

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



Peligro sísmico del departamento de Lambayeque mediante el método de probabilistic seismic hazard analysis en el 2020

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Miguel Sebastian Valera Garatea

ASESOR

Carlos Rafael Tafur Jimenez

<https://orcid.org/0000-0003-0119-8234>

Chiclayo, 2023

**Peligro sísmico del departamento de Lambayeque mediante el
método de probabilistic seismic hazard analysis en el 2020**

PRESENTADA POR:

Miguel Sebastian Valera Garatea

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

APROBADA POR:

Segundo Guillermo Carranza Cieza

PRESIDENTE

Jose Alberto Acero Martinez

SECRETARIO

Carlos Rafael Tafur Jimenez

VOCAL

Dedicatoria

Primero a Dios y a la Virgen María por estar siempre conmigo y darme la sabiduría y la inteligencia necesaria a través de los años.

También a mi familia que me ha apoyado en el transcurso de mi vida, a mi madre Mercedes Altermira Garatea Céspedes ya que sin ella no sería el hombre que soy ahora; también a mis dos abuelos que han sido para mí unos padres, gracias: Mercedes Alicia Céspedes Babbini y José Antonio Garatea Zapata.

Un enorme agradecimiento a mi asesor el ingeniero Serrano Zelada Ovidio el cual me instruyó a lo largo de mi tesis, agradecimientos adicionales al Ingeniero Tavera Huarache Hernando Jhonny el cual me ayudó también en el proceso y por último también al Ingeniero Acero Martínez José Alberto el cual me incentivo a la elaboración de esta tesis.

VALERA GARATEA MIGUEL SEBASTIAN

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	11%	2%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Privada de Tacna Trabajo del estudiante	1%
4	creativecommons.org Fuente de Internet	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	1library.co Fuente de Internet	<1%
7	www.andangeology.cl Fuente de Internet	<1%
8	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
9	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1%

Índice

Resumen	10
Abstract	11
I. Introducción	12
II. Marco teórico	14
II.1 Antecedentes Del Problema	14
II.1.1 Antecedente 01	14
II.1.2 Antecedente 02	14
II.1.3 Antecedente 03	15
II.1.4 Antecedente 04	15
II.1.5 Antecedente 05	16
III.1.1.6 Antecedente 06	16
II.2 Bases Teóricas Científicas	17
II.2.1 Peligro Sísmico	17
II.2.2 Métodos de Análisis de Peligro Sísmico	18
II.2.3 Incertidumbre Espacial	21
II.2.4 Incertidumbre Temporal	27
II.2.5 Recurrencia Sísmica	28
II.2.6 Leyes de Atenuación	32
II.2.7 Ondas Sísmicas	33
II.2.8 Notación Espacial de los Sismos	35
II.2.9 Magnitud	36
II.2.10 La Tierra	40
II.2.10.2 Distribución Espacial De Los Sismos En El Perú	41
II.2.10.3 Estructuras Tectónicas De La Placa De Nazca	42
II.2.10.4 Programa R-Crisis	43
II.2.10.5 Zmap	44
III. Materiales y métodos	45
III.1 Tipo y nivel de investigación	45
III.2 Diseño de investigación	46
III.3 Población, muestra, muestreo	47

III.4 Criterios de selección.....	48
III.5 Operacionalización de las Variables	49
III.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	50
III.7 Procedimientos	50
III.8 Plan de procesamiento y análisis de datos	50
III.9 Matriz de Consistencia	51
III.9 Consideraciones éticas.....	52
IV. Resultados y discusiones	53
IV.1 Resultados	53
IV.1.1 Datos Generales de la Sismicidad de Lambayeque	53
IV.1.2 Fuente Sísmica F2.....	57
IV.1.3 Fuente Sísmica F14.....	59
IV.1.4 Parámetros finales de las fuentes sísmicas	61
IV.1.5 Ángulo de buzamiento Lambayecano.	63
IV.1.6 Curva de Peligro Sísmico.....	63
IV.1.6 Mapas de Peligro Sísmico.....	64
IV.1.7 Peligro Sísmico Uniforme.....	64
V. Discusión.....	65
VI. Conclusiones	66
VII. Recomendaciones.....	68
VIII.Referencias.....	68
IX. Anexos	71
IX.1 Anexo 01: Catálogo de Sismos.....	71
IX.2 Anexo 02: Catálogo de Sismos solo de la fuente F2.....	75
IX.3 Anexo 03: Catálogo de Sismos solo de la fuente F14.....	78
IX.4 Anexo 04: Manual de ingreso de datos al Zmap.....	80
IX.5 Anexo 05: Manual de ingreso de datos al R-Crisis.....	85
IX.6 Anexo 06: Mapas de Aceleraciones en el suelo para diferentes periodos estructurales.	92

Lista de figuras

Figura 1: Mapa del USGS que muestra la intensidad de los temblores de tierra potencial que tiene 2% de probabilidad de ocurrencia en 50 años. [13]	18
Figura 2 : Proceso para el análisis del peligro sísmico determinístico. [14]	19
Figura 3: Proceso para el análisis del peligro sísmico probabilístico. [14]	21
Figura 4: Distribución espacial de los epicentros correspondientes a sismos de foco superficial ($h < 60\text{km}$) en torno al cerro Tamboraque.....	22
Figura 5 : Fuentes sismogénicas de subducción y continentales. [15]	26
Figura 6: Gráficos de recurrencia sísmica para las fuentes Fs3. [11].....	28
Figura 7: Relación de Recurrencia de Gutenberg y Richter, en la que se muestra el significado del parámetro b. [17].....	29
Figura 8: Eventos Normalizados respecto a cada año.....	31
Figura 9: Esquema del árbol lógico usado en la evaluación del peligro sísmico para suelos. [19]	33
Figura 10: Ondas P. [20]	33
Figura 11: Ondas S. [20]	34
Figura 12: Ondas Love. [20]	34
Figura 13: Ondas Rayleigh. [20]	35
Figura 14: Registro de aceleración para el sismo del 20/10/2019. [21]	35
Figura 15: Notación Espacial de los Sismos. [22]	36
Figura 16: Localización de un sismo. [23]	36
Figura 17: Relación entre M_w y las escalas M_s , M_{jma} , M_l y m_b . [24]	38
Figura 18: Tipos de Límites entre placas. [17]	40
Figura 19: Esquema de la distribución de eventos sísmicos asociados a procesos de subducción. [26]	41
Figura 20: Estructuras tectónicas de la placa de Nazca. [26].....	42
Figura 21: Programa R-Crisis. [27]	43
Figura 22: Programa Zmap 6.0.....	44
Figura 23: Enfoques de la investigación. [29]	45
Figura 24: Alcances de la Investigación Cuantitativa. [29]	46
Figura 25: Diseños de la Investigación. [29]	47
Figura 26: Número acumulado de sismos a través del tiempo en el departamento de Lambayeque.	53
Figura 27: Histograma de eventos sísmicos en el tiempo en el departamento de Lambayeque	54
Figura 28: Histograma de magnitudes en el departamento de Lambayeque	54
Figura 29: Histograma de profundidades de eventos sísmicos en el departamento de Lambayeque.....	55
Figura 30: Distribución espacial de los eventos sísmicos en el departamento de Lambayeque	55
Figura 31: Fuentes sísmicas de Alva y Castillo; y las propuestas en el trabajo.	56
Figura 32: Número acumulado de sismos de la fuente sísmica F2.	57
Figura 33: Histograma de magnitudes de la fuente sísmica F2.....	57
Figura 34:Histograma de profundidades de eventos sísmicos de la fuente sísmica F2.	58
Figura 35: Recurrencia de Gutenberg y Richter de la fuente sísmica F2.	58
Figura 36: Número acumulado de sismos de la fuente sísmica F14.	59
Figura 37: Histograma de magnitudes de la fuente sísmica F14.....	59
Figura 38: Histograma de profundidades de eventos sísmicos de la fuente sísmica F14.	60
Figura 39: Recurrencia de Gutenberg y Richter de la fuente sísmica F2.	60
Figura 40: Angulo de Buzamiento de benioff departamento de Lambayeque.	63
Figura 41: Curva de Probabilidad de Excedencia en 50 años para un periodo de 0.10 s en Chiclayo...63	
Figura 42: Peligro sísmico uniforme para una misma probabilidad de excedencia en 50 años en la ciudad de Chiclayo	65
Figura 43: Página web del programa Zmap.....	80
Figura 44: Ejecución del programa Zmap.	80
Figura 45: Menú del Zmap.....	81

Figura 46: Menú de importación del catálogo.	81
Figura 47: Archivo formato “.txt” importado.	82
Figura 48: Parámetros generales del catálogo sísmico.	82
Figura 49: Ubicación de los sismos del catálogo.	83
Figura 50: Proceso para hallar la gráfica de número acumulado de sismos.	83
Figura 51: Procedimiento para determinar la recurrencia del catálogo.	84
Figura 52: Procedimiento para hallar diferentes histogramas.	84
Figura 53: Interfaz inicial del programa.	85
Figura 54: Maneras de acceder a la pestaña de mapas.	85
Figura 55: Pestaña donde se cargará el mapa.	86
Figura 56: Maneras de acceder a la pestaña Grid of sites.	86
Figura 57: Pestaña de Grid of site.	87
Figura 58: Maneras de acceder a la pestaña Source Geometry.	87
Figura 59: Pestaña Source Geometry.	88
Figura 60: Maneras de acceder a la pestaña Source Seismicity.	88
Figura 61: Pestaña Source Seismicity.	89
Figura 62: Maneras de acceder a la pestaña Attenuation data.	89
Figura 63: Pestaña Attenuation data.	90
Figura 64: Maneras de acceder a la pestaña Spectral ordinates.	90
Figura 65: Pestaña Spectral ordinates.	91
Figura 66: Manera de acceder a Set output files.	91
Figura 67: Manera de acceder a See Hazard maps.	92
Figura 68: Visualización del mapa ya sus aceleraciones en gals.	92

Lista de tablas

Tabla 1: Diferencias entre un análisis DSHA y PSHA	21
Tabla 2: Coordenadas geográficas de las fuentes de subducción superficiales y de las fuentes continentales. [15]	23
Tabla 3: Coordenadas geográficas de las subducción intermedia y profundas. [15]	25
Tabla 4: Operacionalización de las Variables	49
Tabla 5: Nuevas Coordenadas de las fuentes F2 y F14 para el estudio sísmico del departamento de Lambayeque.	56
Tabla 6: Coordenadas y Profundidades de las fuentes utilizadas en RCRISIS	61
Tabla 7: Parámetros propios de cada fuente sismogénica	62
Tabla 8: Aceleraciones en suelo rígido del departamento de Lambayeque.....	64
Tabla 9: Catálogo de Sismos en el departamento de Lambayeque.	71
Tabla 10: Catálogo de Sismos solo de la fuente F2 para el departamento de Lambayeque.	75
Tabla 11: Catálogo de Sismos solo de la fuente F14 para el departamento de Lambayeque.	78

Resumen

La presente Tesis tiene como finalidad determinar el peligro sísmico del departamento de Lambayeque utilizando el método de PSHA, para realizar esto se necesitó recopilar un catálogo sísmico del departamento de Lambayeque, homogenizar los datos obtenidos del catálogo a la magnitud M_w , posteriormente se determinó las fuentes sísmicas del departamento de Lambayeque para poder así encontrar la recurrencia de magnitudes a través del tiempo y poder aplicar las leyes de atenuación de Young y Sadigh.

Todos los datos se ingresaron al programa R-Crisis, el cual nos permitió hallar una curva de peligro sísmico y a su vez hallar varios mapas de peligro sísmico para diferentes periodos estructurales (0.00s, 0.10s, 0.20s, 0.30s, 0.40s, 0.50s y 0.60s para un periodo de exposición de 50 años y una probabilidad del 10%)

Palabras Claves

Lambayeque, PSHA, Sismo, Ondas, Aceleraciones

Abstract

The purpose of this thesis is to determine the seismic hazard of the department of Lambayeque using the PSHA method, to do this it was necessary to compile a seismic catalog of the department of Lambayeque, homogenize the data obtained from the catalog to the magnitude M_w , later the sources were determined seismic studies of the department of Lambayeque in order to find the recurrence of magnitudes over time and to apply the attenuation laws of Young and Sadigh.

All data was entered into the R-Crisis program, which allowed us to find a seismic hazard curve and in turn find several seismic hazard maps for different structural periods (0.00s, 0.10s, 0.20s, 0.30s, 0.40s, 0.50s and 0.60s for an exposure period of 50 years and a probability of 10%)

Keywords

Lambayeque, PSHA, Earthquake, Waves, Accelerations

I. Introducción

Mundialmente los movimientos sísmicos son originados por la tectónica de placas, generando muchas pérdidas humanas y económicas, sin embargo, antiguamente algunas culturas catalogaban a este suceso como castigos, tal es el caso de los chinos los cuales lo atribuían a convulsiones del gran dragón que vivía en las profundidades, los japoneses decían quera debido a Namazu y los cristianos lo atribuían una forma de castigo dado por Dios.

Algunos de los terremotos más destructivos del mundo en el siglo XXI fueron China en el 2008, Haití en el 2010 y Japón en el 2011. [1] Por tal motivo es que hombre a través del tiempo ha tratado de pronosticar la incidencia de los terremotos, para poder diseñar edificaciones que estén preparadas para dichos efectos sísmicos.

Nuestro país como ya se sabe no está exento de dichos movimientos sísmicos, debido a que el Perú se encuentra en una región conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico, lugar donde la tierra libera más del 85% del total de su energía en forma de terremotos y erupciones volcánicas. [2] Siendo más específicos el Perú se encuentra en una zona de subducción, donde la placa de Nazca se subduce por debajo de la placa Sudamericana, generando así grandes terremotos.

Los terremotos más importantes de nuestra historia son: el terremoto de 1970 en Tumbes, 1974 en Lima, 2001 en Arequipa con una magnitud de 8.4 y el más reciente el de Pisco el 2007 el cual duró 120 segundos, con un magnitud de 8 Mw generando más de 434 mil damnificados, 52 mil viviendas derrumbadas y 596 personas fallecidas a causa del derrumbe de los edificios. [3]

Muchos sismos de diferentes magnitudes se han dado en nuestro departamento, de los cuales podemos resaltar algunos como es el caso del sismo del 20 de noviembre de 1960, el cual tuvo una magnitud de 7.6 Mw cuyo epicentro fue frente a las costas de Pimentel generando a su vez un maremoto que produjo daños en Pimentel, Eten, Santa Rosa y San José [4]; otro sismo fue el 16 de Octubre del 2016 de magnitud 5.3 generando miedo en los pobladores. [5]

Actualmente el Peligro sísmico es fundamental analizarlo, por tal motivo los científicos han construido modelos que permiten determinar el peligro sísmico para una zona específica a través de fórmulas matemáticas, proporcionando como resultado mapas de curvas de peligro sísmico y mapas de isoaceleraciones.

