	4.3	7	2.35	9.16
F-8	4.3	8	1.48	4.2
F-9	4.8	6.8	1.7	1.08
F-10	5.2	6.8	2.49	0.78
F-11	4.3	5.8	2.86	1.72
F-12	5.2	6.5	2.81	1.74
F-13	4.3	7.2	1.94	0.84
F-14	4.8	5.5	2.35	0.76
F-15	4.4	5.5	4.74	0.36
F-16	5.2	5.5	2.74	1.6
F-17	5.2	5.5	4.01	0.44
F-18	4.8	5.5	2.83	1.48
F-19	5	6	2.29	0.3
F-20	4.4	7	1.88	22.14
F-21	5.2	6.8	2.6	4.32
F-22	5.1	6	2	2.02
F-23	4.6	6	0.95	0.18
F-24	5.2	6.8	2.37	1.06
F-25	5	6	2.79	1.38
F-26	4.3	6	3.38	0.74
F-27	4.3	6	2.06	0.86
F-28	5.1	7	2.67	3
F-29	4.3	7.2	1.69	6.78
F-30	5.1	7.5	3.41	1.32
F-31	5.3	7	2.62	1.14
F-32	4.3	6	2.25	0.96
F-33	4.8	6	1.94	1.6

**Fuente: Instituto Geofísico del Perú**

➤ **Leyes de atenuación**

Las leyes de atenuación son relaciones basadas en el estudio de la respuesta del suelo y las estructuras frente a sismos pasados considerando distancia y magnitud de estos.

Para sismos de subducción de interface o de intraplaca se utilizó la ley de atenuación de (Youngs et al, 1997) debido a la confiabilidad del método y para sismos de fuentes corticales se usó la ley de atenuación de (Sadigh et al, 1997) considerando 5% de amortiguamiento para sitios rocosos, como se muestra en las siguientes ecuaciones.

- Para análisis en fuentes sismogénicas.

$$Ln(y) = -0.6687 + 1.438M + C1 + C2(10 - M)^3 + C3 \\ * Ln(R + 1.097 * e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Zt$$

- Para fuentes corticales.

$$Ln(y) = C1 + C2M + C3 * Ln(Rrup + C4 * e^{C5M}) + C6 \\ + C7(8.5 - M)^{2.5}$$

Donde:

y = Aceleración espectral expresada en g.

M = Magnitud de momento sísmico Mw.

R = Distancia hipocentral o distancia más cercana al área de ruptura en km.

Zt = 0 para sismos de interfase, 1 para sismos de intraplaca.

Rrup = Distancia más cercana al área de ruptura (km)

H = Profundidad focal en km.

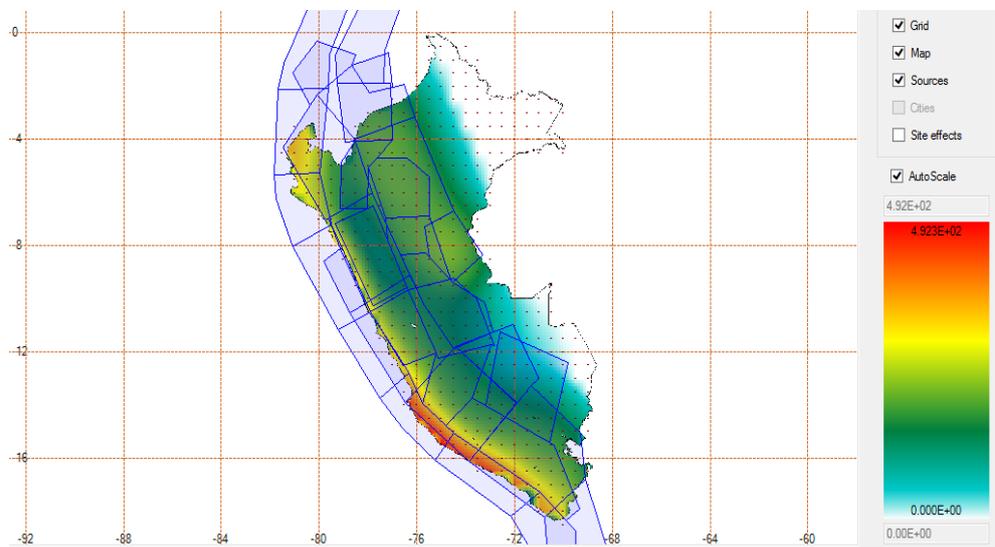
**4.1.3. Mapas de peligro sísmico obtenidos**

Uno de los resultados obtenidos del análisis son los mapas de peligro sísmico, los cuales que se analizaron para periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 2475 años. En las figuras 24, 25, 26 y 27 se muestran los mapas de

peligro sísmico obtenidos con el software CRISIS 2018 para un periodo de 0.005 segundos, valor para el cual la aceleración espectral se asemeja a la aceleración máxima del suelo.

Las aceleraciones se expresan en una escala de colores, se puede observar que las aceleraciones con mayor intensidad, color rojo, se encuentran en la costa, mientras que las zonas con bajas aceleraciones, color celeste, se encuentran al este.

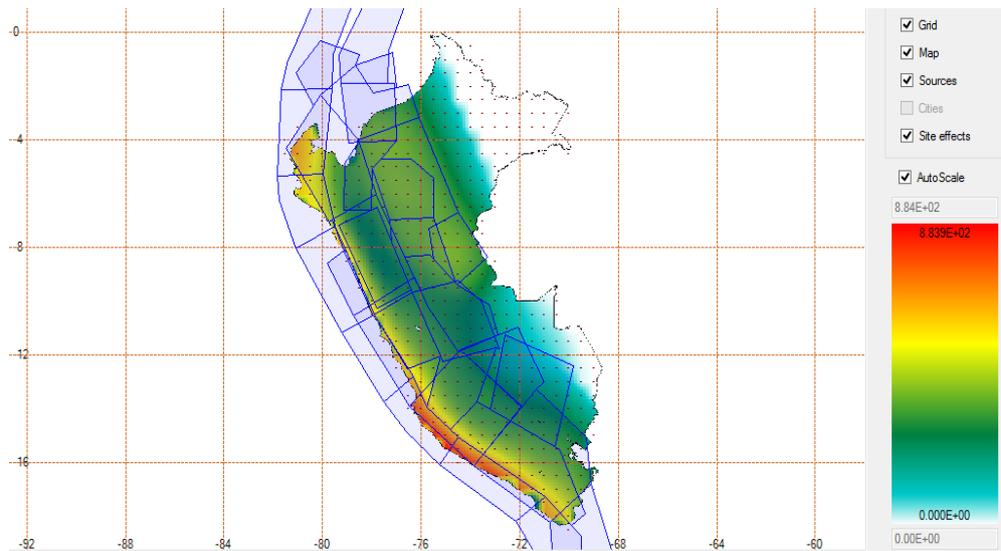
**Figura 23: Mapa de peligro sísmico con  $T_r=100$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

Mapa de peligro sísmico para  $T=0.005s$  con periodo de retorno de 100 años.

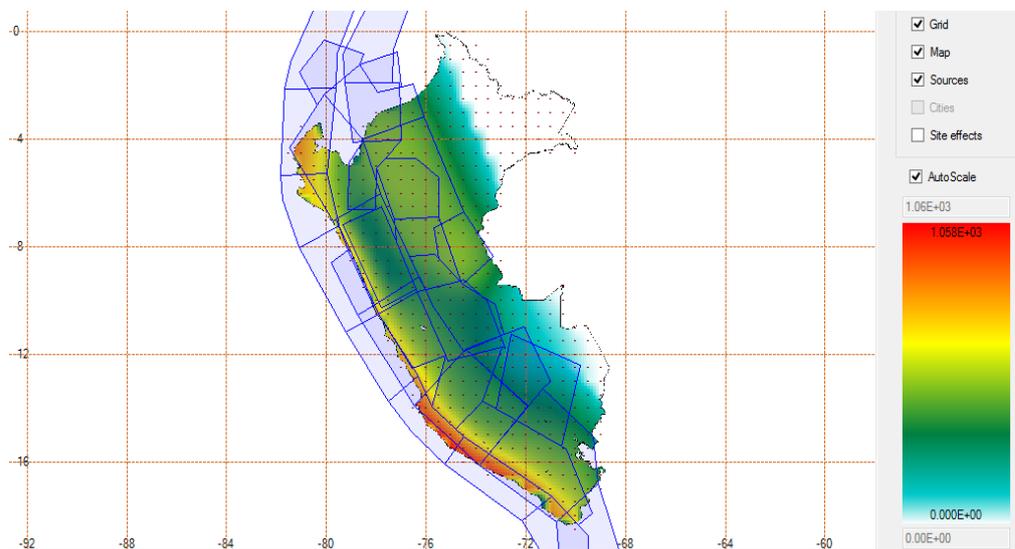
**Figura 24: Mapa de peligro sísmico con  $T_r=475$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

Mapa de peligro sísmico para  $T=0.005s$  con periodo de retorno de 475 años.

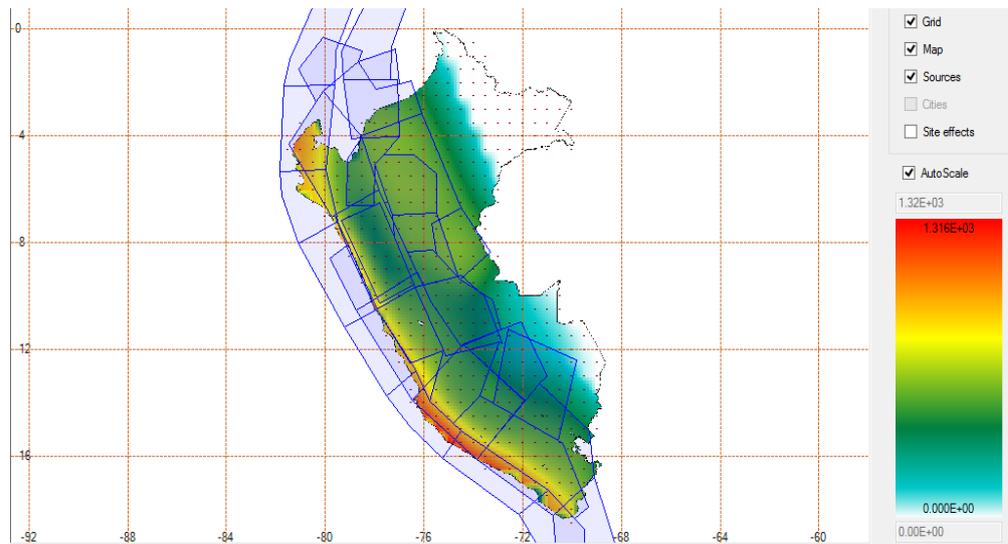
**Figura 25: Mapa de peligro sísmico con  $T_r=1000$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

Mapa de peligro sísmico para  $T=0.005s$  con periodo de retorno de 1000 años.

**Figura 26: Mapa de peligro sísmico con  $T_r=2475$  años**

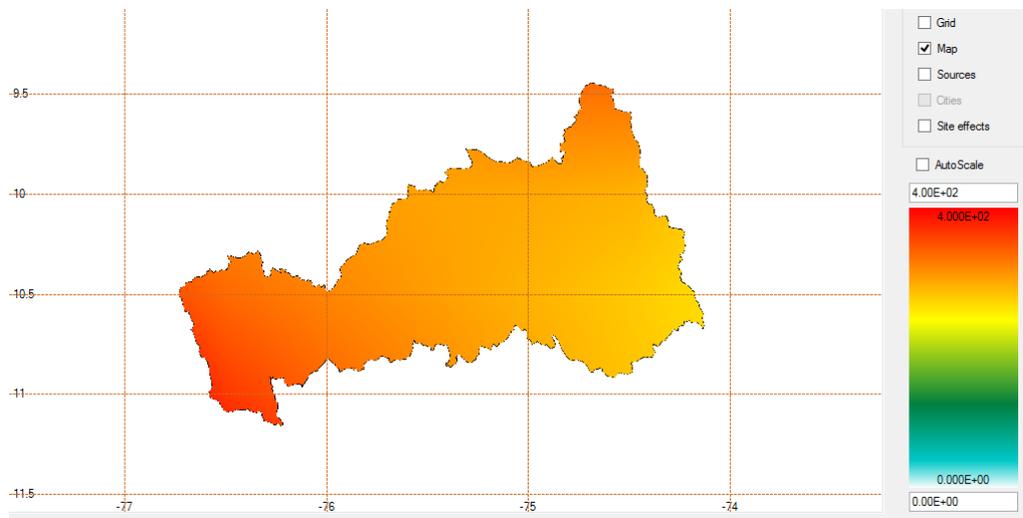


**Fuente: Elaboración Propia**

Mapa de peligro sísmico para  $T=0.005s$  con periodo de retorno de 2475 años.

Una vez obtenidos los mapas de peligro sísmico del Perú, es factible obtenerlas para un Departamento en específico, la figura 28 muestra el mapa de peligro sísmico para el Departamento de Pasco, donde se observa que existe una mayor aceleración espectral (PGA) para las provincias de Huayllay y Yanahuanca.

**Figura 27: Mapa de peligro sísmico para la Región de Pasco con  $T_r=475$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

Mapa de peligro sísmico del departamento de Pasco para  $T=0.005s$  con periodo de retorno de 475 años.

#### **4.1.4. Espectro de peligro uniforme (EPU)**

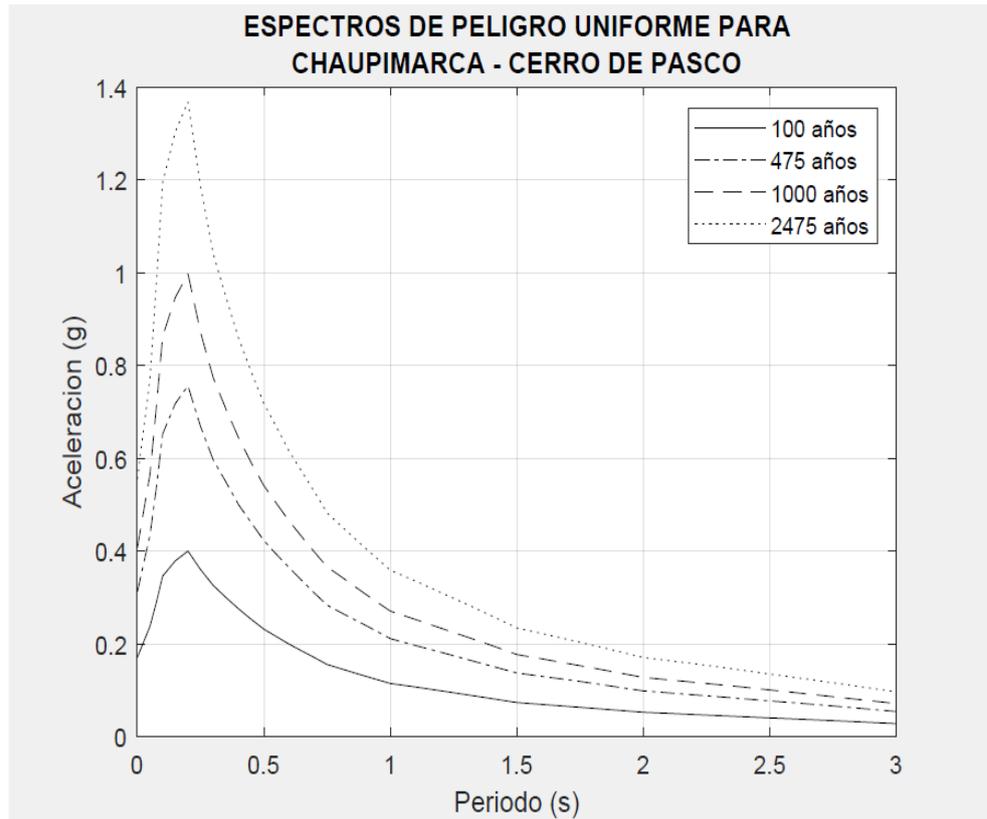
Otro resultado obtenido con ayuda del software CRISIS es el espectro de peligro uniforme, el cual provee de manera confiable parámetros de respuestas que se usaran en la demanda sísmica, para el sitio de estudio.

El espectro de aceleraciones de amenaza uniforme se define como la representación gráfica que conecta las aceleraciones espectrales vinculadas de manera individual a cada período estructural, teniendo en cuenta una probabilidad específica de superación dentro de un lapso de tiempo determinado y bajo un factor de amortiguamiento específico en comparación con el crítico.

El Espectro de peligro uniforme (EPU) enlaza las aceleraciones espectrales relacionadas al mismo período de retorno, tratando cada periodo estructural de manera independiente (Jaramillo, 2002).

En la figura 29 se muestran los espectros obtenidos para una probabilidad de excedencia del 10% para periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 2475 años respectivamente.

**Figura 28: Espectros de peligro uniforme para  $T_r=100, 475, 1000$  y  $2475$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

Se observa que, para periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 2475 años el PGA es de 0.40, 0.76, 0.99 y 1.36g respectivamente

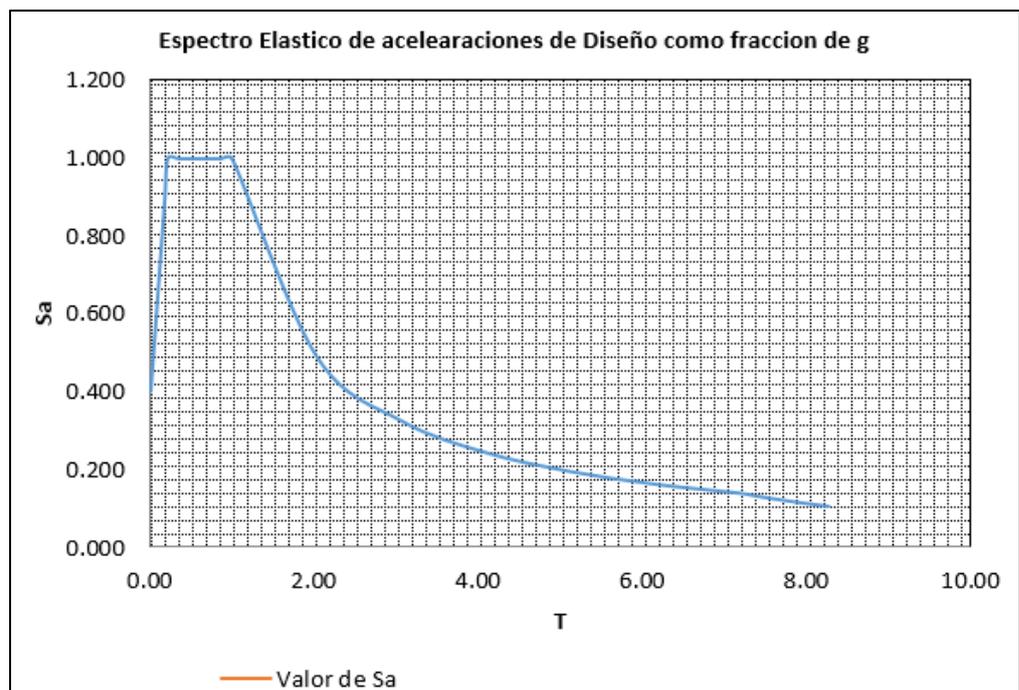
#### **4.1.5. Espectro de diseño según la metodología FEMA-356**

El espectro de diseño sismo-resistente según la metodología FEMA-356 es una herramienta utilizada en ingeniería sísmica para determinar las fuerzas sísmicas que actúan sobre una estructura durante un terremoto. Esta metodología se basa en la norma FEMA-356, que establece los criterios y procedimientos para el diseño sismo-resistente de estructuras.

El espectro de respuesta elástica es una representación gráfica de la respuesta de una estructura a diferentes frecuencias de vibración. Este espectro se obtiene a partir de la combinación de varios espectros de diseño, cada uno correspondiente a un nivel de peligro sísmico específico.

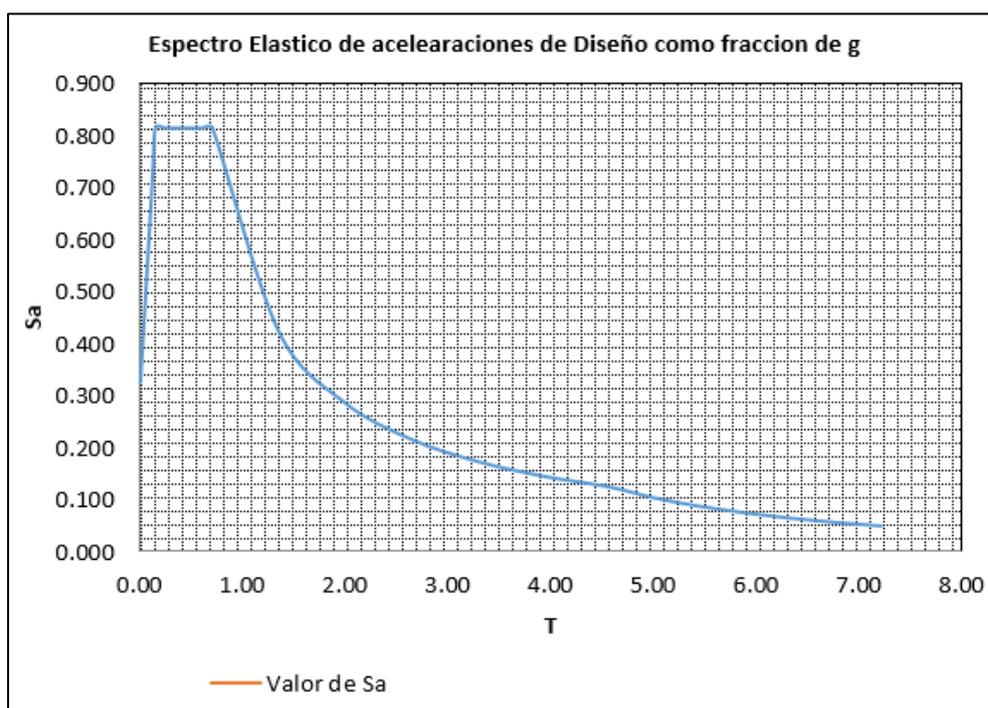
Después de calcular el espectro de peligro uniforme (EPU), se diseñan espectros de diseño adecuando los parámetros de aceleraciones espectrales a la metodología FEMA-356. En la figura 30 se observa el espectro de diseño para un periodo de retorno de 1000 años y en la figura 31 se muestra el espectro de diseño correspondiente a 475 años de retorno.

**Figura 29: Espectro elástico según FEMA-356 para  $T_r=1000$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

**Figura 30: Espectro elástico según FEMA-356 para  $T_r=475$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

### 4.2.1. Generación del acelerograma sintético

#### ➤ Acelerogramas para la Provincia de Pasco

Las fuentes sismogénicas que afectan principalmente a la Región Pasco son las Corticales (F15 – F16) e Intraplaca (F24 – F25), por ser estas las más próximas a dicho lugar. Para la generación de los sismos sintéticos se normalizaron los espectros de peligro sísmico en espectros de diseño, basados en la metodología de FEMA-356, para periodos de retorno  $T_r$  de 100 años, 475 años (sismo raro) y 1000 años (sismo muy raro). Cabe resaltar que el sismo de 475 años corresponde al sismo de diseño especificado en la Norma de Diseño Sismorresistente del Perú.