Existen dos maneras de hallar el peligro sísmico en una zona determinada, uno es utilizando el Deterministic Seismic Hazard Analysis, también conocido mundialmente con DSHA y el otro es el Probabilistic Seismic Hazard Analysis por sus siglas en inglés PSHA; cabe recalcar que ambos estudios serán explicados a detalle en este proyecto y a su vez se justificará por qué uno de estos dos es más preciso que el otro.

Desde el punto de vista científico, el peligro sísmico de una zona determinada permitirá que se realice un análisis estructural más completo, ya que dicho peligro sísmico está relacionado muy directamente con la sismo tectónica de la zona, de la topografía y de las características del suelo, permitiendo así hallar la probabilidad de un sismo y las aceleraciones bajo las cuales una edificación se diseñará.

Analizando este proyecto desde un punto de vista social, se puede decir que el Departamento de Lambayeque será uno de los pocos departamentos del Perú que posee un análisis de peligro sísmico netamente de su zona, conociendo este peligro sísmico, la población tendrá una mayor confiabilidad en el diseño estructural que realice un ingeniero.

El peligro sísmico nos brindara diseñar mejores edificaciones, las cuales tendrán un tiempo de vida útil más amplio y con mayores parámetros de seguridad, evitando así un elevado gasto económico a la hora de realizar una edificación, pues no esperaremos que la estructura colapse para recién darnos cuenta de que se puedo diseñar de una mejor manera.

También cabe recalca que se mejora desde un punto de vista técnico, permitiendo el desarrollo de mejores y futuras técnicas que podrán aplicarse a estructuras utilizando como base este estudio que se desea realizar.

El objetivo general es determinar el peligro sísmico del departamento de Lambayeque utilizando el método de PSHA.

Los objetivos específicos: recopilar un catálogo sísmico del departamento de Lambayeque, homogenizar los datos obtenidos del catálogo a la magnitud M_w , determinar las fuentes sísmicas del departamento de Lambayeque, encontrar la recurrencia de magnitudes a través del tiempo de la zona, aplicar las leyes de atenuación de Young y Sadigh, utilizar el programa R-Crisis, hallar un curva de peligro sísmico del departamento de Lambayeque y hallar un mapa de peligro sísmico de la zona analizada.

II. Marco teórico

II.1 Antecedentes Del Problema

II.1.1 Antecedente 01

En Costa Rica se realizó en el año 2017 un estudio de Potencial Sísmico de las Fallas del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, para dicho estudio se analizaron 81 fallas dentro del CDCCR, lo cual conforma un área de 21 000 km², la cual necesitó ser subdividida en 8 fuentes donde se estudiaron las características geométricas de las fallas que se encontraban dentro de cada fuente, permitiendo así obtener una identificación escueta y actualizada de estas fallas. Además, se logró conseguir una mejor comprensión de las fallas del CDCCR. Analizando varias fórmulas de atenuación que se proponen a nivel mundial, se optó por elegir a aquella que asimile a la forma tectónica de la zona de estudio.

El desarrollo de este estudio necesitó de un programa en Java, el cual determina de forma sencilla la discretización de las fallas, empleando 4 medidas de ruptura diferentes.

Se concluyó en dicho estudio la existencia de áreas que poseen un alto peligro sísmico dentro del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, las cuales son Siquierres-Mantina y Candelaria con una magnitud de 7.3 Mw, Jaris con una magnitud de 14 Kanamori de 7.0. [6]

II.1.2 Antecedente 02

En el año 2016 se realizó un estudio en Cuenca sobre el Peligro Sísmico de Ecuador y Propuesta de Espectros de Diseño para la Ciudad de Cuenca, el estudio surgió debido a la ausencia de un catálogo de sismos y la falta de información de este tema, por lo cual fue necesario realizar un estudio de probabilidad sísmica en Ecuador.

Los primeros pasos de este estudio fue encontrar y homogenizar los sismos y sus magnitudes para evitar altas desviaciones en los resultados de dicho estudio, el siguiente paso fue analizar diferentes modelos de atenuación con el fin de saber la intensidad de un sismo en cualquier zona de interés, también se utilizó la fórmula de Gutenberg y Richter, para determinar dicha probabilidad.

Los resultados obtenidos en este estudio fueron las curvas de peligro sísmico, mapas de peligro sísmico y espectros de peligro uniforme para la ciudad de Cuenca. [7]

II.1.3 Antecedente 03

Se realizó un estudio de Peligro Sísmico en el Segmento Norte de la Región del Maule, Chile; el cual tuvo como objetivo principal encontrar el peligro sísmico latente en Maule, se caracterizó las fuentes de este estudio en dos tipos las de Interplaca e Interplaca teniendo como datos un catálogo sísmico de la zona, la cual es la fuente principal y necesaria para realizar el estudio de peligro sísmico.

El estudio constó de la aplicación de las fuentes de interplaca para sustentar las leyes actividad sísmica de cada fuente, así como también el uso del programa computacional CRISIS 2007.

El resultado de estudio fue la obtención de mapas de peligro sísmico en función a una aceleración horizontal dada para cierta probabilidad de excedencia en un periodo de vida útil determinado. Las máximas aceleraciones fueron de 1g, 0.7g y 0.5g en la zona de la costa de Maule. [8]

II.1.4 Antecedente 04

El estudio de Influencia de Espectros Determinísticos y Probabilísticos para la evaluación del peligro Sísmico en estructuras de la región de Tacna, posee como finalidad hallar los espectros que den una amenaza sísmica en la zona de Tacna.

La realización de este estudio necesitó la recopilación de datos sísmicos ocurridos en la zona desde el 1 de enero de 1965 hasta el 22 de mayo del 2018, el catálogo se obtuvo de la información sismográfica de United States Geological Survey (USGS), cabe resaltar que fue necesario asimilar todas la magnitudes del USGS a un sol tipo de magnitud para poder así obtener un resultado más veraz y coherente, posteriormente se definió la ley de atenuación a utilizar para poder así hallar tanto la probabilidad de excedencia y los mapas de peligro sísmico en ordenadas espectrales en función de la gravedad. Dichos resultados dieron procesados y analizados utilizando herramientas computacionales como el programa Excel y el programa Crisis 2015. [9]

II.1.5 Antecedente 05

El informe presentado analizó la data de la actividad sísmica del área donde se realizará la obra definida como Estudio Definitivo y Expediente Técnico –Ampliación, Renovación y Mejoramiento del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado en la Localidad de Caraveli-Arequipa.

El análisis de peligro sísmico se determinó usando el método de determinístico y probabilístico de la zona, dando como resultado aceleraciones máximas del suelo para considerarlo dentro del Sismo Máximo Considerado para la realización de la obra, también se realizó espectro de peligro uniforme.

La información base de este estudio es la recopilación de un catálogo sísmico de la zona para poder así comenzar con el proceso de probabilístico y determinístico de la zona, también se definió la ley de atenuación a utilizar en dicho estudio, la cual fue la ley de atenuación propuesta por Youngs. [10]

III.1.1.6 Antecedente 06

El Estudio de Peligro Sísmico para el Cerro Tamboraque Distrito de San Mateo – Provincia de Huarochirí, elaborado por Hernando Tavera para la compañía minera San Juan, tiene como finalidad analizar el peligro sísmico de la zona usando el método determinístico y el probabilístico.

Como principal parámetro se obtiene el historial de sismos para la zona, los cuales serán utilizados como base para la elaboración final de la curva de peligro sísmico, para facilitar el proceso de análisis se utilizó el programa Crisis 2007 y también se definió las leyes de atenuación las cuales fueron las de Young de 1997 para zona de subducción y la ley de Sadigh de 1997 para los sismos corticales.

Los resultados de este análisis fue la elaboración de aceleraciones probables que podría presentarse en el cerro Tamboraque. [11]

II.2 Bases Teóricas Científicas

II.2.1 Peligro Sísmico

Antes de empezar a hablar sobre peligro sísmico debemos tener en cuenta algunos conceptos básicos para poder hablar con propiedad.

$$Riesgo = Peligro \times Vulnerabilidad$$

El peligro o también conocido en otros países como amenaza, viene dado por la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural, el cual puede ser altamente perjudicial en un determinado tiempo. [12]

La vulnerabilidad se entiende como la capacidad de resistencia de un elemento o un conjunto de ellos ante un peligro o amenaza. [12]

Para entender mejor estos conceptos plantearemos el siguiente ejemplo:

Supongamos que ocurre una fuerte lluvia en la localidad de Cañarís y en un sector determinado de este existen edificaciones que se encuentran ubicadas al pie de un talud, el cual debido a la lluvia torrencial cedió y ocasionó que algunas edificaciones colapsen y otras aun sigan en pie.

El ejemplo mencionado nos permite inferir que el peligro o amenaza es la probabilidad que tuvo este talud de deslizarse, mientras que la vulnerabilidad fue la capacidad de las edificaciones de resistir este fenómeno. El mismo ejemplo se puede aplicarse a nuestro tema de investigación, donde el peligro sería la probabilidad de ocurrencia de un sismo de determinada magnitud, y la vulnerabilidad la capacidad que posee una edificación para resistir dicho movimiento sísmico.

Una vez entendido estos conceptos poder decir que el peligro sísmico es la probabilidad de ocurrencia de un sismo, el cual puede sobrepasar un nivel de umbral dado para un tiempo determinado, donde será necesario conocer la magnitud del posible evento que ocurrirá.

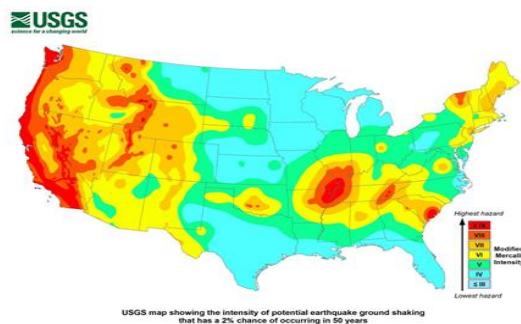


Figura 1: Mapa del USGS que muestra la intensidad de los temblores de tierra potencial que tiene 2% de probabilidad de ocurrencia en 50 años. [13]

II.2.2 Métodos de Análisis de Peligro Sísmico

II.2.2.1 Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)

También conocido en español como Análisis Determinístico del Peligro Sísmico, dicho método está en función del sismo de mayor magnitud dado en la zona a analizar. Sin embargo, este análisis es muy burdo ya que al estar en función de solo un sismo (el de mayor magnitud), debido al cual no se podría determinar realmente la ocurrencia de varios movimientos sísmicos de otras magnitudes. [14]

Pongamos el siguiente ejemplo; En el año 2020 ocurre un sismo de magnitud 7.5 en la ciudad de Arequipa el cual es catalogado como el evento de mayor magnitud para esta ciudad, por lo cual se decide hacer un análisis determinístico de la zona de Arequipa, sin embargo ese mismo año también ocurre otro sismo de igual magnitud en la ciudad de San Andrés, el cual también fue catalogado como el de mayor magnitud para esta zona, entonces nos preguntaríamos ¿Se podría decir que el estudio determinístico de Arequipa sirve también en San Andrés, ya que dicho estudio está en función de la mayor magnitud dada en una zona? La respuesta a esta pregunta es NO, ya que los movimientos sísmicos se dieron en zonas diferentes, para Arequipa es la placa de Nazca y como sabemos la placa de Nazca no es misma placa que la de San Andrés, por lo que este estudio determinístico no aplicaría para la otra ciudad.

Por el motivo mostrado anteriormente en ejemplo, el método determinístico se considera un método muy burdo para determinar la ocurrencia de un sismo de determinada magnitud en una zona.

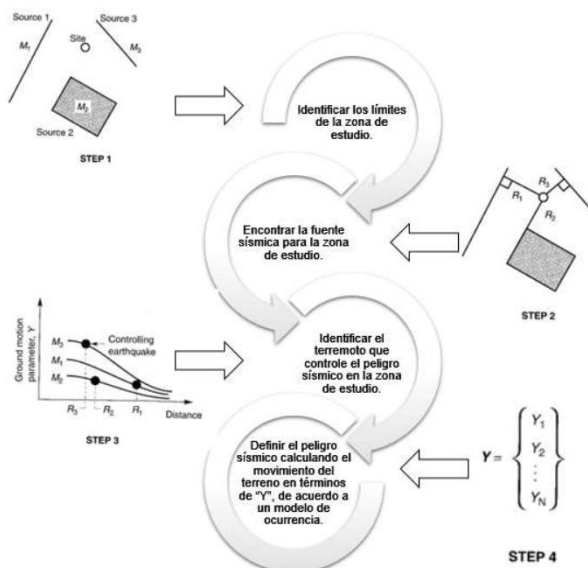


Figura 2 : Proceso para el análisis del peligro sísmico determinístico. [14]

II.2.2.2 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

El método estudio de análisis peligro sísmico probabilístico propuesto por Arlin Cornell en 1968, tiene como datos un catálogo de sismo de la zona a utilizar (sismicidad pasada de la zona), así como también se preocupa por la incertidumbre del tamaño, ubicación, tasa de recurrencia. [14]

La fórmula de la probabilidad base de este estudio es la siguiente.

$$P(A) = \sum_i^n P(A / E_i) * P(E_i)$$

Esta fórmula se puede leer como la probabilidad que ocurra el evento A respecto a otro evento que lo condiciona A, es decir E condiciona A para que se pueda dar. Para poder entender esto se planteará la siguiente situación como ejemplo; En la final de un partido fútbol un arquero debe atajar el penal para hacer ganar a su equipo, se sabe que el arquero normalmente tiene un probabilidad atajar el balo cuando se lanza al palo derecho de un 40% , al palo izquierdo de 20% y 40% cuando el balón es atajado en el centro del arco, además el jugador que va a patear el penal tiene un probabilidad de lanzar el balón a palo derecho del arco de 50%, al lado izquierdo de 40% y al centro de 10%; entonces ¿Cuál sería la probabilidad de que el arquero ataje el penal?

$$P(\text{Atajar el penal}) = 0.2 * 0.4 + 0.4 * 0.5 + 0.4 * 0.1$$

$$P(\text{Atajar el penal}) = 0.32$$

La respuesta sería que el arquero posee un 32% de probabilidad de atajar el penal y logre que su equipo obtenga la victoria.