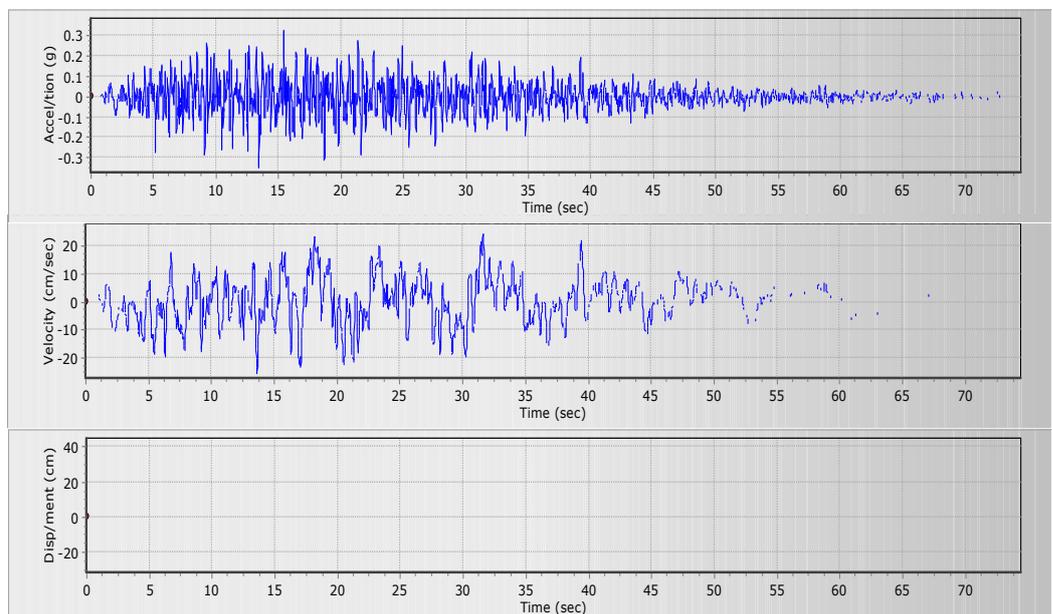
Se han elaborado acelerogramas para periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 2475 años utilizando el software SeismoArtif. Estos

acelerogramas son herramientas fundamentales para la evaluación de la respuesta sísmica de diversas estructuras que se diseñen en la localidad y requieran de análisis no lineal, tiempo-historia y demás estudios que ayuden a mejorar la comprensión del comportamiento dinámico y ayuden a los proyectistas en la toma de decisiones.

Se empleó el software SeismoArtif, reconocido por su capacidad para generar acelerogramas sintéticos realistas. Este programa utiliza el método de simulación estocástica para producir series temporales de aceleraciones que cumplen con los criterios sísmicos especificados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada periodo de retorno:

- Periodo de Retorno 2475 años:

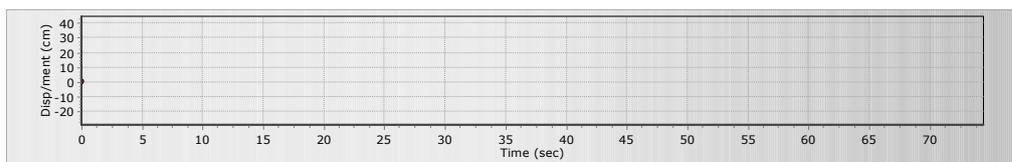
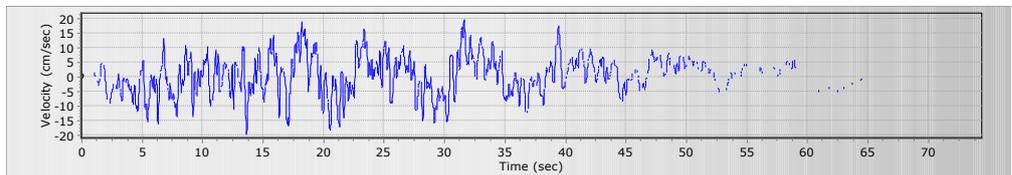
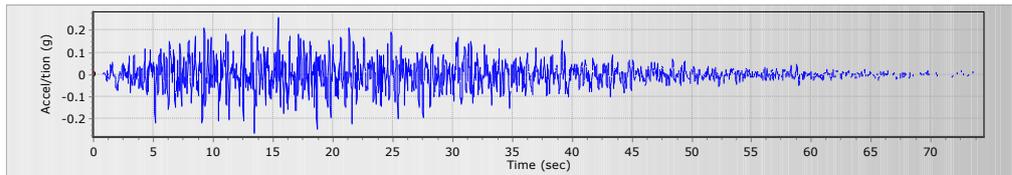


**Tabla 5: Características significativas del acelerograma para un  $T_r=2475$  años**

DATOS DEL ACELEROGRAMA	
<b>PGA</b>	0.371 g
<b>PGV</b>	25.473 cm/seg
<b>PGD</b>	40.621 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	5.186 cm/seg
<b>Velocidad Cum. Abs.</b>	3269.077 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.560 seg

**Fuente: Elaboración Propia**

- Periodo de Retorno 1000 años:

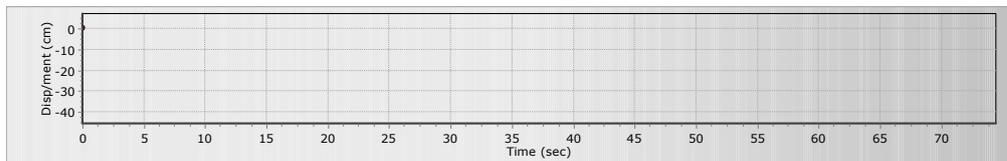
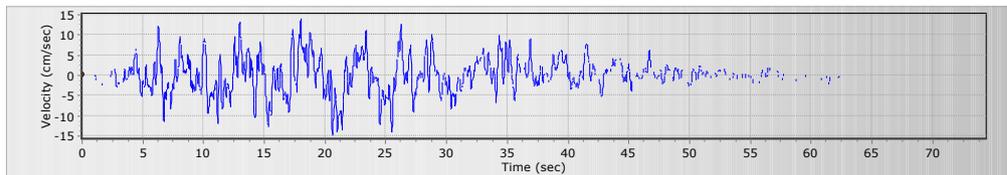
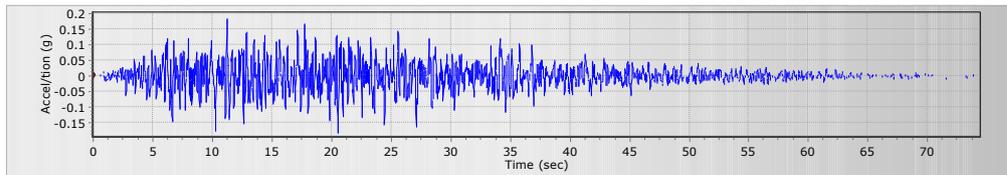


**Tabla 6: Características significativas del acelerograma para un  $T_r=1000$  años**

DATOS DEL ACELEROGRAMA	
<b>PGA</b>	0.283 g
<b>PGV</b>	19.674 cm/seg
<b>PGD</b>	40.415 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	3.227 cm/seg
<b>Velocidad Cum. Abs.</b>	2581.814 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	39.550 seg

**Fuente: Elaboración Propia**

- Periodo de Retorno 475 años:

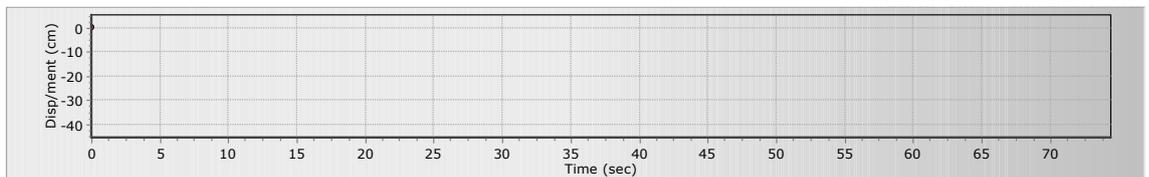
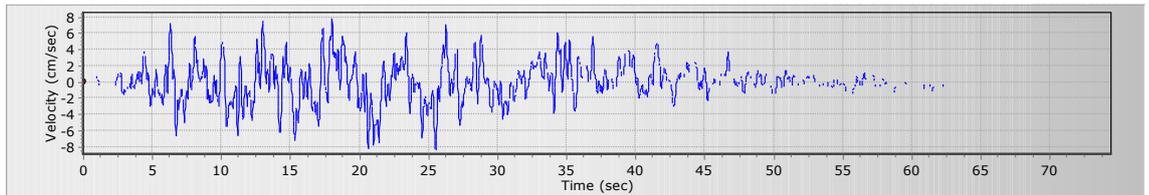
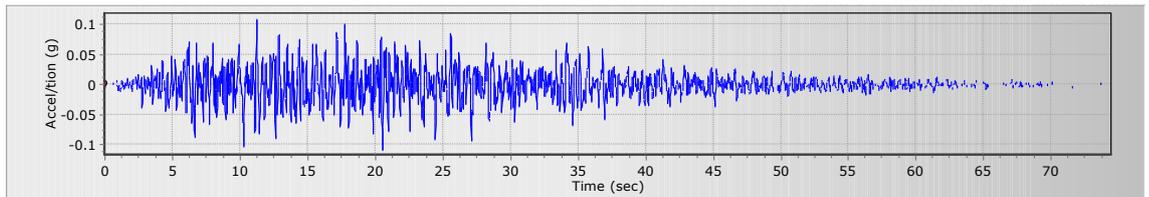


**Tabla 7: Características significativas del acelerograma para un  $T_r=475$  años**

DATOS DEL ACELEROGRAMA	
<b>PGA</b>	0.222 g
<b>PGV</b>	20.124 cm/seg
<b>PGD</b>	58.663 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	1.97 cm/seg
<b>Velocidad Cum. Abs.</b>	2016.599 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.560 seg

**Fuente: Elaboración Propia**

- Periodo de Retorno 100 años:



**Tabla 8: Características significativas del acelerograma para un  $T_r=100$  años**

DATOS DEL ACELEROGRAMA	
<b>PGA</b>	0.111 g
<b>PGV</b>	8.328 cm/seg
<b>PGD</b>	10.522 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	0.560 cm/seg
<b>Velocidad Cum. Abs.</b>	1182.629 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.710 seg

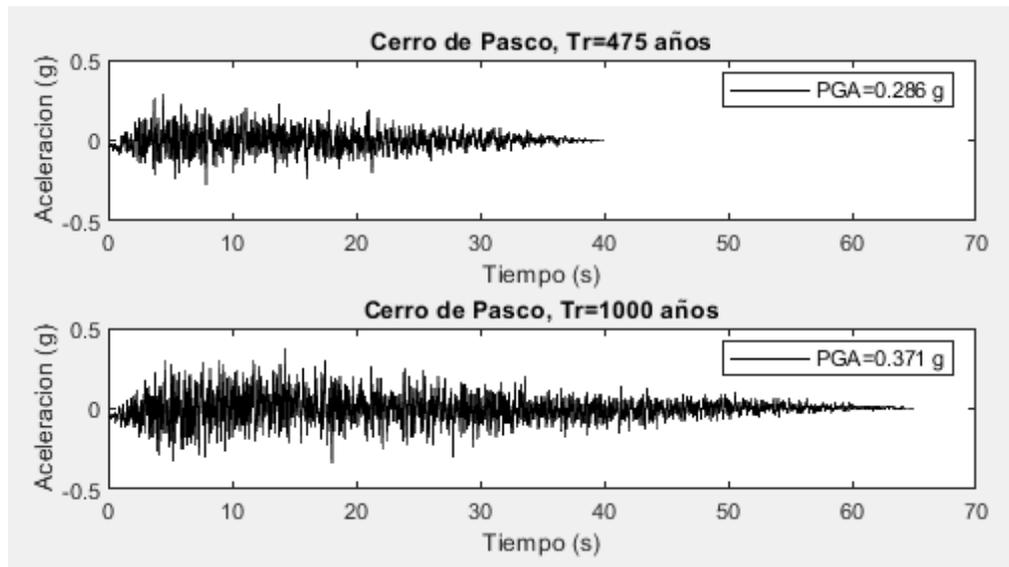
**Fuente: Elaboración Propia**

Una vez definidos los datos de entrada en el software SeismoArtif se procedió a correr el programa. En la figura 32 se muestran los acelerogramas obtenidos por cada periodo de retorno.

➤ **Señal sintética obtenida**

- a) Se han importado los espectros diseño para cada periodo de retorno con un amortiguamiento del 5%.
- b) Se adoptó el método de “Joyner – Boore” obteniendo una distancia epicentral de 250 km aproximadamente, distancia más corta desde el sitio a la proyección vertical de la falla en superficie.

**Figura 31: Señal sintética obtenida para  $T_r=475$  y 1000 años**



**Fuente: Elaboración Propia**

#### **4.2.2. Construcción del espectro de respuesta para 1GDL**

Conocer la respuesta de un sistema dinámico de 1GDL con los acelerogramas sintéticos nos ayudara a entender el comportamiento de diversas estructuras con diversos periodos de vibración. El sistema de 1GDL consiste en una masa soportada por un elemento cuyas relaciones fuerza-deformación son conocidas y en algunos casos se da énfasis en el amortiguador viscoso.

A continuación, se muestra la ecuación que rige la respuesta dinámica de sistemas linealmente elásticos ante una excitación en la base.

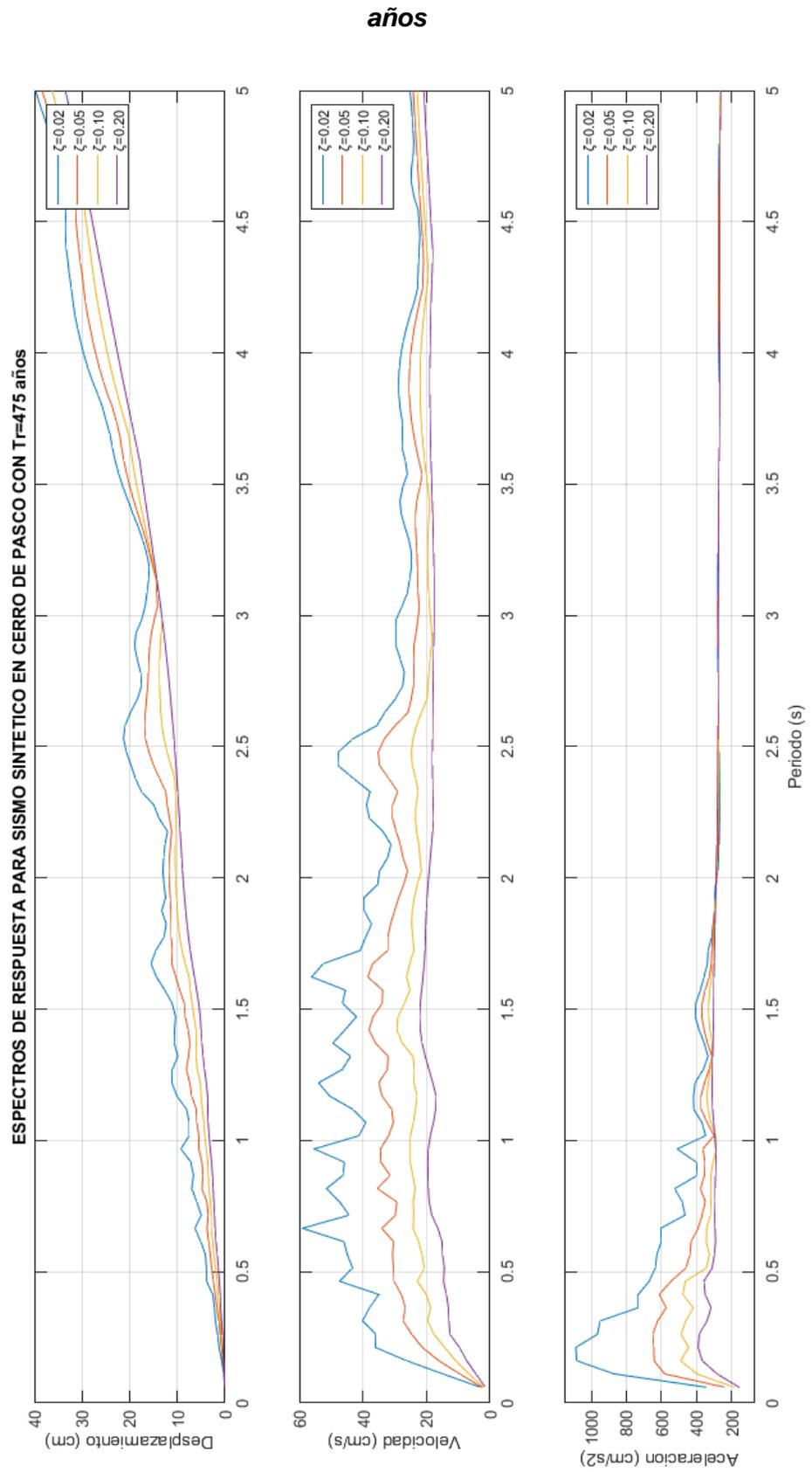
$$-m\ddot{x}(t) = m(a) + c(\dot{v}) + ku$$

El estudio de la respuesta para diversos valores de periodo de vibración en estructuras de diferentes tipologías evidencia que cada sistema cambia de forma indudable al variar el periodo, en el presente estudio se analizan los espectros de desplazamiento, velocidad y aceleración, los cuales son de gran utilidad pues tiene muchas aplicaciones prácticas como el poder determinar la fuerza aplicada a un sistema con solo conocer el periodo al ser sometidos a diversos acelerogramas, es así que estas graficas simplifican de forma practica

la obtención valores relevantes del sistema, con tan solo conocer el periodo natural se puede obtener el desplazamiento relativo, el cual al ser multiplicado por la constante de rigidez del sistema puede permite conocer la máxima fuerza a la que fue inducida el sistema estructural.

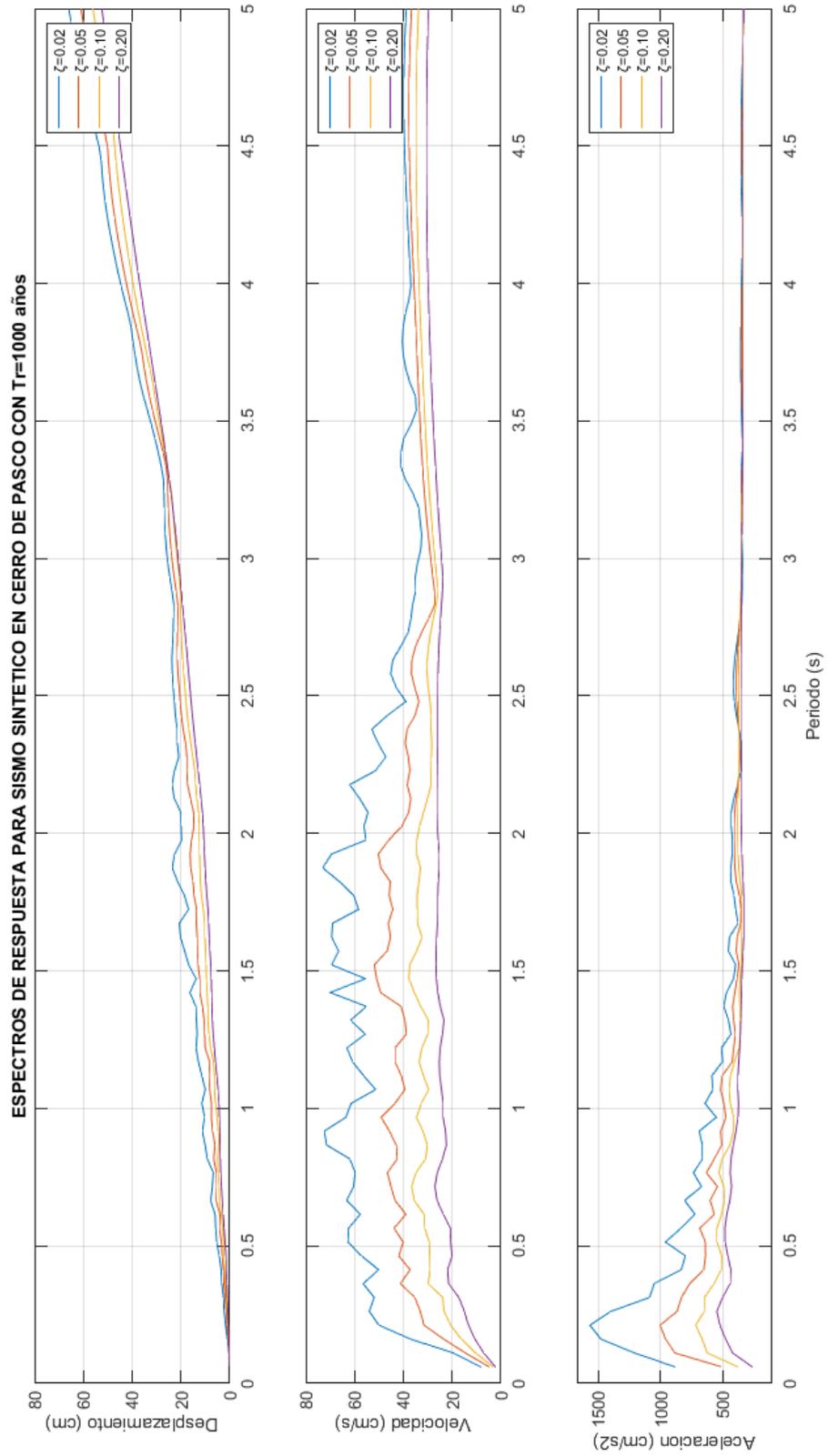
Cabe resaltar que el cálculo de los espectros de respuesta puede ser realizado para diferentes valores de amortiguamiento. En la presente investigación se elaboran espectros de respuesta utiliza un coeficiente de amortiguamiento de 0.02, 0.05, 0.10 y 0.20. Se obtiene el desplazamiento máximo absoluto, las velocidades relativas y aceleraciones del sistema al ser sometidos a los acelerogramas sintéticos. En la imagen 33 y 34 se muestran los espectros obtenidos para los periodos de retorno de 475 años y 1000 años correspondientemente.

Figura 32: Espectros de respuesta para acelerograma con  $T_r=475$  años



**Fuente: Elaboración Propia**

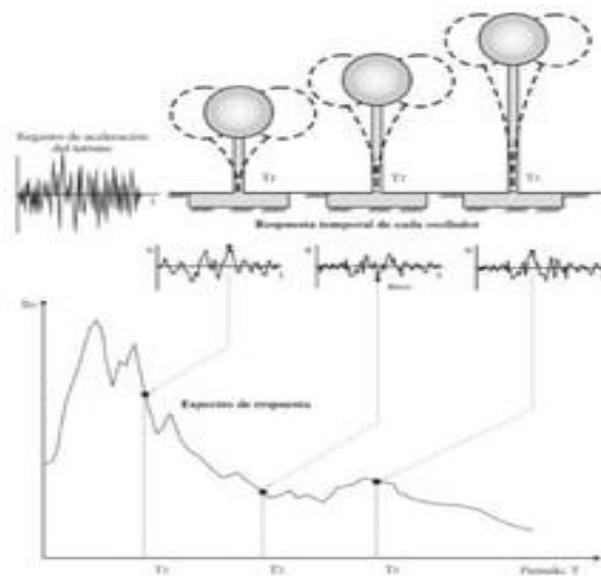
**Figura 33: Espectros de respuesta para acelerograma con  $T_r=1000$  años**



**Fuente: Elaboración Propia**

En el presente estudio se decide incorporar la dimensión del tiempo en los espectros de respuesta, se consideran tres dimensiones principales: aceleración, periodos y tiempo. El tiempo se refiere al intervalo de tiempo durante el cual se registra la respuesta de la estructura. En el análisis de espectros de respuesta, se utilizan acelerogramas artificiales, que son registros de aceleración generados sintéticamente para simular eventos sísmicos.