Es la fórmula probabilidad de ocurrencia Cornell la expreso en función de la ocurrencia de un sismo.

$$P[A \geq i] = \iint P[A / s, r]. f_s(s). f_r(s). ds. dr$$

A: la aceleración.

S: tamaño del sismo.

R: localización del sismo.

F_s(S): función de densidad de probabilidad del tamaño del sismo.

F_r(S): función de densidad de probabilidad de la localización de un sismo.

También puede formularse la anterior ecuación de la siguiente manera:

$$P[Sa(Tn) > Sa * (Tn)] = \iint P[(Sa(Tn) > Sa * (Tn)|m, r)]. f_M(m). f_R(r) dm dr$$

Una de las diferencias que el estudio probabilístico utiliza la tasa de recurrencia en función de la relación de la magnitud- frecuencia mientras que el DSHA no considera el factor del tiempo en su análisis. El resultado de este análisis permite obtener la probabilidad que suceda no solo un sismo como es en el caso determinístico sino también la ocurrencia de varios sismos de diferente magnitud.

Usa métodos de estadísticos para poder hallar la probabilidad recurrencia de un sismo y esto se rige bajo la ley de ocurrencia y la ley de atenuación que se determina en el estudio. Cabe resaltar que existen diversas leyes de atenuación que se pueden aplicar a un estudio probabilístico, sin embargo, se debe elegir a aquella o aquellas que se asemejen al comportamiento de la zona a analizar.

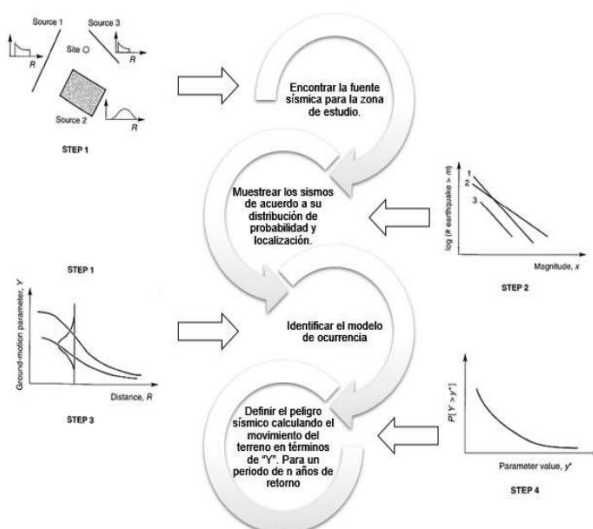


Figura 3: Proceso para el análisis del peligro sísmico probabilístico. [14]

Tabla 1: Diferencias entre un análisis DSHA y PSHA

Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)	Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)
Propone un único escenario.	Propone diversos escenarios.
Selección de la magnitud de mayor evento.	Selecciona diversas magnitudes asociadas a una fuente.
Toma la menor distancia entre la fuente y el sitio.	Abarca todas las posibilidades de distancias.
Analiza solo los efectos debido a mayor evento sísmico y su menor distancia.	Combina todas las posibles condiciones que se pueden dar en la fuente respecto a todos los sismos del catálogo.

Teniendo en claro la diferencia en entre ambos métodos de análisis, a continuación, se empezará a describir los conceptos básicos y necesarios para poder realizar el proceso probabilístico.

II.2.3 Incertidumbre Espacial

La distribución espacial de los sismos la geometría de las fuentes sísmicas puede ser puntual, lineal o volumétrica. [14]

Esto quiere decir que podemos realizar varios análisis dependiendo de cómo agrupemos los datos que vamos a utilizar, por eso es necesario para el proceso determinar fuentes sismogénicas, dichas fuentes sismogénicas viene ser comprendida como la agrupación de sismo con similares características dentro de un área definida por aquel que realizará el método probabilístico.

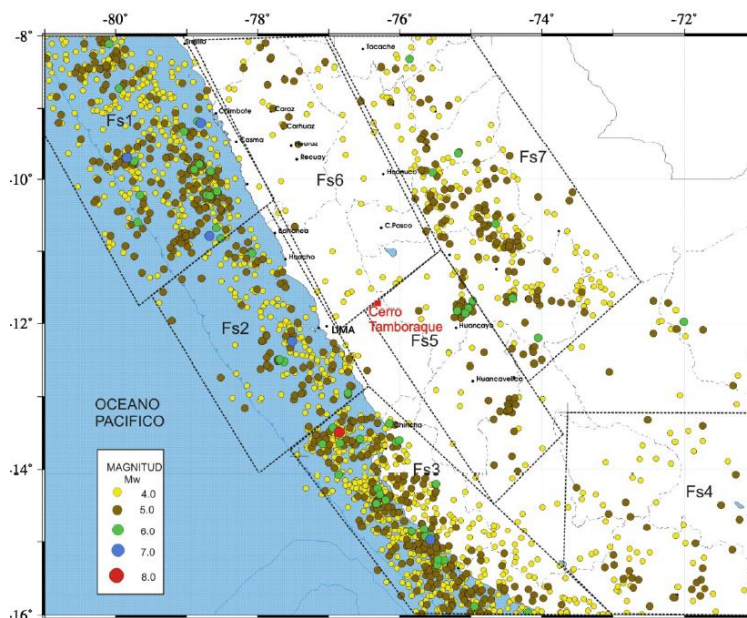


Figura 4: Distribución espacial de los epicentros correspondientes a sismos de foco superficial ($h < 60 \text{ km}$) en torno al cerro Tamboraque.

Actualmente las fuentes sismogénicas de nuestro país ya han sido delimitadas gracias al trabajo realizado por Alva y Castillo en 1993, el cual se basó en el mapa de distribución de epicentros, así como en las características tectónicas de nuestro país.

El total de fuentes de propuestas de 20, las cuales se subdividen en dos: de la fuente 1 hasta la fuente 12 en fuentes de subducción superficiales y de las fuentes continentales, de la fuente 13 a la fuente 20 en fuentes de subducción intermedia y profundas, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 2: Coordenadas geográficas de las fuentes de subducción superficiales y de las fuentes continentales. [15]

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (°)	
	Longitud	Latitud
FUENTE 1	-80.29	2.00
	-81.39	-0.97
	-81.52	-2.39
	-78.32	2.00
	-79.65	-1.21
	-80.19	-2.50
FUENTE 2	-82.00	-3.39
	-82.00	-6.83
	-81.17	-9.00
	-80.17	-3.45
	-80.67	-5.42
	-79.27	-7.90
FUENTE 3	-81.17	-9.00
	-77.00	-14.80
	-79.27	-7.90
	-75.84	-13.87
FUENTE 4	-77.00	-14.80
	-74.16	-17.87
	-75.84	-13.87
	-73.00	-16.53
FUENTE 5	-74.16	-17.87
	-71.85	-19.87
	-71.85	-22.00
	-73.00	-16.53
	-69.21	-19.00
	-69.21	-22.00
FUENTE 6	-77.50	1.58
	-79.83	-1.65
	-79.96	-2.46
	-80.92	-2.96
	-76.92	1.19
	-78.90	-2.53
	-78.97	-3.43
	-80.79	-3.44
FUENTE 7	-78.28	-8.20
	-77.21	-10.47
	-77.86	-8.07
	-76.83	-10.23
FUENTE 8	-75.84	-13.87
	-73.00	-16.53

	-74.76	-13.13
	-71.41	-14.67
FUENTE 8	-75.84	-13.87
	-73.00	-16.53
	-74.76	-13.13
	-71.41	-14.67
FUENTE 9	-73.00	-16.53
	-69.71	-18.67
	-71.41	-14.67
	-68.12	-16.13
FUENTE 10	-76.92	1.19
	-78.90	-2.53
	-79.10	-5.20
	-76.50	1.00
	-77.35	-2.40
	-77.00	-4.77
FUENTE 11	-79.10	-5.20
	-76.34	-10.67
	-74.76	-13.13
	-75.10	-4.33
	-74.17	-9.33
	-72.48	-11.40
FUENTE 12	-74.76	-13.13
	-68.12	-16.13
	-72.48	-11.40
	-67.76	-13.80

Tabla 3: Coordenadas geográficas de las subducción intermedia y profundas. [15]

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (°)	
	Longitud	Latitud
FUENTE 13	-78.73	2.00
	-81.00	-0.67
	-81.00	-3.07
	-76.00	1.82
	-79.59	-2.55
	-79.20	-3.07
FUENTE 14	-81.00	-3.07
	-81.93	-5.73
	-79.80	-8.13
	-79.20	-3.07
	-78.60	-4.00
	-77.17	-6.53
FUENTE 15	-79.80	-8.13
	-76.38	-14.30
	-77.17	-6.53
	-73.86	-12.46
FUENTE 16	-76.38	-14.30
	-73.28	-16.87
	-73.86	-12.46
	-71.21	-14.40
FUENTE 17	-73.28	-16.87
	-70.86	-18.80
	-70.38	-22.00
	-71.21	-14.40
	-68.93	-15.73
	-67.98	-22.00
FUENTE 18	-79.59	-2.55
	-78.60	-4.00
	-77.17	-6.53
	-77.50	-0.73
	-75.51	-2.06
	-75.27	-5.33
FUENTE 19	-77.17	-6.53
	-73.86	-12.46
	-75.27	-5.33
	-72.03	-11.13
FUENTE 20	-72.31	-6.37
	-71.14	-11.30
	-71.00	-6.33
	-69.69	-10.93

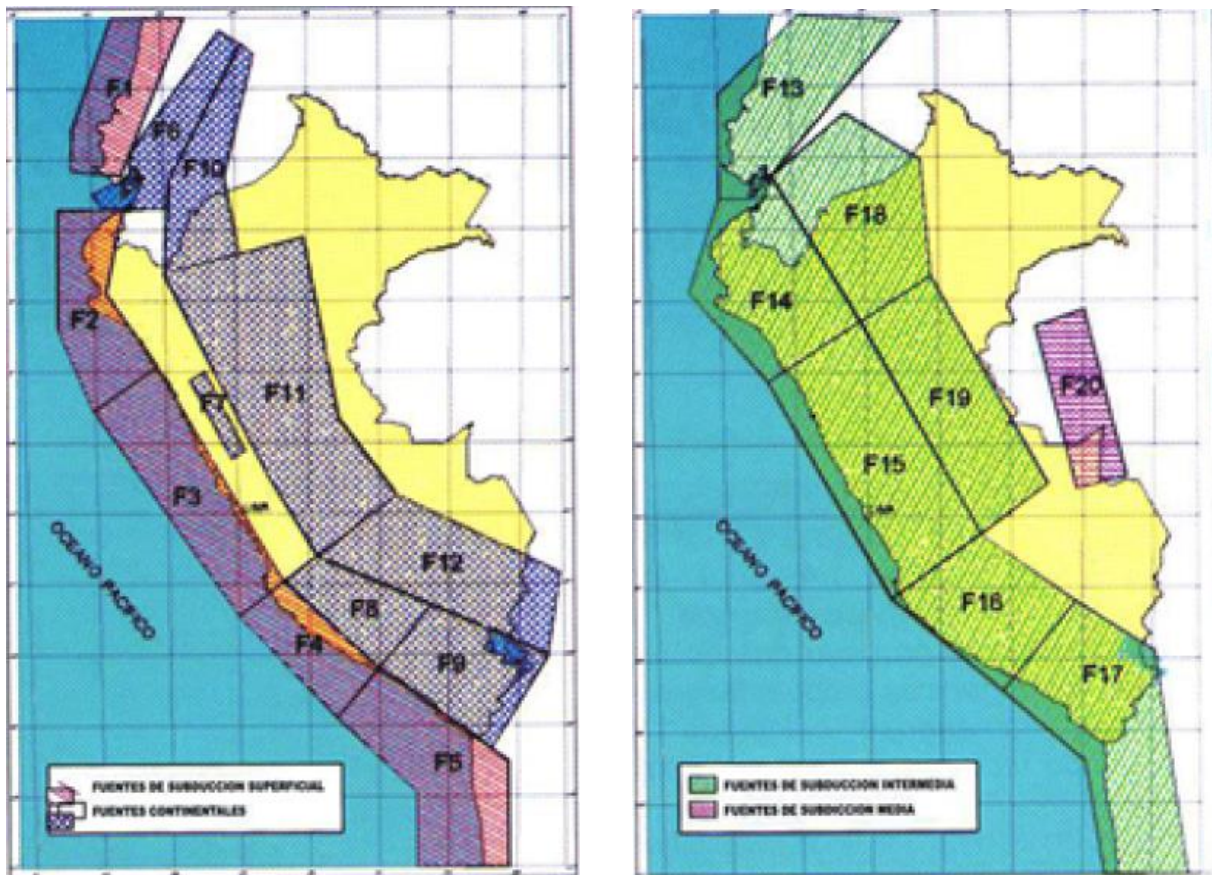


Figura 5 : Fuentes sismogénicas de subducción y continentales. [15]

II.2.4 Incertidumbre Temporal

Los eventos sísmicos se dan de manera aleatoria a través del tiempo, lo cual nos demuestra que no existe un patrón para poder revelar la hora, fecha y ubicación exacta de un evento sísmico.

Sin embargo, esta incertidumbre espacial cumple el modelo de Poisson, el cual en su metodología nos indica una manera sencilla de determinar la ocurrencia sísmica siempre y cuando cumple algunos requisitos que fueron propuesto por Poisson.

- a) La población sea infinita
- b) La ocurrencia de algún evento sísmico en un lapso de tiempo determinado será totalmente independiente al número de ocurrencia de algún otro lapso de tiempo dado.
- c) La ocurrencia en un lapso de tiempo muy corto será directamente proporcional a la amplitud en tiempo de ese intervalo.
- d) Las probabilidades de presencia de otro fenómeno de igual características se de en lapso de tiempo muy pequeño se considera despreciable.

Por lo tanto, se puede decir que los fenómenos sísmicos que ocurrirán en un espacio y tiempo se darán sin alguna memoria de otro suceso que haya ocurrido en esa porción de espacio determinado en el análisis.

$$F(N = n) = \frac{(\lambda_0 p)^n * e^{-\lambda_0 p}}{n!}$$

Donde: λ_0 es la probabilidad de que ocurra el evento, p será el tiempo que puede ser excedido y n el número de datos que cumplen para esa probabilidad.