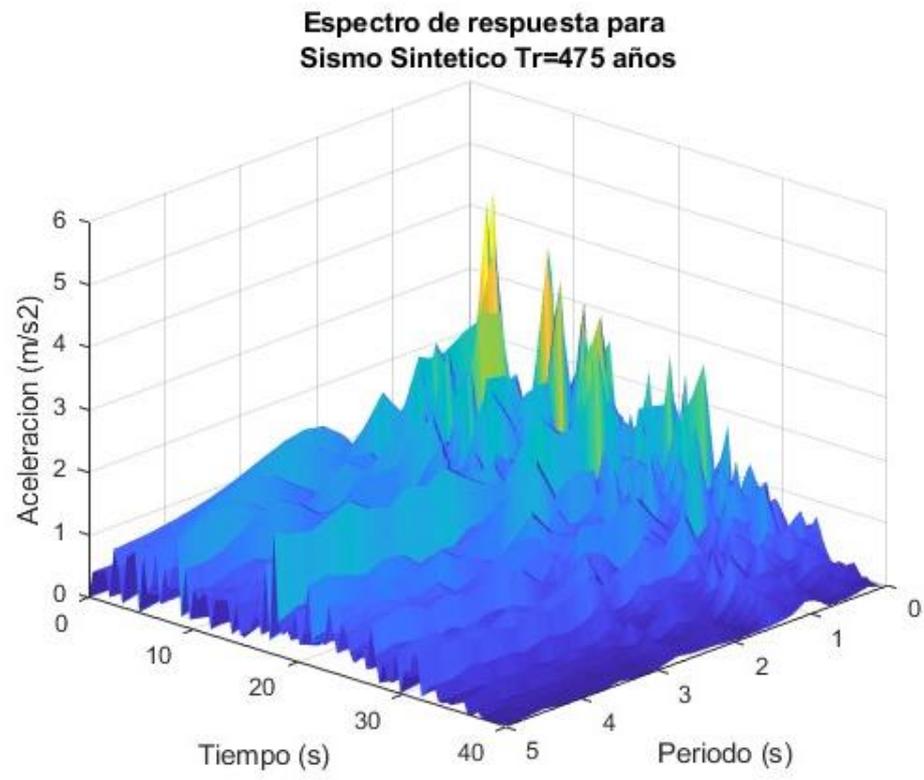
**Figura 34: Método de determinación del espectro de respuesta**



**Fuente: Dinámica Estructural, Anil K. Chopra**

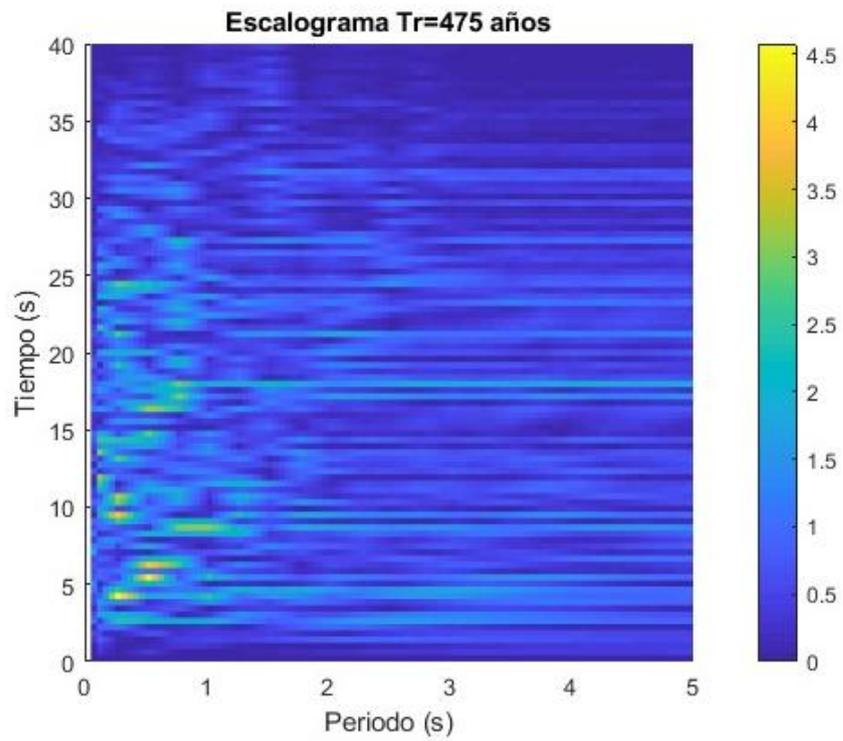
En las figuras 36 y 38 se muestran los espectros de respuesta de aceleraciones incluyendo la dimensión del tiempo, se puede apreciar que ahora mediante este tipo de graficas no solo se puede evaluar las aceleraciones de diversos sistemas de 1GDL para diferentes periodos sino también el instante de tiempo donde se alcanza ese pico de aceleraciones, las figuras 37 y 39 muestran el escalograma correspondiente al espectro de respuesta para un periodo de retorno de 475 años y 1000 años.

**Figura 35: Espectro de respuesta incluyendo el tiempo para  $T_r=475$  años**



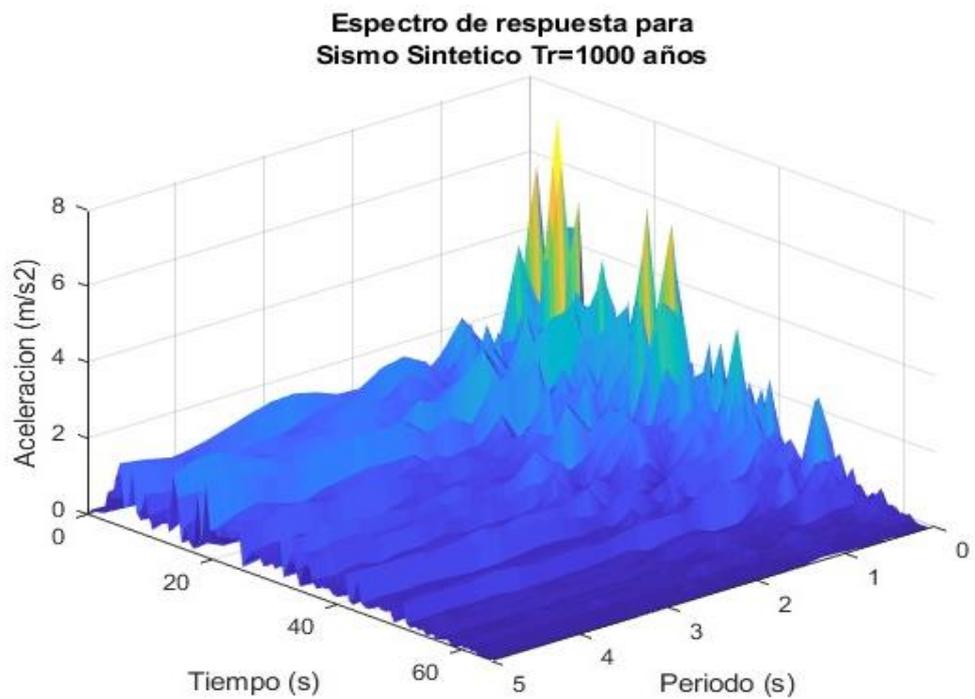
**Fuente: Elaboración Propia**

**Figura 36: Escalograma para  $T_r=475$  años**



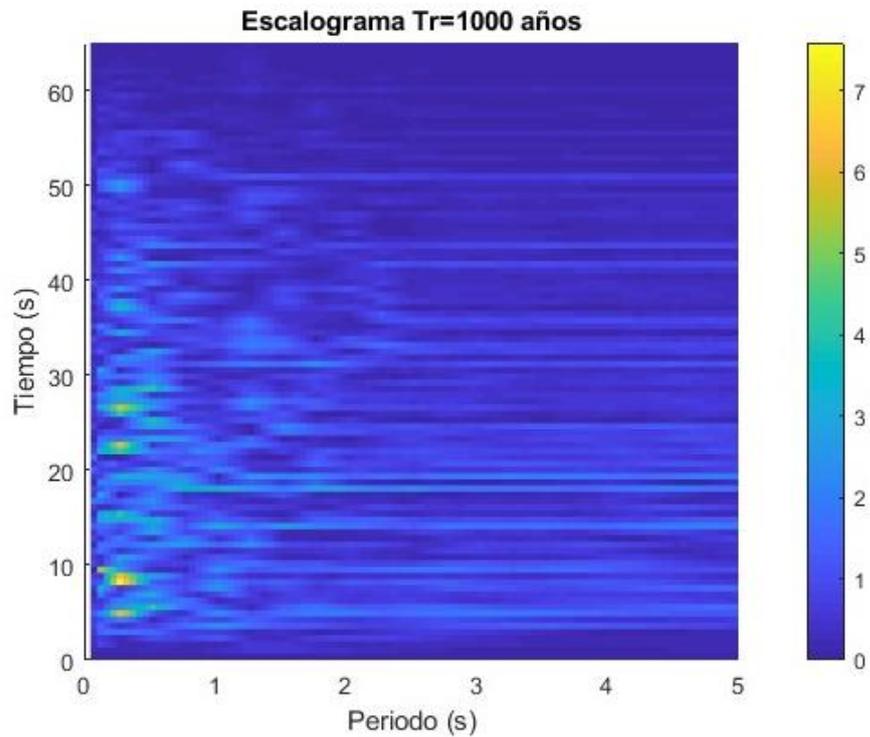
**Fuente: Elaboración Propia**

**Figura 37: Espectro de respuesta incluyendo el tiempo para  $T_r=1000$  años**



*Fuente: Elaboración Propia*

**Figura 38: Escalograma para  $Tr=475$  años**



*Fuente: Elaboración Propia*

### **4.3. Prueba de hipótesis**

#### **4.3.1. Prueba de Hipótesis General**

Los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico, para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento de 25% debido a la aplicación de la metodología FEMA 356.

La flexibilidad de la metodología FEMA-356 para adaptarse a diferentes tipos de estructuras y condiciones de suelo contribuyen notoriamente a la integración del espectro de peligro uniforme con la metodología de diseño estructural, esto permite utilizar diferentes sistemas constructivos y materiales, al modificar los parámetros del tipo de suelo y variando los coeficientes de

aceleraciones máximas (PGA). En consecuencia, el espectro de peligro uniforme es modificado y los niveles pico de aceleración se reducen.

Para los periodos de retorno de 475 años se obtuvo una reducción en la aceleración del 18% para los espectros de peligro uniforme y para un periodo de retorno de 1000 años se obtuvo una reducción del 26%, esto debido a que el espectro de diseño tiene en cuenta la incertidumbre asociada con la estimación de los espectros de diseño sísmico, teniendo en cuenta la variabilidad de las características sísmicas del sitio. Si bien se han estudiado espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 2475 años, se han elaborado espectros de diseño según FEMA-356 solo para periodos de retorno de 475 y 1000 años, considerando la magnitud de los proyectos que la provincia ejecuto y su uso practico en análisis de estos.

#### **4.3.2. Prueba de Hipótesis Especificas**

**La hipótesis 01:** Los valores de aceleración espectral obtenidos en los espectros de peligro uniforme varían según el periodo de retorno. En este caso, para un periodo de retorno de 475 años se registró una aceleración espectral de 0.76g, mientras que, para un periodo de retorno de 1000 años, este valor aumentó a 0.99g. Cabe resaltar que se consideró la respuesta del suelo, la geometría de la fuente sismogénica y la trayectoria de propagación del sismo a la zona de estudio. Un valor de 0.76g indica que la aceleración máxima será igual al 76% de la aceleración de la gravedad (g), mientras que un valor de 0.99g indica que la aceleración máxima será casi igual a la aceleración de la gravedad. La diferencia en los valores de aceleración espectral entre los dos periodos de retorno se debe a la probabilidad de ocurrencia de terremotos de diferentes magnitudes. Para un periodo de retorno de 1000 años, se espera que la estructura experimente terremotos más fuertes, lo que se refleja en una mayor aceleración espectral de 0.99g.

**La hipótesis 02:** La metodología FEMA-356 considera diversos factores que influyen en el comportamiento sísmico de las estructuras, como la capacidad de disipación de energía, la incertidumbre sísmica y la variabilidad de las características sísmicas del sitio. Al utilizar la metodología FEMA-356 para generar los acelerogramas sintéticos se considera la incertidumbre sísmica, lo que ayuda a garantizar que los acelerogramas sintéticos representen una amplia gama de eventos sísmicos posibles. Asimismo, la metodología de FEMA-356 permitió integrar de manera precisa los espectros de peligro uniforme del lugar de estudio en el proceso de diseño estructural. Las expresiones empleadas en esta metodología inciden directamente en las aceleraciones y coeficientes, teniendo en cuenta factores específicos como el tipo de suelo.

**La hipótesis 03:** La duración significativa del evento sísmico para un periodo de retorno de 1000 años es de 39.55 segundos, y para un periodo de retorno de 475 años, es de 37.56 segundos. Estos representan el intervalo en el que se registran las mayores aceleraciones durante el sismo. Cabe resaltar que ambos registran una duración mayor a 70 segundos, sin embargo, para el presente estudio se considera relevante solo al tiempo de duración significativa. Por tanto, la duración del acelerograma no influye directamente en el daño de las estructuras, siendo un factor importante la magnitud del terremoto, la distancia al epicentro y las características del suelo.