Además, estadísticamente podemos decir también:

$$F(N \geq 1) = F(N = 1) + F(N = 2) + F(N = 3) + F(N = 4) + \dots + F(N = \infty)$$

$$F(N \geq 1) = 1 - F(N = 0)$$

$$F(N \geq 1) = 1 - e^{-\lambda_0 p}$$

Para poder entender mejor esto trataremos de dar un ejemplo a continuación:

De un estudio de PSHA se obtuvo tasa de excedencia media anual de aceleración de 0.25g para la fuente sísmica 1 fue de 0.0725, entonces ¿Cuál será la probabilidad de excedencia de dicha aceleración en 30 años?

$$F(a \geq 0.25g) = 1 - e^{-0.0725*30}$$

$$F(a \geq 0.25g) = 1 - 0.11361$$

$$F(a \geq 0.25g) = 0.88639$$

$$F(a \geq 0.25g) = 88.64 \%$$

II.2.5 Recurrencia Sísmica

Consiste en una posibilidad de ocurrencia utilizando análisis de regresión de eventos históricos. [16]

El método de ajuste utilizado permite llevar los valores a una recta en función a la densidad de los datos que existen en una determinada zona. [11]

La recurrencia utilizada es la de Gutenberg-Richter la cual está dada por la siguiente fórmula:

$$\log(N) = a - b.m$$

N: Acumulación de sismos de una magnitud

a y b son propias de cada región, b es la recurrencia de magnitudes del catálogo sísmico.

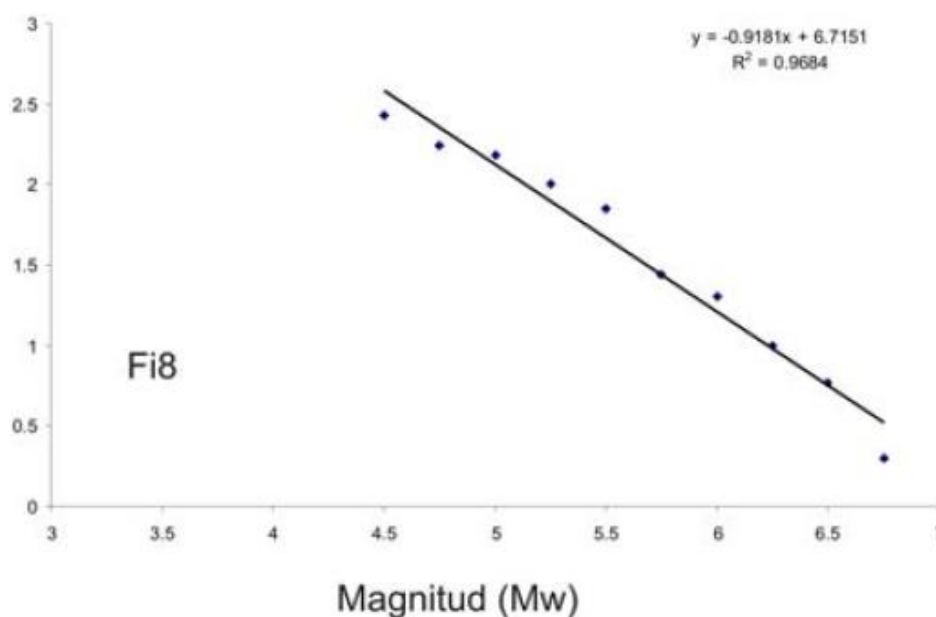


Figura 6: Gráficos de recurrencia sísmica para las fuentes Fs3. [11]

Para poder ajustar la recurrencia sísmica de una recta se puede desarrollar de dos maneras:

Una es usando el método de mínimos cuadrados, el cual ajustará los datos en una recta, la cual se encuentra determinada por el número de datos de la fuente sísmica, cabe mencionar además que si los datos de la fuente son pocos la fórmula de mínimos cuadrados no podrá ajustar de manera adecuada los datos, originado así la ausencia de dicha recta.

La otra forma de ajustar los datos a una recta es el método de máxima verosimilitud, el cual se encuentra dado en función del dato medio más probable de la fuente sísmica, además de la magnitud mínima de esta fuente. [17]

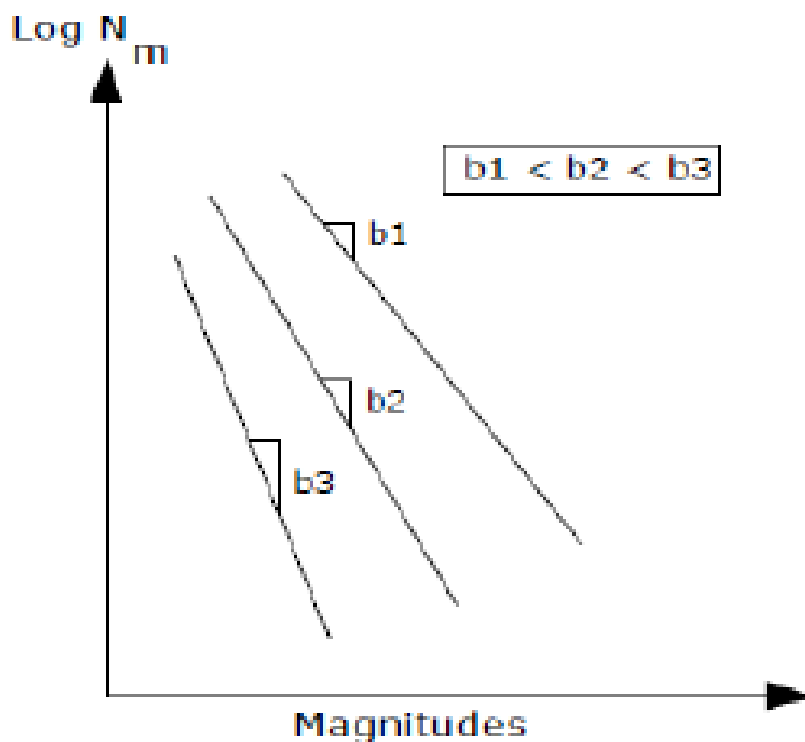


Figura 7: Relación de Recurrencia de Gutenberg y Richter, en la que se muestra el significado del parámetro b . [17]

De la imagen mostrada anteriormente se puede inferir que cuando el valor de b crece, los valores de magnitudes mayores disminuyen, así como cuando el valor de b es bajo, la ocurrencia de dichos sismos aumenta; por lo tanto, se puede concluir que la relación de b y los sismos de magnitudes grandes es inversamente proporcional.

Bueno también la ecuación propuesta por Gutenberg-Richter se puede expresar de la siguiente manera:

$$\log(N) = a - b \cdot m$$

$$10^{\log(N)} = 10^{a-bm}$$

$$N = 10^{a-bm}$$

$$N = \frac{10^a}{10^{bm}}$$

$$\ln(N) = \ln\left(\frac{10^a}{10^{bm}}\right)$$

$$\ln(N) = \ln 10^a - \ln 10^{bm}$$

$$e^{\ln(N)} = e^{(\ln 10^a - \ln 10^{bm})}$$

$$N = e^{(a \cdot \ln 10 - b \cdot m \cdot \ln 10)}$$

$$N = e^{(\alpha - \beta m)}$$

$$\alpha = \ln(10) \cdot a$$

$$\beta = \ln(10) \cdot b$$

Debido a esta nueva formulación de la acumulación de sismos en función de la exponencial se puede aseverar entonces que la ecuación propuesta por estos dos científicos abarca todas las posibles magnitudes sísmicas que se puedan dar en un lugar desde un valor de $-\infty$ hasta $+\infty$.

Sin embargo, esta última formulación debe ser evaluada en función a una magnitud mínima específica, ya que los sismos que se consideran en este proyecto son aquellas magnitudes que pueden generar significativos daños a las estructuras.

$$N = e^{(\alpha - \beta m)}$$

$$N = e^{(\alpha - \beta m + \beta m_{min} - \beta m_{min})}$$

$$N = e^{(\alpha - \beta m_{min})} * e^{(-\beta m - \beta m_{min})}$$

$$N = \lambda_0 * e^{(-\beta m - \beta m_{min})}$$

$$N = \lambda_0 * e^{-\beta(m - m_{min})}$$

El resultado final de esta ecuación nos muestra la razón de sismos anual o tasa de excedencia media anual de la zona que va a ser estudiada, la cual se simboliza con el valor λ_0 , donde $\lambda_0 = e^{(\alpha - \beta m_{min})}$.

Tal como nos muestra Bolaños y Monroy, es necesario reescribir la ecuación para poder así hallar una cantidad determinada de eventos que sean menores o iguales a una magnitud máxima, ya que la función de Gutenberg-Richter debe estar parametrizada, para lo cual convertimos la ecuación en una función de distribución acumulativa complementaria, y posteriormente diferenciar para poder hallar una función de densidad de probabilidades. [17]

$$F_M(m) = \lambda_0 * (1 - e^{-\beta(m-m_{min})})$$

Diferenciando la última ecuación: $nm = \frac{dF_M(m)}{dm} \Rightarrow f_M(m) = \lambda_0 * (\beta - e^{-\beta(m-m_{min})})$

Por último, debemos trincar la ecuación a la magnitud máxima para poder así lograr tener la ecuación de Gutenberg-Richter en función de una $m_{m\acute{a}x}$ y $m_{m\acute{i}n}$.

$$nm = f_M(m) = \lambda_0 \left(\frac{(\beta - e^{-\beta(m-m_{min})})}{1 - e^{-\beta(m_{m\acute{a}x}-m_{min})}} \right)$$

$$N = \lambda_0 \frac{e^{-\beta(m-m_{min})} - e^{-\beta(m_{m\acute{a}x}-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{m\acute{a}x}-m_{min})}}$$

La imagen a continuación muestra un catálogo de sismos, el cual está parametrizado por una magnitud mínima y una magnitud máxima

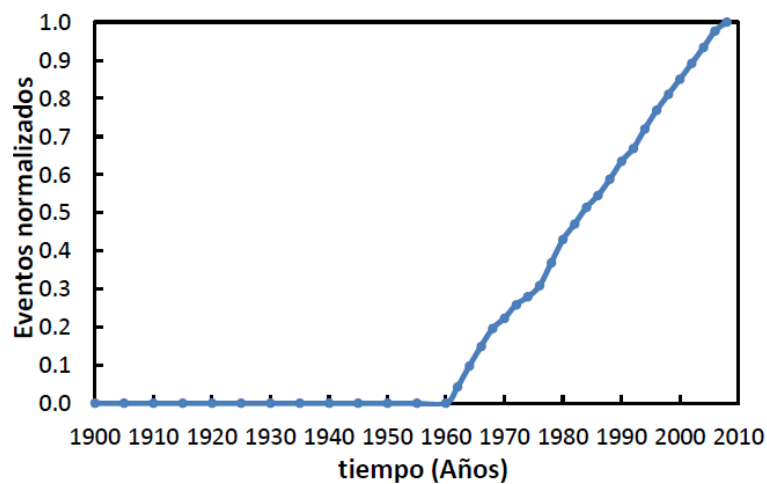


Figura 8: Eventos Normalizados respecto a cada año.

II.2.6 Leyes de Atenuación

Permite mostrar a través de aceleraciones, los efectos posibles a ocurrir en la zona de estudio. Además, relaciona la magnitud de los sismos, la posición fuente-lugar y la aceleración. [11]

Estas leyes de atenuación dependen de 2 componentes principales, lo cuales son de la distancia y la magnitud de dicho evento. Las relaciones de atenuación del movimiento del suelo se realizan usando una regresión de un conjunto de datos sísmicos de la zona, debido a esto las leyes de atenuación son cambiantes a través del tiempo, ya que a más datos sísmicos mayor será la precisión de dicha ley.

A través del tiempo se han propuesto diversas leyes de atenuación como, por ejemplo: Young en 1997, Casaverde y Vargas en 1980, Atkinson y Boore en 2003, Scherbaum en 2009, Zhao en el 2016, etc.

Para poder comprender una fórmula de atenuación de se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Expresar en función logarítmica un parámetro del movimiento del suelo (desplazamiento, aceleración o velocidad), para esta ocasión la representaremos por la letra B.
- b) Una magnitud sísmica está referida como el logaritmo del máximo valor de aceleración de un suelo, dicho esto el logaritmo de B debe ser estrechamente proporcional a una magnitud M.
- c) La forma en que se dispersan las ondas sísmicas de dicho evento generará una disminución de las amplitudes de las ondas superficiales y de las ondas de cuerpo en relación con una distancia R.
- d) El área donde se produce a falla puede aumentar si la magnitud también aumenta, lo cual indicaría que algún tipo de onda podría llegar des una distancia mayo a R.
- e) Las ondas sísmicas pueden ser amortiguadas por material por el cual se propaga, produciendo así que las amplitudes de las ondas se reduzcan de forma exponencial respecto a R.
- f) Por último, debemos tener en que el movimiento del suelo también depende de los rasgos propios del lugar donde se origina el evento (ángulo de buzamiento, roca dura o suelo).

$$\ln(B) = C1 + C2 * M + C3 * M^{C4} + C5 * \ln(R + C6 * e^{C7 * M}) + C8 * R + f(\text{rasgos de origen})$$

Las leyes de atenuación utilizadas en nuestro país utilizadas para realiza un análisis probabilístico son las de Young dada en 1997 para sismos interplaca y la de Sadigh también dada en 1997 para sismos corticales. [18]

Perú en razón que proporcionan resultados razonables desde el punto de vista sismotectónica; sin embargo, se recomiendan futuras revisiones que consideren la utilización de otras leyes de atenuación. [11]

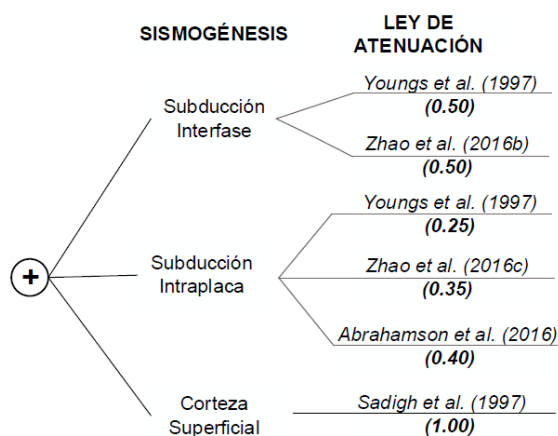


Figura 9: Esquema del árbol lógico usado en la evaluación del peligro sísmico para suelos. [19]

II.2.7 Ondas Sísmicas

Durante un evento sísmico se generan dos tipos de ondas, las cuales son las ondas de cuerpo y las ondas superficiales. Las ondas de cuerpo están relacionas con la actividad sísmica local, las cuales son las ondas S y las ondas P; mientras que las ondas sísmicas superficiales son aquellas que se propagan en la superficie las cuales también son dos, las ondas Love y las Ondas Rayleigh.

II.2.7.1 Ondas P

Su nombre proviene por ser conocidas como las onda principales (compresivas), e de ahí el nombre de ondas P, son las primeras en llegar a la superficie y son las veloces de todas las ondas.

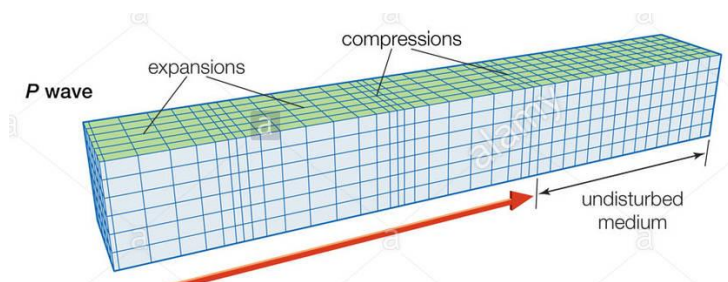


Figura 10: Ondas P. [20]

II.2.7.2 Ondas S

Son las también llamadas ondas secundarias (corte), estas ondas poseen mayor amplitud que las ondas P, además estas ondas llegan justamente después de estas. Por ser ondas de corte estas ondas no se propagan en medios líquidos, por tal motivo esas ondas no pueden ser detectadas por todos los sismógrafos del mundo, ya que se piden estas ondas en el núcleo líquido de la tierra.

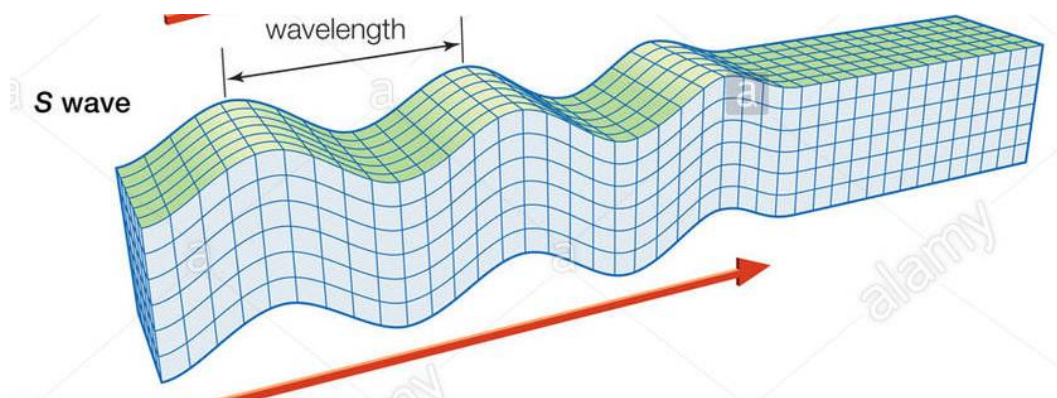


Figura 11: Ondas S. [20]

II.2.7.3 Ondas Love

Mueven el suelo horizontalmente en dirección perpendicular a la de su propagación. Son las causantes de los daños en edificaciones.

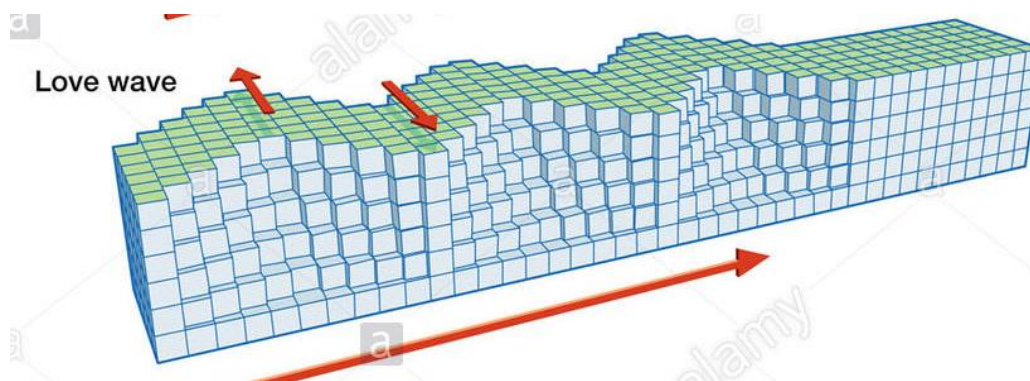


Figura 12: Ondas Love. [20]

II.2.7.4 Ondas Rayleigh.

Mueven las partículas en un plano vertical, haciéndolas describirse en elipses. Estas ondas son las de menor velocidad de propagación.

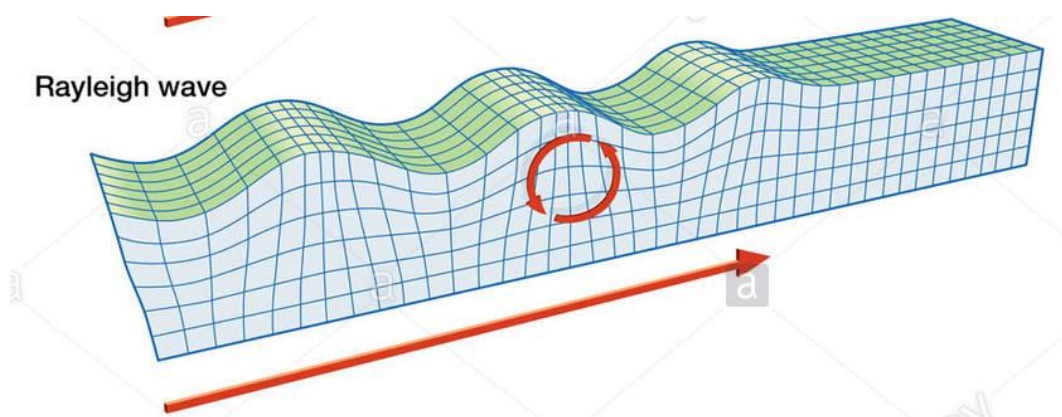


Figura 13: Ondas Rayleigh. [20]

Tanto las ondas de cuerpo (P y S), así como las de superficie (Love y Rayleigh) se puede observar en un sismógrafo como se observa en la siguiente imagen.

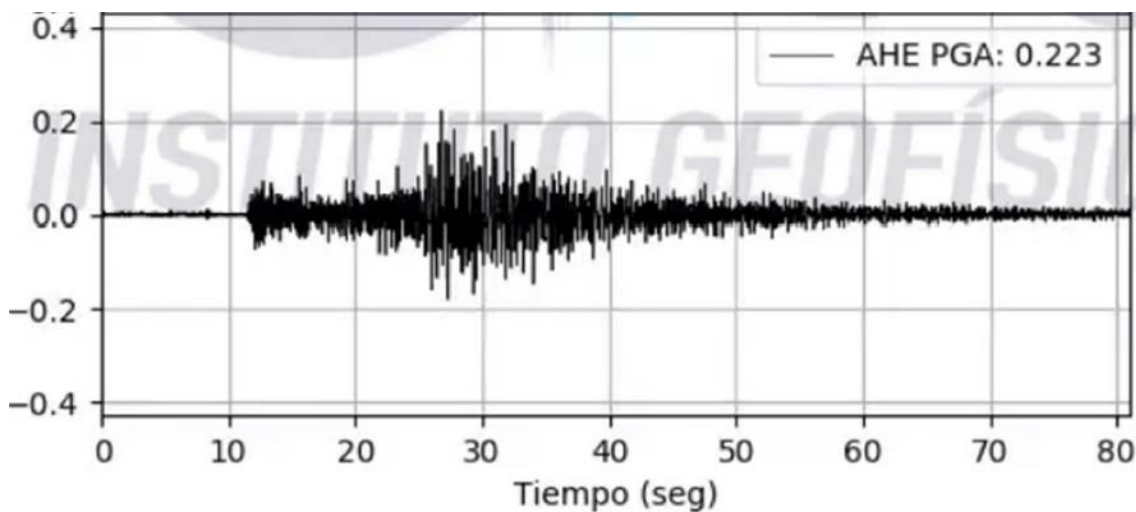


Figura 14: Registro de aceleración para el sismo del 20/10/2019. [21]

II.2.8 Notación Espacial de los Sismos

II.2.7.1 Hipocentro

Punto donde se inicia la ruptura. [22]

II.2.7.2 Epicentro

Proyección perpendicular del punto hipocentral en la superficie del suelo. [22]

II.2.8.3 Profundidad Hipocentral

Distancia entre el epicentro y el hipocentro. [22]

II.2.8.4 Distancia Epicentral

Distancia entre el epicentro y un observador. [22]

II.2.8.5 Distancia Hipocentral

Distancia entre el hipocentro y el observador. [22]

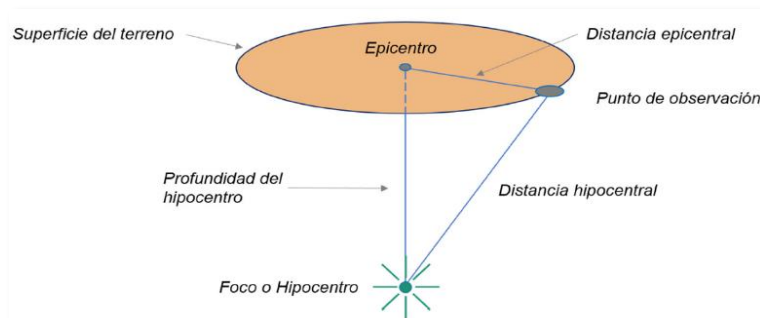


Figura 15: Notación Espacial de los Sismos. [22]

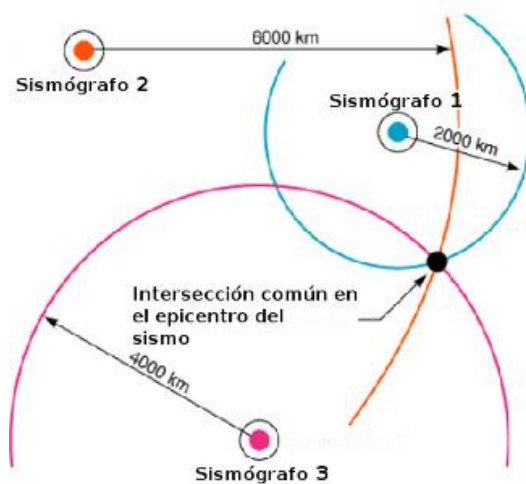


Figura 16: Localización de un sismo. [23]

II.2.9 Magnitud

Es una medida que tiene relación con la cantidad de energía liberada en forma de ondas, a la cual se le aplica una corrección por distancia epicentral y profundidad focal. En oposición a la intensidad, un sismo posee solamente una medida de magnitud y varias observaciones de intensidad.

II.2.9.1 Magnitud Local (M_L)

La magnitud para medir sismos del Sur de California poco profundos y con distancias epicentrales menores a 600 km. La escala de Richter es la escala más conocida. Sin embargo, no siempre es la más apropiada para medir sismos en otras partes del mundo. [17]

$$M_L = \log(A_{max}) - \log A_0 * D$$

A máx = máxima amplitud del sismo

A0 = valor predeterminado

D = corrección de distancia

II.2.9.2 Magnitud de ondas superficiales (M_s)

Debido a que la magnitud Richter no distingue los diferentes tipos de ondas sísmicas, su uso es muchas veces poco adecuado. Una escala de magnitud basada en la amplitud de las ondas Rayleigh es la magnitud de ondas superficiales.

$$M_s = \log(A) + 1.66 \log(D) + 3.3$$

A = Amplitud de desplazamiento del suelo en micrones

D = Distancia epicentral de sismógrafo en grados sexagesimales

II.2.9.2 Magnitud de ondas de cuerpo (M_b)

las ondas superficiales pueden ser pequeñas como para permitir una evaluación confiable, por lo que esta magnitud se basa en la amplitud de los primeros ciclos de las ondas P. [17]

$$M_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 0.01D + 5.9$$

A = Amplitud de onda en micrómetros de la onda P

T = Periodo de la onda P

D = Distancia epicentral de sismógrafo en grados sexagesimales

II.2.9.3 Magnitud momento (M_w)

Las escalas de magnitudes anteriores son escalas empíricas basadas en medidas instrumentales de las características del movimiento del suelo.

La magnitud M_w está basada en el momento sísmico, que es una medida directa de los factores que producen la ruptura a lo largo de una falla. [17]

$$M_w = 2/3 \log M_o - 10.7$$

M_o = momento sísmico dado en dinas- cm

$$M_o = \mu A \bar{D}$$

μ = resistencia a la ruptura a lo largo de la falla

A = Área de ruptura

\bar{D} = desplazamiento producido.

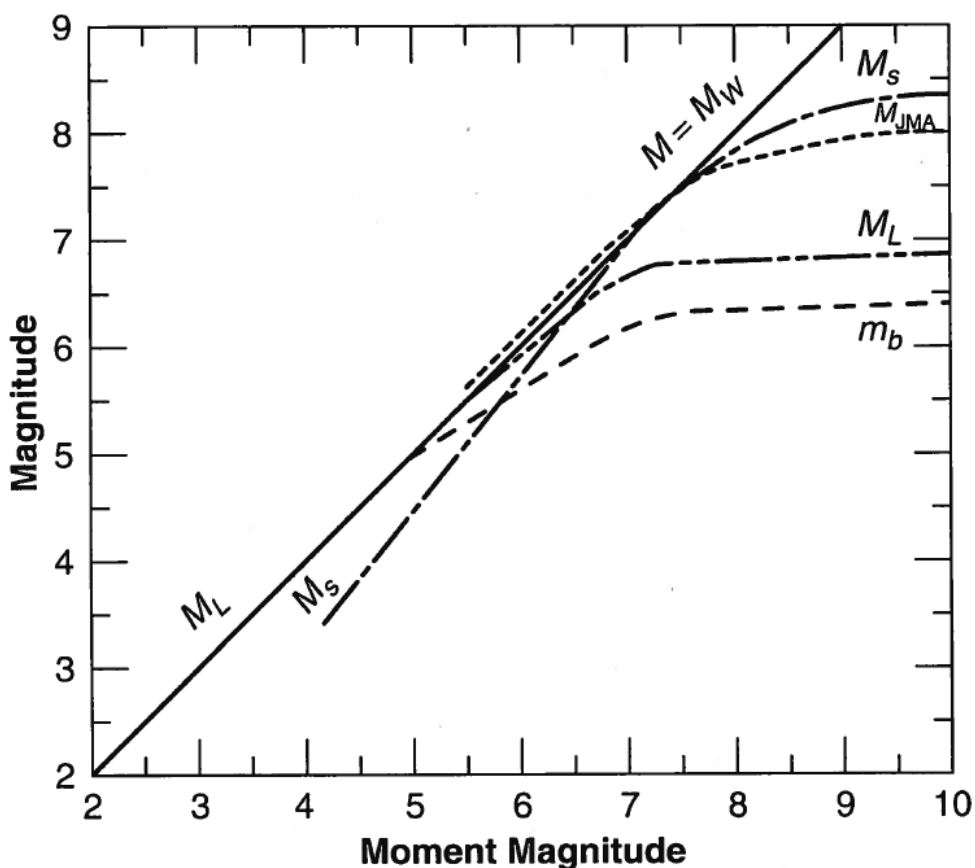


Figura 17: Relación entre M_w y las escalas M_s , M_{jma} , M_L y m_b . [24]

Para poder realizar un correcto estudio de peligro sísmico se deben homogeneizar todos tipos de sismos que se han encontrado dentro del lapso de tiempo analizado, debido a que las leyes de actuación utilizan magnitud momento se debe transformar las magnitudes de M_s , m_b , M_L o cualquier otro tipo de magnitud a magnitud M_w (Magnitud Momento).