#### **4.4. Discusión de resultados**

Al analizar los acelerogramas sintéticos para períodos de retorno menores, se observó que estos presentaban valores muy cercanos a los acelerogramas medidos por la RED ACELEROMÉTRICA DEL PERÚ en eventos sísmicos ocurridos en lugares cercanos a la zona de estudio. Se llevó a cabo un análisis de diversas variables que influyen en la generación de acelerogramas sintéticos, incluyendo, el estudio de fuentes sismogénicas, la geología local, la distancia epicentral, entre otros factores relevantes para este

fin. Se seleccionaron periodos de retorno de 475 y 1000 años, considerando la realidad constructiva de la región y su aplicabilidad en proyectos locales. Los resultados mostraron que, para un período de retorno de 475 años, se obtuvo un pico de aceleración (PGA) de 0.286 g, mientras que, para un período de retorno de 1000 años, el PGA fue de 0.371 g. Además, se determinaron las duraciones significativas de estos eventos, siendo de 37.56 segundos para el período de retorno de 475 años y de 39.55 segundos para el período de retorno de 1000 años.

Al utilizar la metodología FEMA-356 para generar los acelerogramas sintéticos, se tuvo en cuenta la incertidumbre sísmica, lo que garantiza que los acelerogramas sintéticos representen una amplia gama de eventos sísmicos posibles. Así mismo, mediante esta metodología de cálculo de espectros de diseño se logró integrar los espectros de peligro uniforme con el proceso de diseño estructural. Esto indica que el uso de la metodología FEMA-356 para generar acelerogramas sintéticos es beneficioso, ya que considera factores importantes que influyen en el comportamiento sísmico de las estructuras. Cabe resaltar que, se elaboraron los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento para estos acelerogramas sintéticos obtenidos en el estudio. Estos espectros permitieron visualizar cómo varía la respuesta de las estructuras en función de diferentes periodos de vibración y aceleraciones máximas. Los diagramas de espectro de respuesta fueron elaborados para estructuras de un grado de libertad y contribuyeron a una mejor comprensión del comportamiento de las estructuras de 1GDL ante estos posibles eventos sísmicos, permitiendo identificar las frecuencias naturales de vibración de las estructuras y evaluar su respuesta ante diferentes niveles de aceleración. Asimismo, la fabricación de los diagramas de espectro de respuesta que tienen cuenta las aceleraciones máximas, los periodos de vibración y el tiempo de duración de cada evento ayudaron no solo a identificar los periodos más

vulnerables a estos eventos sino que también permitieron identificar el tiempo donde estos alcanzan su máximo valor, accediendo a una comprensión más profunda y detallada del comportamiento de las estructuras de un solo grado de libertad (1GDL) ante estos fenómenos, contribuyendo significativamente a la evaluación y diseño sísmico.

## CONCLUSIONES

- ✓ La distancia epicentral de aproximadamente 250 km fue un factor determinante en la estimación de los espectros de respuesta. Esta distancia es la más corta desde el sitio de estudio hasta la proyección vertical de la falla en la superficie. Este enfoque de la ruptura fue seleccionado considerando el método de "Joyner – Boore", el cual proporciona una base sólida para el análisis de peligro sísmico.
- ✓ Del estudio de peligro sísmico se observó que Huayllay y Yanahuanca muestran los valores más altos de aceleración en los mapas de peligro sísmico de la región de Pasco. Asimismo, se han considerado diferentes valores de amortiguamiento (0.02, 0.05, 0.10 y 0.20) para la elaboración de los espectros de respuesta de desplazamiento máximo absoluto, velocidades relativas y aceleraciones del sistema.
- ✓ Se usó el software SEISMOARTIF para generar los acelerogramas sintéticos mediante el uso del espectro con la metodología FEMA-356, el cual permitió compatibilizar los espectros de peligro uniforme con los espectros de diseño para su uso práctico en análisis de estructuras.
- ✓ En cuanto a los resultados del valor de PGA en los acelerogramas generados sintéticamente, se registró para un periodo de retorno de 475 años, una aceleración espectral de 0.76g, mientras que, para un periodo de retorno de 1000 años, este valor aumentó a 0.99g. Es importante destacar que se consideró la respuesta del suelo, la geometría de la fuente sismogénica y la trayectoria de propagación del sismo hacia la zona de estudio. La duración significativa del evento sísmico para un periodo de retorno de 1000 años es de 39.55 segundos, y para un periodo de retorno de 475 años, es de 37.56 segundos.

## RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda ampliar los estudios geofísicos y obtener mayores profundidades en la estratigrafía de los suelos, el obtener información más detallada sobre la composición y características de los suelos a mayores profundidades puede ser crucial para realizar una evaluación precisa de las condiciones geotécnicas del sitio.
- b) Se sugiere realizar ensayos dedicados a la obtención de valores de la velocidad de propagación de las ondas de corte en los suelos y caracterizar las propiedades mecánicas de los suelos a diferentes profundidades.
- c) Se recomienda comparar los resultados de los acelerogramas sintéticos con registros sísmicos reales. Además, se sugiere poner en funcionamiento los acelerógrafos instalados en la zona de estudio.
- d) Se recomienda considerar diferentes zonas epicentrales y considerar diferentes periodos de retorno para comprender la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de diferentes magnitudes. Al evaluar diferentes periodos de retorno, se puede obtener una visión más completa de los posibles eventos sísmicos que podrían afectar a las estructuras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, J. y Escalaya, M. (2017). Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú.
- Tavera, H. (2014). Re - evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú.
- Orosco, L. y Haarala, M. y Barbat, A. (2006). Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local.
- Flores, F. y Ayes, J. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico-estructurales.
- Alva, J. y Castillo, A. (1993). Peligro sísmico en el Perú.
- Chropa, A. (2014). Dinámica de estructuras.
- Centro de Observación para Ingeniería Sísmica (CEOIS). Red Nacional de Acelerógrafos (REDACIS) CISMID UNI.
- Kuroiwa, H. (2016). Gestión del Riesgo de desastres en el Perú.
- Solano, R. y Aguirre, J. (2019). Metodología para el cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia empíricas y el método estocástico de Boore, en la ciudad de Tapachula, Chiapas.
- Piedra, R. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos.

## **ANEXOS**

## INSTRUMENTOS D ERECOLECCIÓN DE DATOS



Fotografía N°01: Se realizo la visita al Colegio de Ingenieros del Perú para tomar datos de campo del Acelerógrafo instalado.



Fotografía N°02: Se verifico visualmente el estado del cableado y conectores del Acelerógrafo instalado.



Fotografía N°01: Comprobación de sensibilidad del acelerógrafo.



Fotografía N°01: Acelerógrafo conectado y en funcionamiento



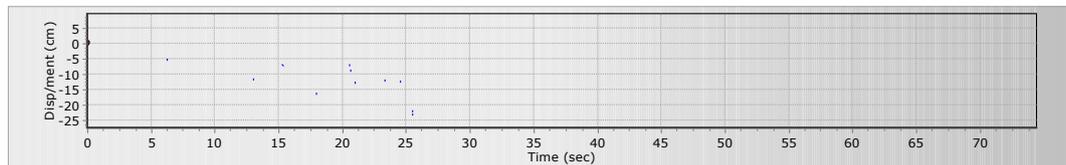
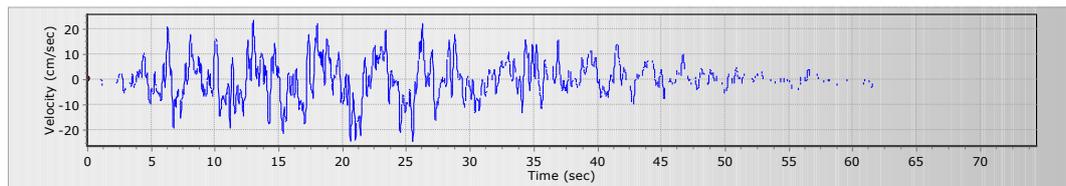
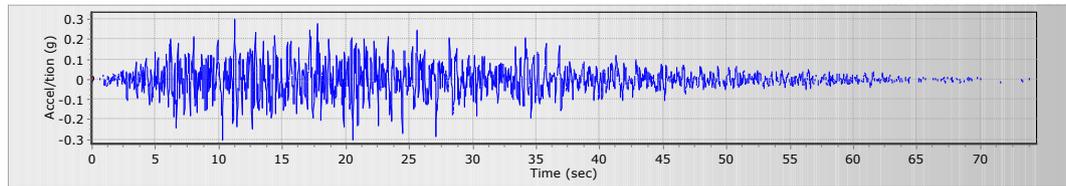
Fotografía N°01: Se verifico que el sistema estuvo un tiempo inactivo y necesita ser calibrado actualmente



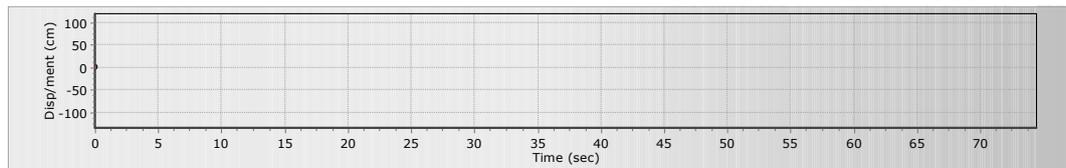
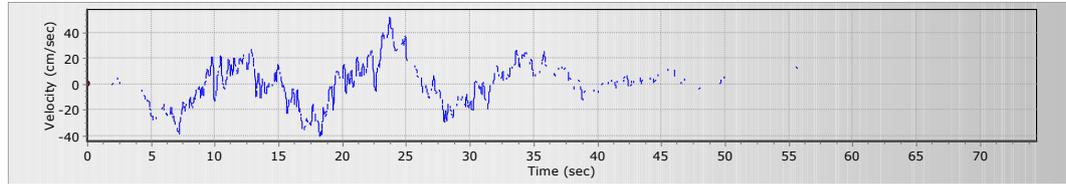
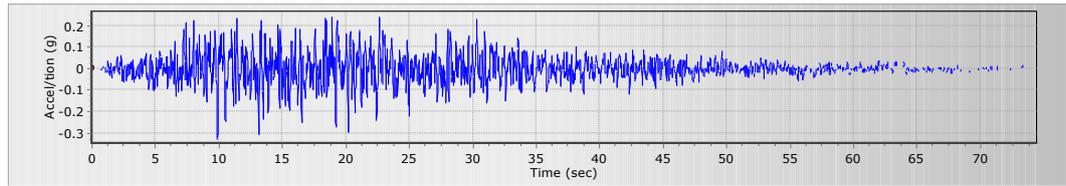
Fotografía N°01: Se corrobora la necesidad del funcionamiento del Acelerografo del CIP para obtener registros reales y compararlos con los sintéticos para mejorar la técnica y tener una metodología con la realidad local.