Para poder realizar esto se utilizará una relación de magnitudes de m_b a M_s y M_s a M_w , las cuales están propuestas en el estudio de peligro sísmico de Cerro Tamboraque-Perú elaborado por Hernando Tavera.

$$M_s = 1.644m_b - 3.753 \quad (m_b < 5.9)$$

$$M_s = 2.763m_b - 10.301 \quad (m_b \geq 5.9)$$

$$M_w = 0.67M_s + 2.07 \quad (3.0 \leq M_s \leq 6.1)$$

$$M_w = 0.99M_s + 0.08 \quad (6.2 \leq M_s \leq 8.2)$$

Por último, la relación dada por Cahuari Begazo en el 2008

$$M_w = 0.9879 * M_Ld + 0.3316$$

Dichas correlaciones fueron dadas para una zona de subducción, netamente centradas en la zona de Subducción Peruana.

II.2.10 La Tierra

Nuestro planeta, la Tierra desde que existió como protoplaneta, tiene la edad astronómica de aproximadamente 4,500 millones de años. Desde entonces, la distribución de sus continentes y océanos no ha sido como lo conocemos actualmente, debido a al movimiento de las placas que conforman la tierra; Dichos movimientos pueden clasificar en tres grandes grupos.

II.2.10.1 Tipos de Límites en las Placas

III) Límite divergente

Caracterizados por el desplazamiento de las placas en direcciones opuestas. Están localizados en los fondos oceánicos y en la superficie de los continentes que forman las dorsales oceánicas como la cordillera Centro – Atlántica y fosas tectónicas. [25]

b) Límite convergente

La destrucción de la placa ocurre en los márgenes de subducción, en la cual dos placas se colisionan y una se introduce por debajo de la otra hasta la astenosfera donde vuelve a fundirse por las altas temperaturas. [25]

Toda la costa occidental de América del Sur corresponde a un borde de subducción, pues la placa de Nazca se introduce en la placa Sudamericana, dando lugar a una de las zonas con más sismicidad en el mundo.

c) Límite de transformación

Caracterizados cuando dos placas se deslizan paralelas al borde y en sentido contrario sin destruir el fondo oceánico. Tenemos por ejemplo a la falla de San Andrés en California. [25]

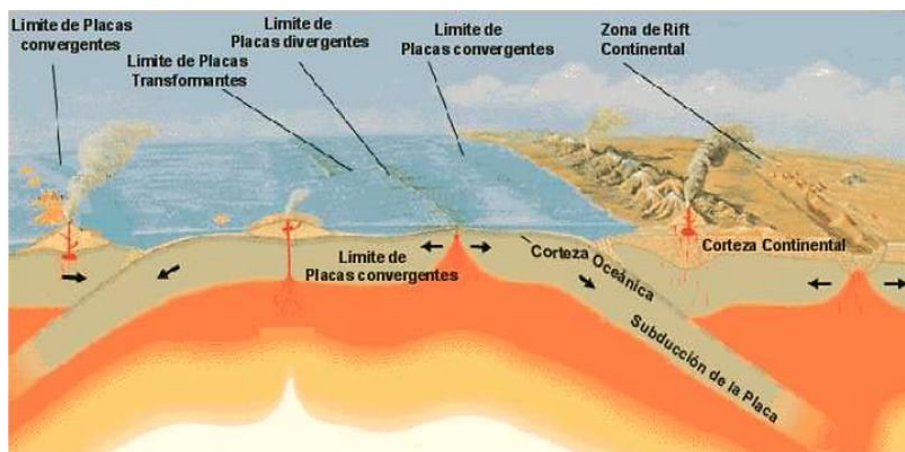


Figura 18: Tipos de Límites entre placas. [17]

II.2.10.2 Distribución Espacial De Los Sismos En El Perú

La subducción se desarrolla a lo largo de la interacción de la placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Dichos sismos se pueden agrupar tres, de acuerdo con su profundidad.

a) Eventos de Interfase

Ubicadas en el límite occidental de la subducción del Perú (límite de contacto superficial de la placa y el litoral costero).

Ubicada entre los 40 y 50 km de profundidad aquí se da el acoplamiento de la placa de Nazca y Sudamericana, la mayoría de los sismos (mundialmente hablando) ocurren en esta zona con magnitudes M_w de 9,0. [17]

b) Eventos de Interplaca Intermediaria

Aquella sismicidad que se da entre los 60 km y 350 km de profundidad, donde la subducción se da de manera irregular.

En esta zona se dan sismos con magnitudes $M_w = 8,0$ y ocurren en la zona descendente de la placa de Nazca. [17]

c) Eventos de Interplaca Profunda

Sismicidad dada en los bordes de la placa en sumersión, da contacto con el material del manto donde la placa se fractura y se desmorona liberando la energía sísmica.

Esta caracterizado por eventos moderados de magnitudes M_w de 6,0 a 7,5 y un ángulo de Buzamiento muy pequeño. [17]

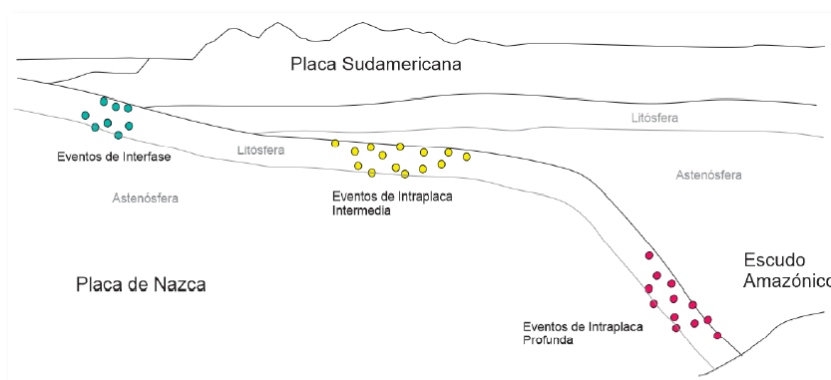


Figura 19: Esquema de la distribución de eventos sísmicos asociados a procesos de subducción. [26]

II.2.10.3 Estructuras Tectónicas De La Placa De Nazca

En nuestra costa peruana existen diferentes estructuras tectónicas, de la cuales algunas tienen gran inferencia en la distribución espacial de los sismos.

a) Dorsales de Sarmiento y Alvarado

Ubicadas frente al departamento de Piura, con una longitud aproximada de 400 km.

b) Fractura de Mendaña

Ubicada al extremo oeste con una longitud aproximada de 1 100 km, una altura promedio de 1 000 m y un ancho aproximado de 80 km.

c) Dorsal de Nazca

Una antigua cordillera oceánica ubicada al frente del departamento de Ica, con un ancho de 220 km y una profundidad de 2 000 m. [26]

d) Fractura de Nazca

Ubicada al frente del departamento de Arequipa, teniendo una estructura de valle deprimida de aproximadamente de 1.2 km de profundidad. [26]

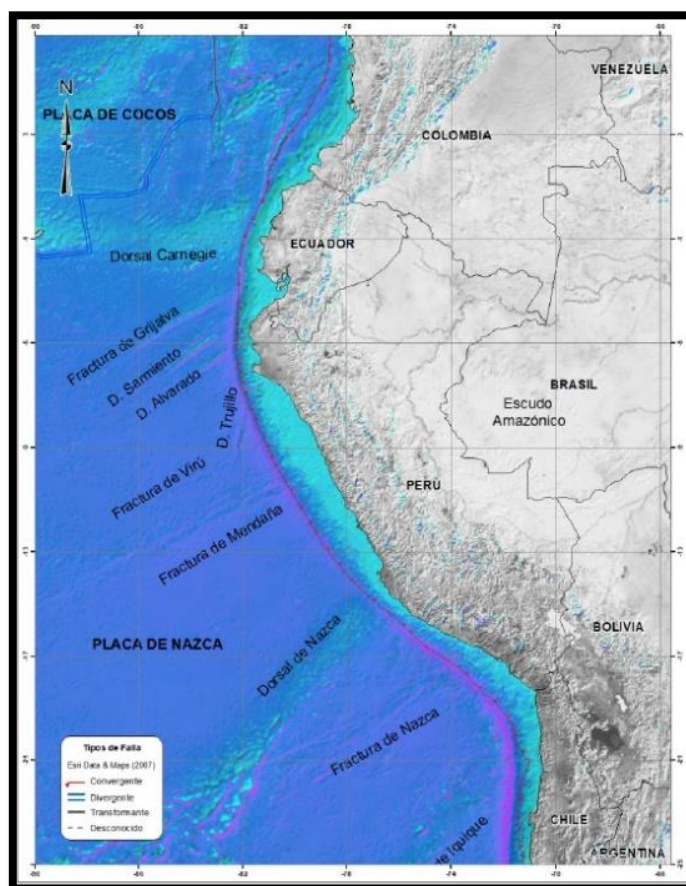


Figura 20: Estructuras tectónicas de la placa de Nazca. [26]

II.2.10.4 Programa R-Crisis

R-CRISIS ofrece una solución completa para realizar análisis de riesgo sísmico probabilístico de última generación. La acumulación de más de 30 años de desarrollos y mejoras realizados por expertos de renombre ha llevado a una gran cantidad de opciones que hacen que los análisis de R-CRISIS sean útiles, flexibles y atractivos para muchas aplicaciones. [27]

- Una interfaz gráfica de usuario (GUI) disponible para todos los pasos del análisis, desde el desarrollo del modelo y la entrada de datos hasta la interpretación y visualización de resultados.
- Varias fuentes sísmicas modelos geométricos: Punto, cuadrulado, línea de falla, losa o áreas. También se pueden definir las características de los tamaños y formas de las rupturas.
- Diferentes modelos de sismicidad de recurrencia de ocurrencia y magnitud (Poissonianos y no Poissonianos).
- Cualquier modelo de predicción de movimiento de tierra (GMPE) se puede usar en R-CRISIS permitiendo la combinación entre ellos (modelos híbridos).
- Posibilidad de tener en cuenta los efectos del sitio en la PSHA utilizando diferentes enfoques conocidos.
- Opción de incluir un filtro de velocidad absoluta acumulativa (CAV) para considerar solo los movimientos del terreno con la capacidad de producir daños a las estructuras en las estimaciones de peligro.

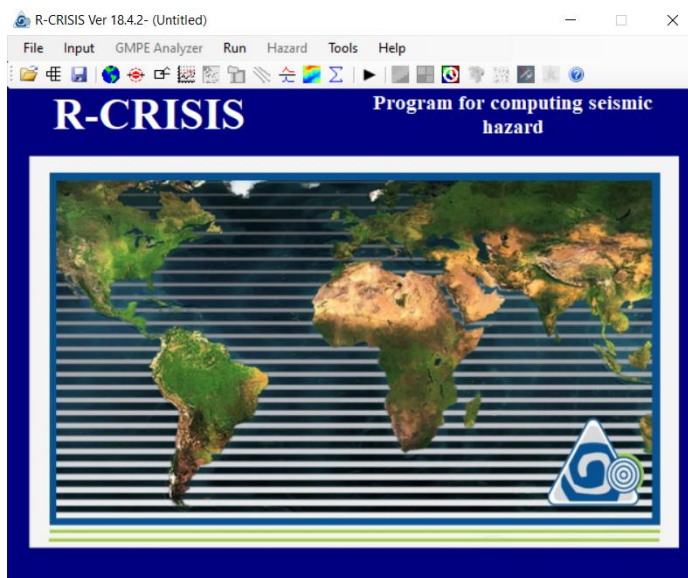


Figura 21: Programa R-Crisis. [27]

La primera evaluación global y totalmente probabilística de riesgos y riesgos sísmicos para 216 países se desarrolló en el marco del Informe de Evaluación Global de UNISDR sobre Reducción del Riesgo de Desastres. CRISIS en sus versiones de 2012 y 2014 fue la herramienta utilizada para realizar el PSHA y obtener un conjunto estocástico global con más de 1 millón de eventos.

El proyecto Risk-UE comenzó en 1999 y finalizó en 2004 con el apoyo de la Comisión Europea. Este proyecto evaluó escenarios de terremotos a nivel urbano utilizando CRISIS99, lo que resultó en Planes de gestión y Planes de acción para reducir efectivamente el riesgo en las ciudades europeas.

Los mapas oficiales de riesgo sísmico para Colombia y España se actualizaron en 2009 y 2012, respectivamente, utilizando la versión 2007 de CRISIS. Los resultados son de uso obligatorio en el diseño y construcción en estos países.

II.2.10.5 Zmap

El programa Zmap es un conjunto de herramientas las cuales se encuentra impulsadas por una interfaz gráfica de usuario, la cual ha sido diseñada para ayudar a los sismólogos a determinar parámetros sísmicos de un catálogo determinado de datos, se considera una principal herramienta en la investigación y evaluación de catálogos, permitiendo así conjeturar hipótesis determinadas.

El programa fue lanzado en 1994 y su última versión es la 6.0 la cual se lanzó en el 2001, dicho programa es de origen suizo y se encuentra a disposición de cualquiera que desee obtenerlo a través de su página web. [28]

El Ingeniero Hernando Tavera usó este programa (Zmap 6.0) para poder hallar datos estadísticos y gráficas para los datos de magnitud, profundidad y tiempo de los eventos sísmicos ocurridos en nuestro país. [28]

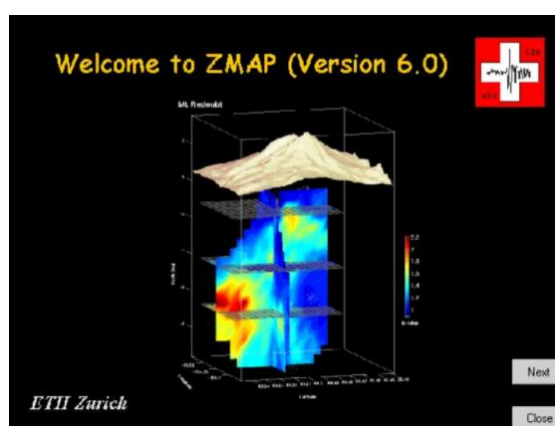


Figura 22: Programa Zmap 6.0.

III. Materiales y métodos

III.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de estudio es Aplicada-Probabilístico, debido a que se usarán fórmulas de probabilidad ya establecidas para el análisis de PSHA.

La investigación además será cuantitativa como lo menciona Hernández Sampieri: El cuantitativo se utiliza para consolidar las creencias (formuladas de manera lógica en una teoría o un esquema teórico) y establecer con exactitud patrones de comportamiento de una población. [29] Asimilando este concepto a nuestro tema, se usarán fórmulas ya planteadas, para poder así establecer un estudio más preciso y conciso.

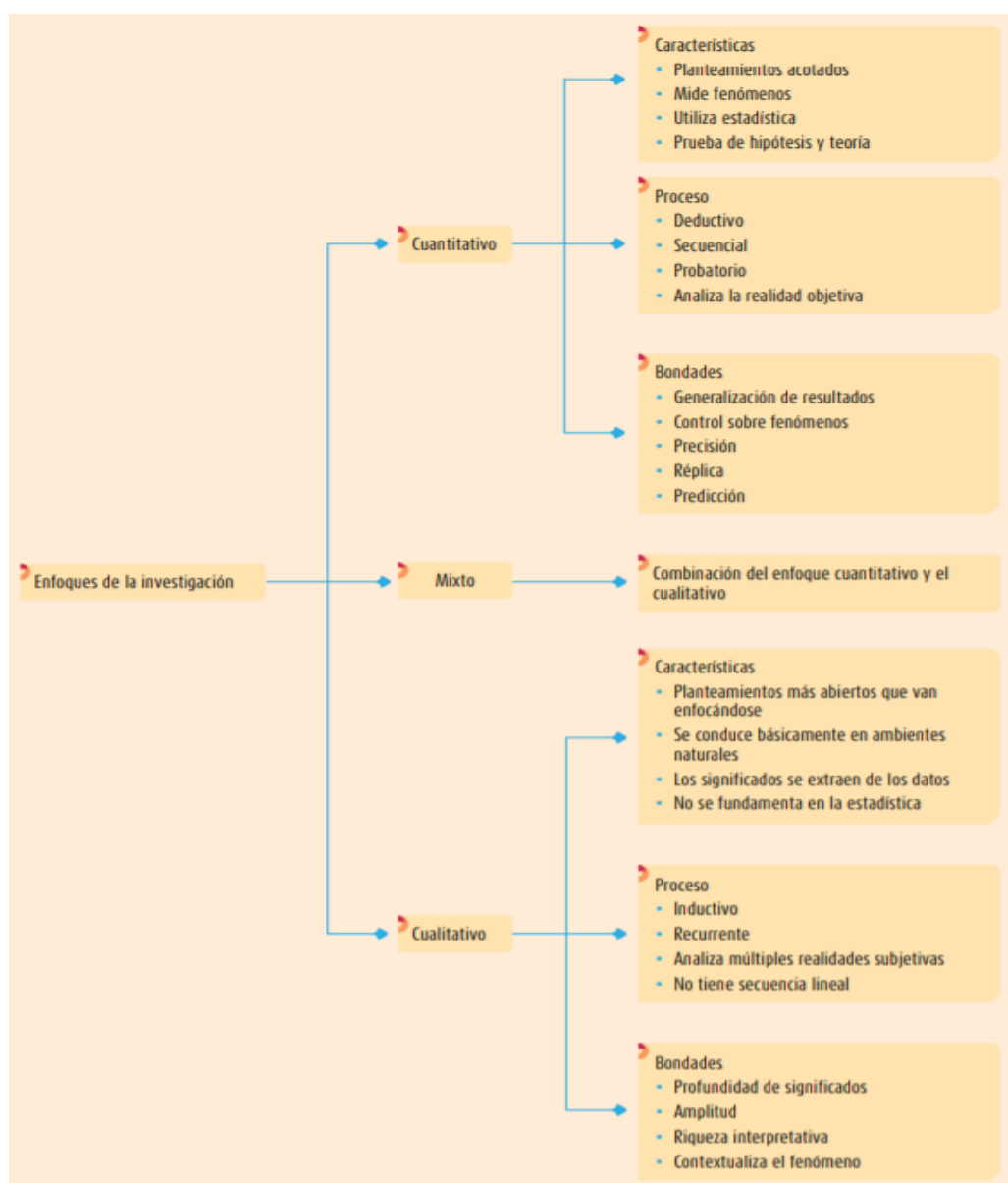


Figura 23: Enfoques de la investigación. [29]

El Alcance será Correlacional, ya que su finalidad es conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto específico. [29] Asociando este concepto a nuestro estudio podemos observar cómo los movimientos sísmicos ocurridos en una zona pueden determinar la probabilidad de ocurrencia de un efecto similar o mayor a este.

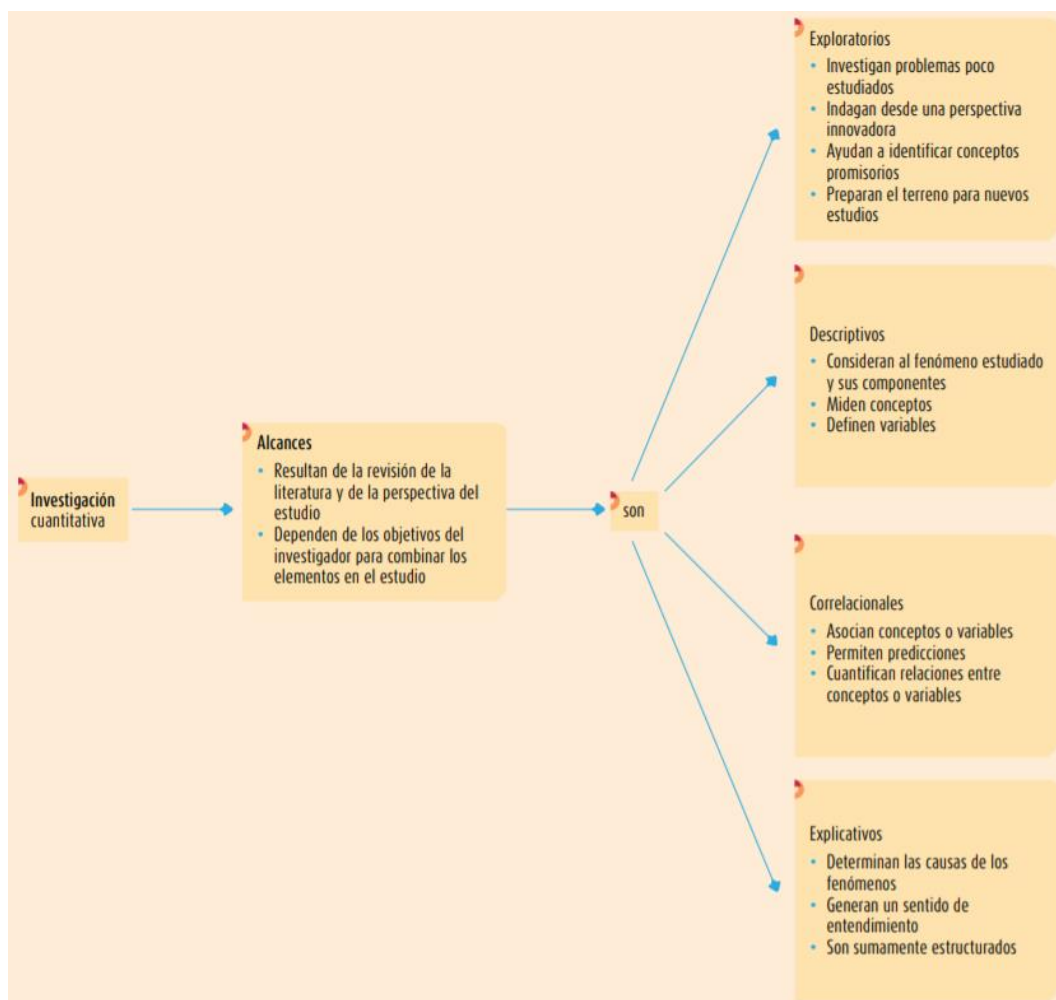


Figura 24: Alcances de la Investigación Cuantitativa. [29]

III.2 Diseño de investigación

El diseño será experimental-cuasi experimental, debido a que los experimentos estudios de intervención, porque un investigador genera una situación para tratar de explicar cómo afecta a quienes participan en ella en comparación con quienes no lo hacen. [29] En efecto el resultado del estudio a realizar tratará de especificar como un PSHA afecta al departamento de Lambayeque a nivel muy específico versus a otros departamentos que quizás no hayan realizado este estudio.

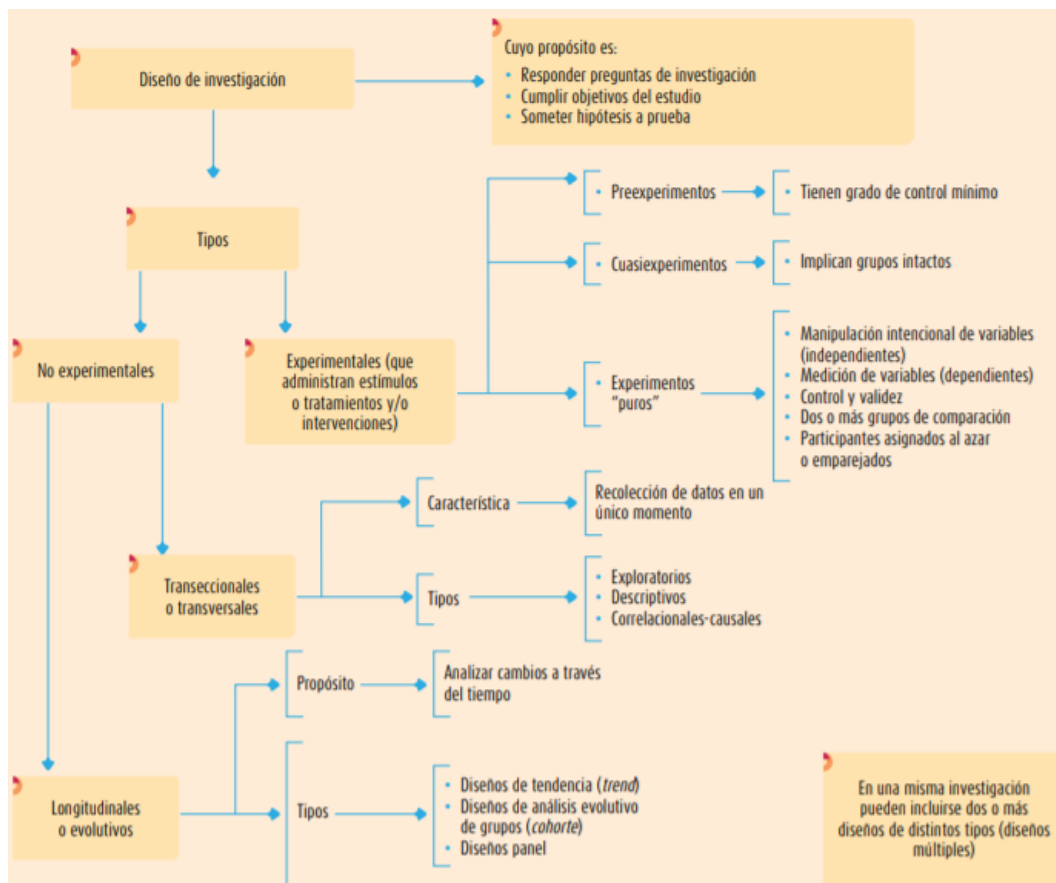


Figura 25: Diseños de la Investigación. [29]

III.3 Población, muestra, muestreo

La población de este estudio, son todos los movimientos sísmicos ocasionados netamente al movimiento de Subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la Sudamericana en el Perú. Importante es resaltar esto debido a que existen diversas causas independientes a la mencionada por las cuales se genera un movimiento sísmico como, por ejemplo; colapso de grandes cuevas subterráneas, bombas atómicas, etc.

Para poder entender la muestra debemos tener en claro su concepto, el cual es el acto de seleccionar un subconjunto de un conjunto mayor, universo o población de interés para recolectar datos a fin de responder a un planteamiento de un problema de investigación. [29]

La muestra de esta población será todos los movimientos sísmicos dados en el departamento de Lambayeque con magnitud $M_w \geq 4,5$.

Bajo la fórmula de probabilidad de muestras infinitas se determinará toda la muestra representativa de este estudio.

$$n = \frac{z^2 \times p \times q}{e^2}$$

Z = nivel de confianza

p = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso

e = error permisible máximo de la proporción

En este estudio se plantea un nivel de confianza del 95% ($z=1.96$), una probabilidad de éxito del 90%, una probabilidad de fracaso del 10% y un error máximo permisible del 5%.

$$n = \frac{1.96^2 \times 0.9 \times 0.1}{0.05^2} = 138 \text{ años}$$

Del resultado de esta fórmula se obtuvo que se necesita una muestra de 138 años donde se registraron sismos en el Departamento de Lambayeque, por lo que los datos sísmicos serán analizados desde el año 1881, hasta la fecha de corte que será el mes de julio del 2020.

El muestreo son todos los movimientos sísmicos instrumentales del departamento de Lambayeque, debido a que los movimientos sísmicos instrumentales son todos aquellos movimientos sísmicos que han sido captados ya sea por la red sísmica nacional o la red sísmica internacional.

Se especifica esto debido a que existen también movimientos sísmicos históricos, este tipo de movimientos se catalogan como aquellos movimientos que han ocurrido en la zona de los cuales se tiene recuerdo en crónicas o documentos muy antiguos donde no se data la magnitud de dicho evento.

III.4 Criterios de selección

Los datos serian, todos los movimientos sísmicos instrumentales de subducción de la placa de Nazca, ocasionados en el departamento de Lambayeque con una magnitud mayor o igual a 4.5 magnitud de Kanamori, desde el año 1882 hasta el 2020.

III.5 Operacionalización de las Variables

Tabla 4: Operacionalización de las Variables.