## 1. Acelerogramas sintéticos obtenidos

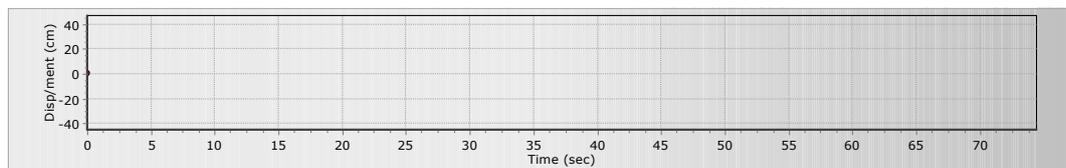
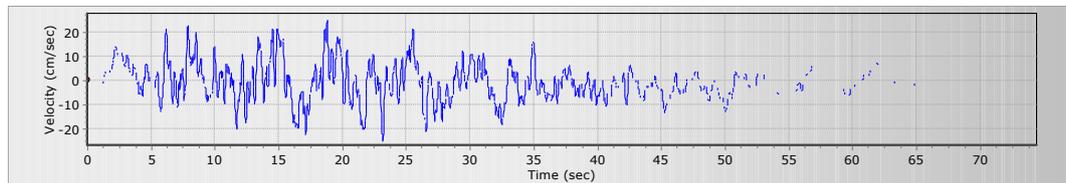
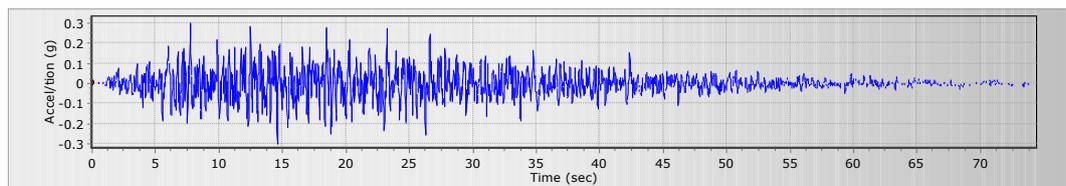
### Periodo de retorno de 2475 años



<b>Acelerograma N°1/Tr=2475 años</b>	
<b>PGA</b>	0.314 g
<b>PGV</b>	24.747 cm/seg
<b>PGD</b>	25.966 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	4.526 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	3033.685 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.70 seg

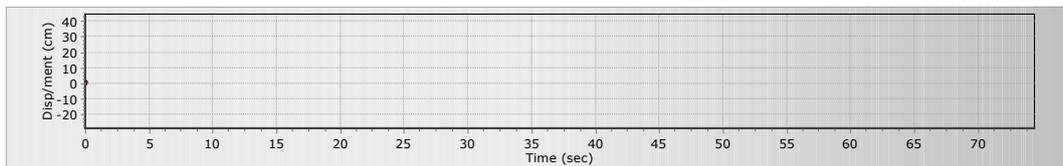
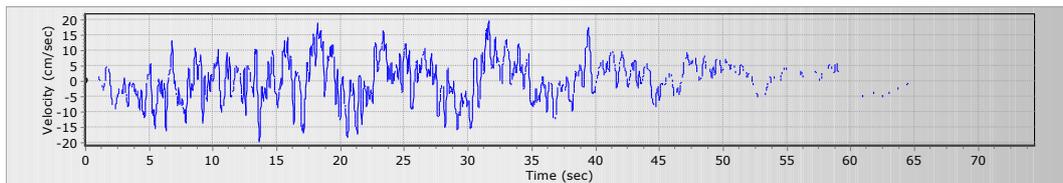
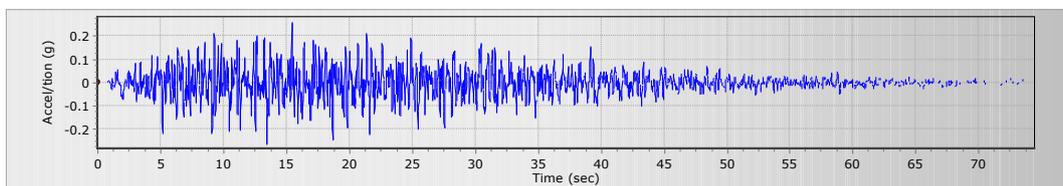


<b>Acelerograma N°2/Tr=2475 años</b>	
<b>PGA</b>	0.332 g
<b>PGV</b>	52.418 cm/seg
<b>PGD</b>	124.922 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	3.897 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2775.279 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.360 seg

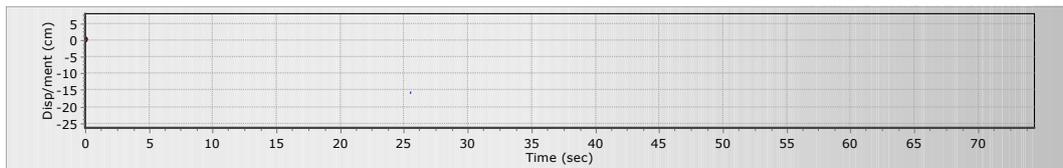
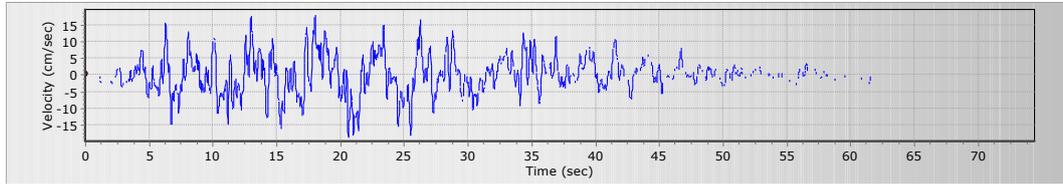
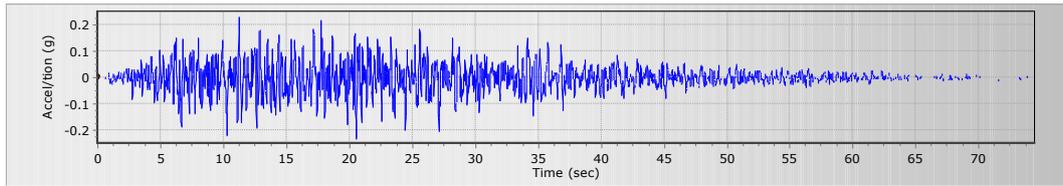


<b>Acelerograma N°3/Tr=2475 años</b>	
<b>PGA</b>	0.306 g
<b>PGV</b>	25.174 cm/seg
<b>PGD</b>	42.730 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	4.112 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2906.084 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	36.10 seg

Periodo de retorno de 1000 años

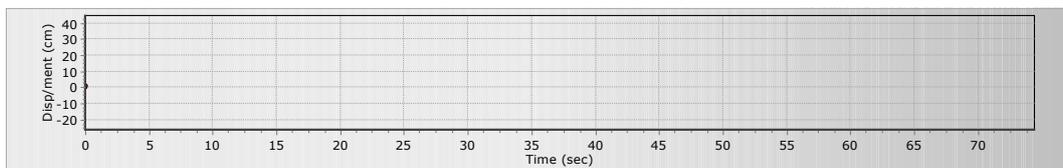
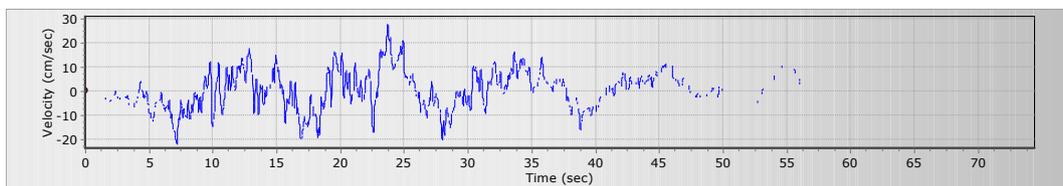
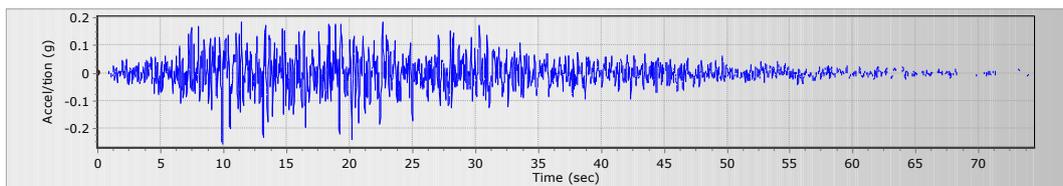


<b>Acelerograma N°1/Tr=1000 años</b>	
<b>PGA</b>	0.283 g
<b>PGV</b>	19.674 cm/seg
<b>PGD</b>	40.415 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	3.227 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2581.814 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.55 seg



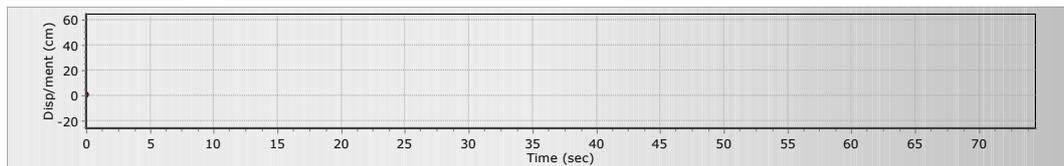
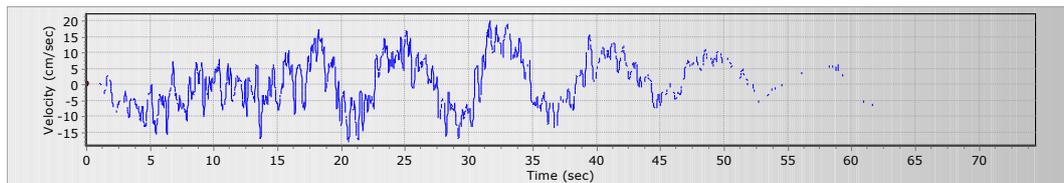
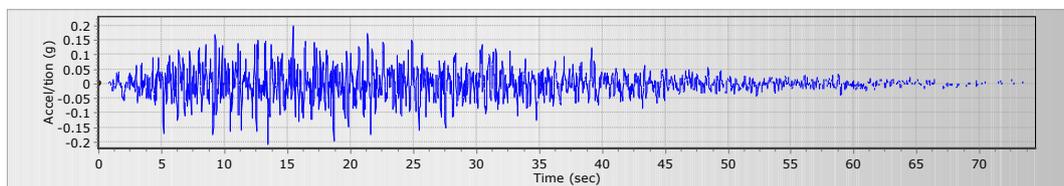
### Acelerograma N°2/Tr=1000 años

<b>PGA</b>	0.237 g
<b>PGV</b>	18.563 cm/seg
<b>PGD</b>	18.771cm
<b>Intensidad de Arias</b>	2.589 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2292.794 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.61 seg

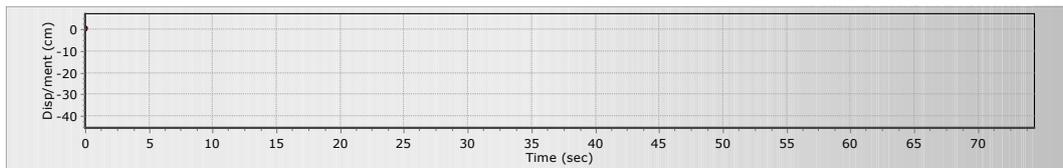
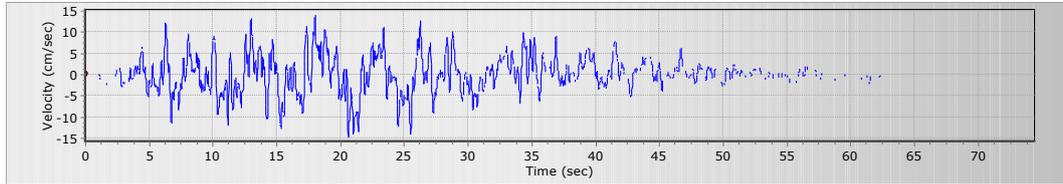
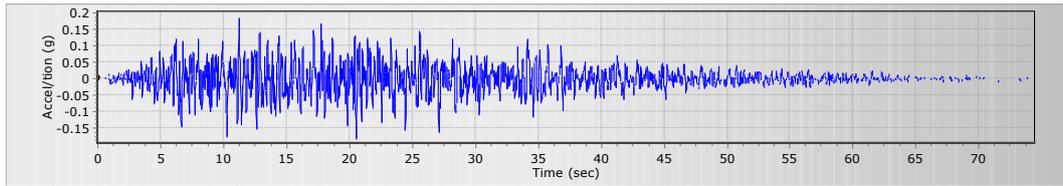


<b>Acelerograma N°3/Tr=1000 años</b>	
<b>PGA</b>	0.257 g
<b>PGV</b>	28.285 cm/seg
<b>PGD</b>	52.068cm
<b>Intensidad de Arias</b>	2.392 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2165.880 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.27 seg

Periodo de retorno de 475 años

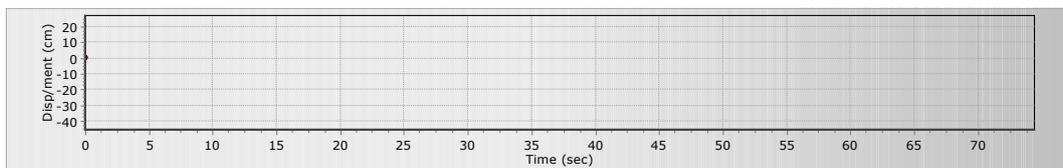
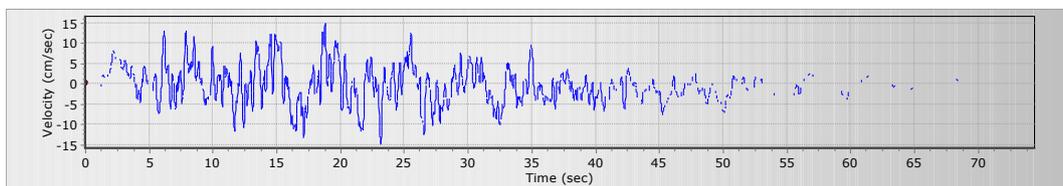
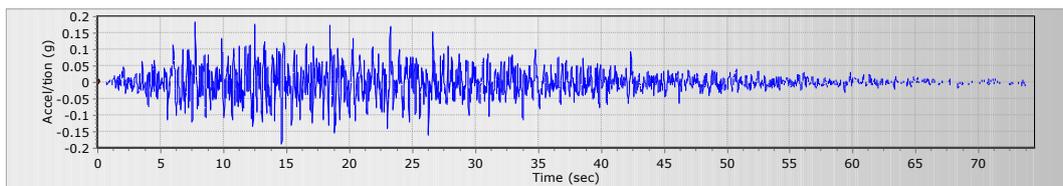


<b>Acelerograma N°1/Tr=475 años</b>	
<b>PGA</b>	0.222 g
<b>PGV</b>	20.124 cm/seg
<b>PGD</b>	52.068 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	1.970 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	2016.599 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.56 seg



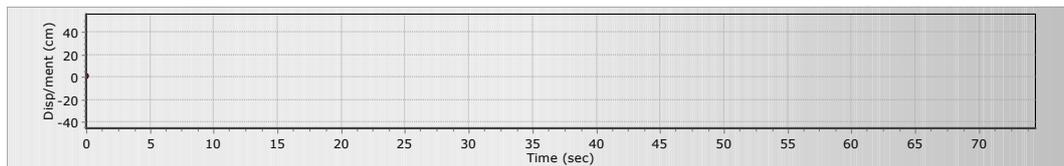
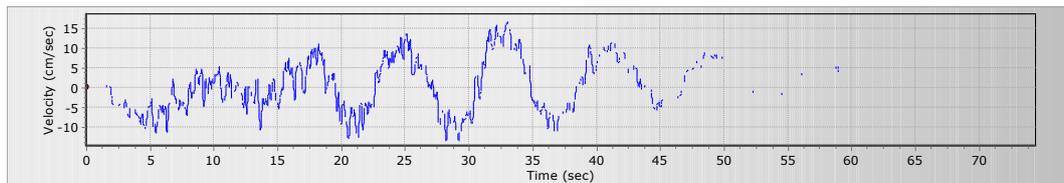
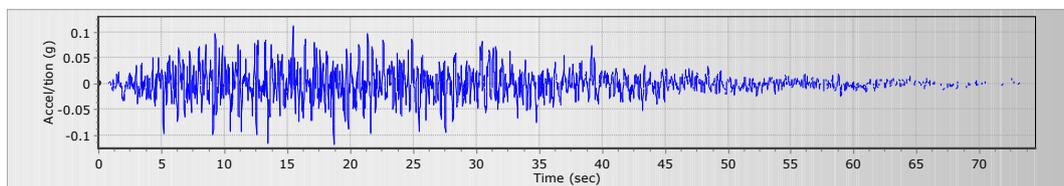
### Acelerograma N°2/Tr=475 años

<b>PGA</b>	0.190 g
<b>PGV</b>	14.739 cm/seg
<b>PGD</b>	15.769 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	1.615 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	1808.945 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.69 seg

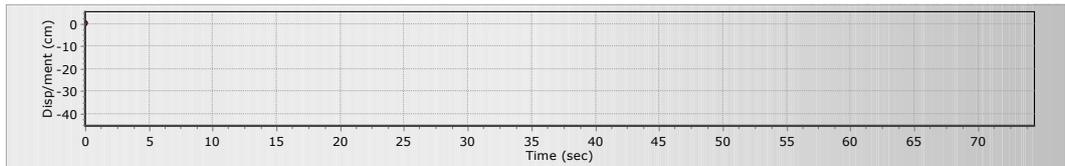
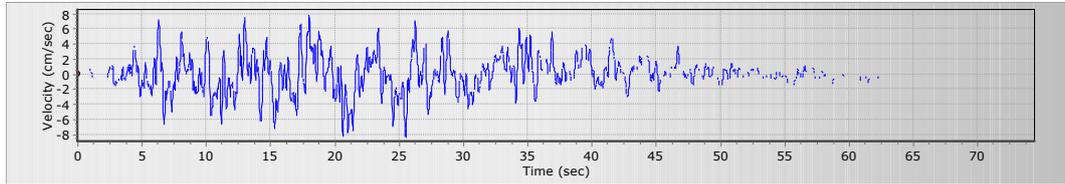
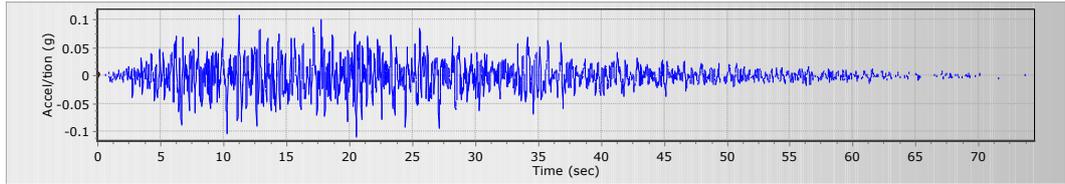


<b>Acelerograma N°3/Tr=475 años</b>	
<b>PGA</b>	0.192 g
<b>PGV</b>	15.000 cm/seg
<b>PGD</b>	24.369 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	1.577 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	1794.52 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	36.08 seg

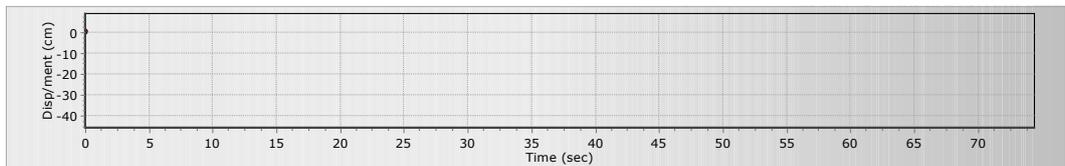
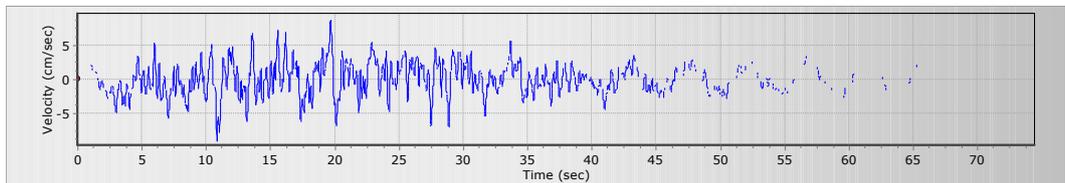
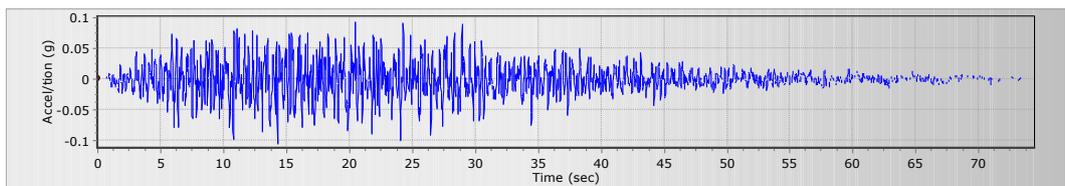
Periodo de retorno de 100 años



<b>Acelerograma N°1/Tr=100 años</b>	
<b>PGA</b>	0.123 g
<b>PGV</b>	17.056 cm/seg
<b>PGD</b>	50.953 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	0.688 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	1182.692 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	37.71 seg



<b>Acelerograma N°2/Tr=100 años</b>	
<b>PGA</b>	0.111 g
<b>PGV</b>	8.328 cm/seg
<b>PGD</b>	10.522 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	0.560 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	1065.688 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	35.62 seg



<b>Acelerograma N°3/Tr=100 años</b>	
<b>PGA</b>	0.111 g
<b>PGV</b>	9.079 cm/seg
<b>PGD</b>	8.254 cm
<b>Intensidad de Arias</b>	0.603 cm/seg
<b>Cum. Abs. Velocidad</b>	1125.373 cm/seg
<b>Duración Significativa</b>	36.68 seg

## 2. Matriz de consistencia de la investigación

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General</b> ¿Cuáles serán los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>a) ¿Cuál son las características de las fuentes sismogénicas en la Provincia de Pasco?</p> <p>b) ¿Cuál es el peligro sísmico para periodos de retorno de 475 y 2475 años para un tiempo de exposición de 50 años?</p> <p>c) ¿Cuál es la tasa de excedencia de aceleraciones máximas (PGA) para la provincia de Pasco?</p> <p>d) ¿Cuál será la duración, en segundos, de los acelerogramas sintéticos?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Conocer los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>a) Determinar las características de las fuentes sismogénicas en la Provincia de Pasco.</p> <p>b) Obtener los valores del peligro sísmico para periodos de retorno de 475 y 2475 años para un tiempo de exposición de 50 años.</p> <p>c) Graficar la tasa de excedencia de aceleraciones</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>- Los valores máximos de PGA en los acelerogramas sintéticos obtenidos para la Provincia de Pasco mediante estudios probabilísticos del peligro sísmico, para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento de 25% debido a la aplicación de la metodología FEMA 356.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>- Los valores de aceleración espectral obtenidos en el espectro de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 1000 años estarán en el rango de 0.70g y 1.00g.</p> <p>- Los acelerogramas sintéticos presentan</p>	<p><b>Variable Independiente</b> Aplicación de la metodología FEMA 356.</p> <p><b>Variable Dependiente</b> Los valores de PGA para periodos de retorno de 475 y 2475 años sufren un decremento del 25%.</p> <p><b>Variable Interviniente</b> Provincia de Pasco</p>	<p><b>Tipo de Investigación</b> Investigación Cuantitativa: Porque busca explicar o predecir el comportamiento más probable de los suelos en la provincia de Pasco ante un evento sísmico relevante, a través de un enfoque de obtención de datos numéricos.</p> <p><b>Método de Investigación</b> La investigación tiene la metodología descriptiva, porque se interpreta los resultados presentados.</p> <p><b>Diseño de Investigación</b> Descriptiva - Horizontal” porque describe, observa y luego analiza las características de las fuentes sismogénicas que afectan principalmente a Pasco.</p> <p><b>Población y Muestra</b> - Población se consideró a las 33 fuentes sismogénicas actualizadas</p>

<p>e) ¿Cuáles serán los valores máximos de los espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años?</p> <p>f) ¿Cuál es el valor de los espectros de diseño siguiendo la metodología FEMA-356?</p>	<p>máximas (PGA) para la provincia de Pasco.</p> <p><b>d)</b> Determinar la duración, en segundos, de los acelerogramas sintéticos.</p> <p><b>e)</b> Comprobar los valores máximos de los espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años.</p> <p><b>f)</b> Cuantificar los valores de los espectros de diseño siguiendo la metodología FEMA-356.</p>	<p>aceleraciones máximas mejoradas por la metodología FEMA 356 que son muy similares a las obtenidas con acelerogramas reales.</p> <p>- El tiempo de los eventos sísmicos simulados mediante los acelerogramas sintéticos presentan duraciones cercanas a 1 minuto lo que influye directamente en el daño de las estructuras durante un sismo.</p>		<p>presentadas en el estudio “RE-EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO PARA EL PERÚ”</p> <p>- Muestra</p> <p>Como muestra de estudio se consideró a las fuentes sismogénicas corticales F15 – F16 e intraplaca F24-F25, por ser estas las que afectan directamente al lugar de estudio.</p>
---	---	--	--	---