Variable	Tipo	Operacionalización	Unidad
Eventos sísmicos de la zona.	Independiente	Convertir las diferentes magnitudes de los eventos sísmicos y homogenizarlas a una sola magnitud.	Magnitud de Kanamori o Magnitud momento (Mw)
Recurrencia de los eventos sísmicos anuales.	Dependiente	Hallar la recurrencia de los sismos dentro de cada año del catálogo.	Magnitud/año
Ley de Atenuación Young y Sadigh.	Dependiente	Los datos del catálogo del muestreo podrán tener un comportamiento aleatorio.	Gals m/s ²
Curva y mapa del peligro sísmico.	Dependiente	Mostrar de manera gráfica los resultados obtenidos en este proceso.	Gals m/s ²

III.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La técnica de recolección de datos serán pruebas estandarizadas, recolección de información actual e indicadores (análisis de datos secundarios de registros públicos y documentación) [29]. Los serán todos los catálogos sísmicos tanto a nivel intencional como nacional donde se registre un sismo en la zona ya antes mencionada, alguno de las instituciones de las cuales se sacará la información serán: Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), El catálogo de terremotos para América del Sur, El United States Geological Survey (USGS) y Catalogue of focal mechanisms of peruvian earthquakes.

III.7 Procedimientos

Se ingresarán a la páginas del Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), National Earthquake Information Center (NEIC); donde se colocará la área determinada, junto con la fecha de inicio y fin; para que así dichas paginas nos den en archivos: .txt, .csv, .kmz, etc; los valores de los movimientos sismos que necesitamos obtener.

III.8 Plan de procesamiento y análisis de datos

El análisis de datos se realiza usando el método del Probabilistic Seismic Hazard Analysis, para lo cual se utilizará programa Excel, el programa Zmap para hallar los valores de a y b de la recurrencia de Gutenberg-Richter, Google Earth para plasmar las fuentes sismogénicas y los sismos en el espacio; y el programa R-Crisis con la finalidad de obtener, la curva de peligro sísmico, así como el mapa de dicho peligro para el departamento de Lambayeque.

III.9 Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema General:</p> <p>Falta un análisis de peligro sísmico usando el Probabilistic Seismic Hazard Analysis en el Departamento de Lambayeque.</p>	<p>Objetivo General:</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar el Peligro Sísmico del Departamento de Lambayeque utilizando el método de PSHA. <p>Objetivos Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Recopilar un catálogo sísmico del departamento de Lambayeque. Homogenizar los datos obtenidos del catálogo a la magnitud Mw. Determinar las fuentes sísmicas del departamento de Lambayeque. Encontrar la recurrencia de magnitudes a través del tiempo de la zona. Aplicar las leyes de atenuación de Young y Sadigh. Hallar una curva de peligro sísmico del departamento de Lambayeque. Hallar un mapa de peligro sísmico de la zona analizada. 	<p>Hipótesis General:</p> <ul style="list-style-type: none"> La aplicación de Probabilistic Seismic Hazard Analysis en el Departamento de Lambayeque permitirá un mejor conocimiento de la zona. 	<p>Variables Independientes:</p> <p>Eventos sísmicos de la zona.</p> <p>Variable Dependiente:</p> <p>Recurrencia de los eventos sísmicos anuales.</p> <p>Ley de Atenuación (Young y Sadigh).</p> <p>Curva y mapa del peligro sísmico.</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <ul style="list-style-type: none"> Probabilístico. <p>Enfoque:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuantitativa <p>Alcance:</p> <ul style="list-style-type: none"> Correlacional <p>Diseño:</p> <ul style="list-style-type: none"> Experimental- Cuasi experimental <p>Población:</p> <ul style="list-style-type: none"> Los movimientos sísmicos de Subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la Sudamericana en el Perú. <p>Muestra:</p> <ul style="list-style-type: none"> los movimientos sísmicos dados en el departamento de Lambayeque con magnitud $M_w \geq 4,5$. Muestra: datos sísmicos desde 1881 hasta el mes de julio del 2020.

III.9 Consideraciones éticas

La diferencia de esta tesis es la amplitud de datos que se van a obtener para poder realizar el estudio de PSHA, así como el lugar de análisis que será netamente el departamento de Lambayeque, el cual actualmente no tiene un análisis de PSHA propio, dicho estudio permitirá tener un mayor conocimiento de las probabilidades de excedencia, así como las aceleraciones del suelo; cabe resaltar que se utilizará uno de los softwares más actuales para este análisis llamado R-Crisis.

IV. Resultados y discusiones

IV.1 Resultados

IV.1.1 Datos Generales de la Sismicidad de Lambayeque

El catálogo de sismos recopilado para el departamento de Lambayeque presentado en el anexo 01, fue utilizado para poder así hallar las gráficas presentadas a continuación:

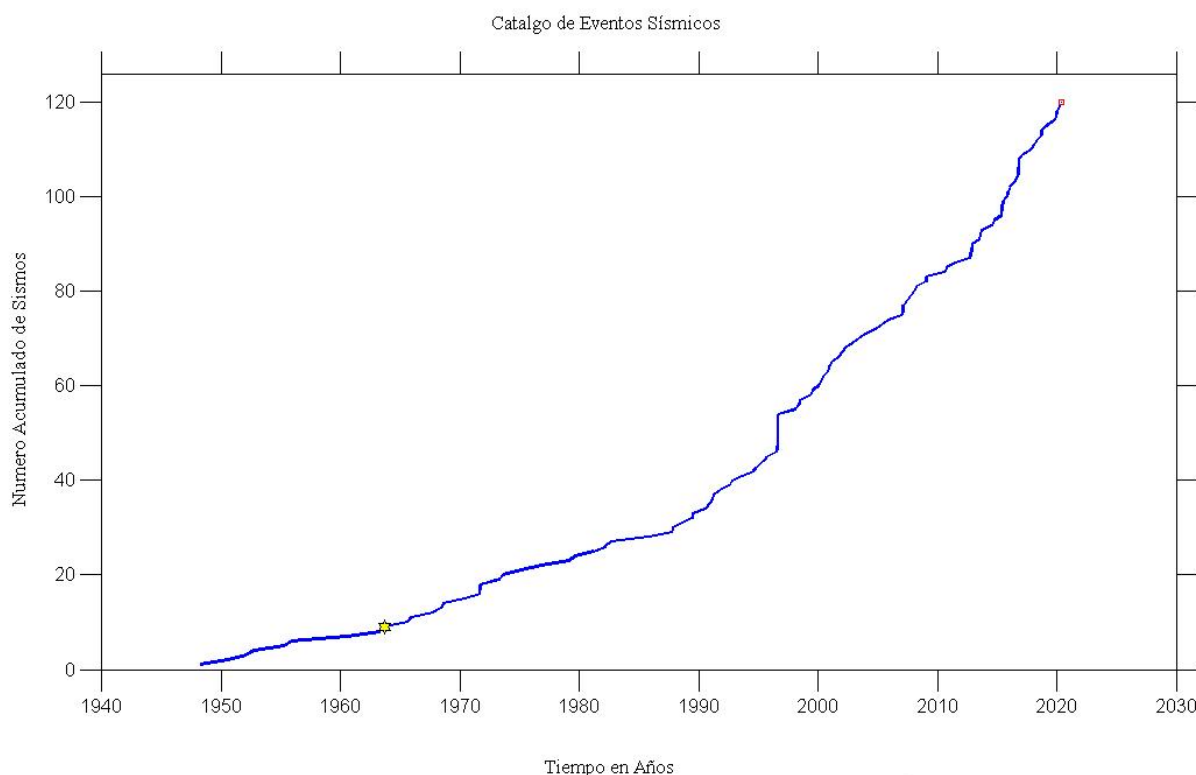


Figura 26: Número acumulado de sismos a través del tiempo en el departamento de Lambayeque.

Los eventos sísmicos dentro del departamento de Lambayeque son constantes través del tiempo como se observa en la imagen 26; se puede observar una pendiente casi uniforme entre los años 1950 y 1990, otro detalle a resaltar es la pendiente entre el año 1996 a 1997, la cual muestra una pendiente muy empinada en ese tramo de años, esto es debido a que presentaron más sismos durante este periodo de años.

Por último, la estrella que se presenta en esta gráfica nos muestra el evento sísmico de mayor magnitud del catálogo sísmico, el cual es de una magnitud de 7.0 Mw.

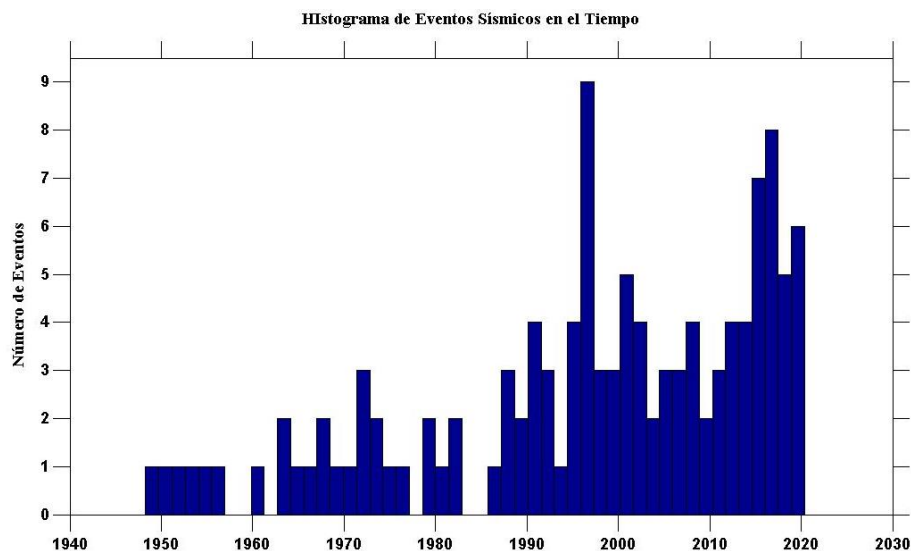


Figura 27: Histograma de eventos sísmicos en el tiempo en el departamento de Lambayeque

El catálogo sísmico nos muestra una mínima cantidad de eventos sucedidos entre 1948 y 1961, esto no significa que no hubo muchos sismos entre ese periodo de años si no que en nuestro país recién se estaba recopilando más información sísmica a partir de 1970 en adelante debido a la incorporación de sismógrafos en el Perú, los sismos sucedidos antes de esta fecha son aquellos sismos que fueron recopilados debido a su gran magnitud por sismógrafos de países aledaños al nuestro que captaron dicho evento. Además, como se mencionó en la gráfica anterior entre los años 1996 a 1997 existieron la mayor cantidad de sismos, con un número totales de 9 eventos sísmicos.

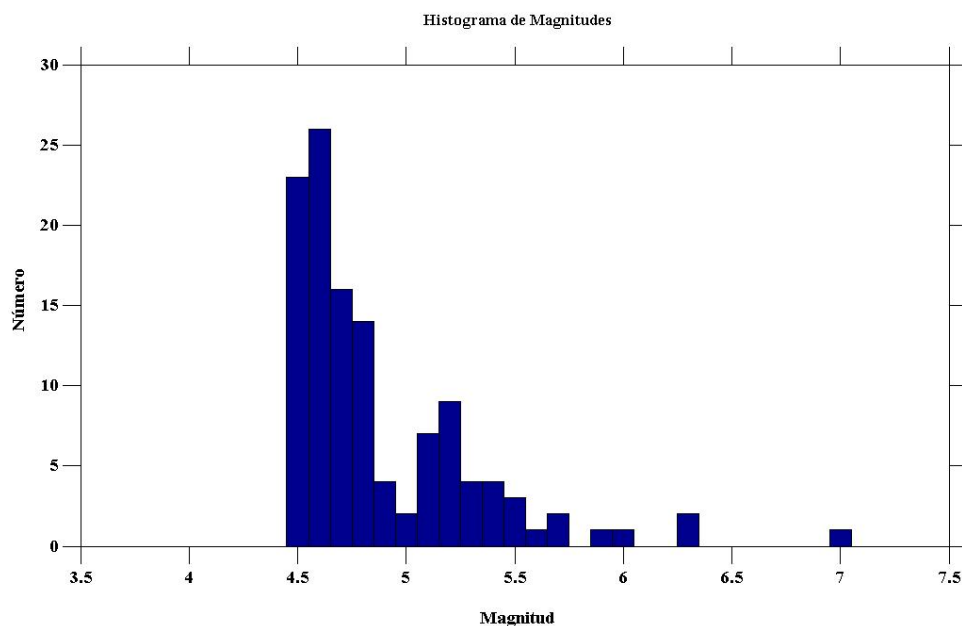


Figura 28: Histograma de magnitudes en el departamento de Lambayeque

La mayor ocurrencia de sismos fue de magnitudes de 4.5 Mw a 4.6 Mw dando valores de 23 y 26 sismos respectivamente, posteriormente otro pico alto se presenta con magnitudes de 5.1 Mw a 5.2 Mw; y por último la menor ocurrencia de sismos se da entre las magnitudes de 6.4 Mw a 7 Mw.

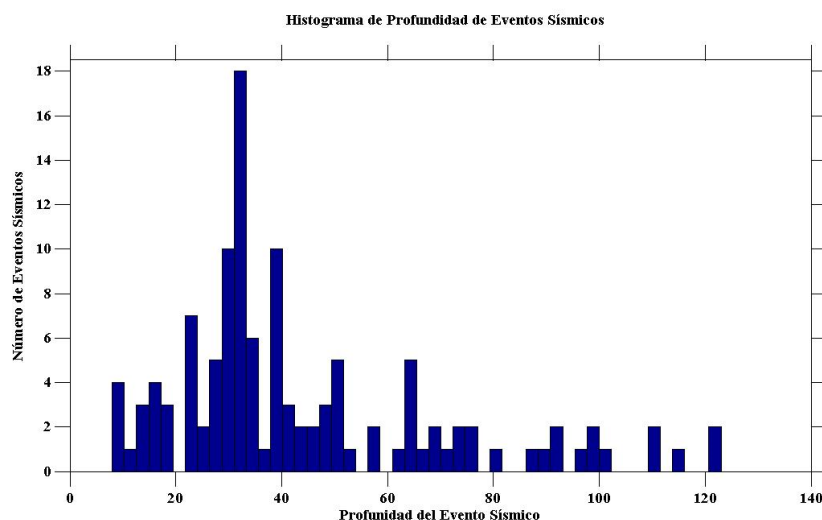


Figura 29: Histograma de profundidades de eventos sísmicos en el departamento de Lambayeque.

Dentro de nuestro departamento la profundidad de eventos sísmicos con más ocurrencia se da hasta los 30 metros de profundidad aproximadamente, posteriormente podemos observar que la cantidad de sismos disminuye; pudiendo dar como conclusión que los eventos interfase son los más ocurrentes.

En la gráfica mostrada a continuación se puede observar cómo se distribuyen estos eventos sísmicos de manera tridimensional en nuestro departamento.

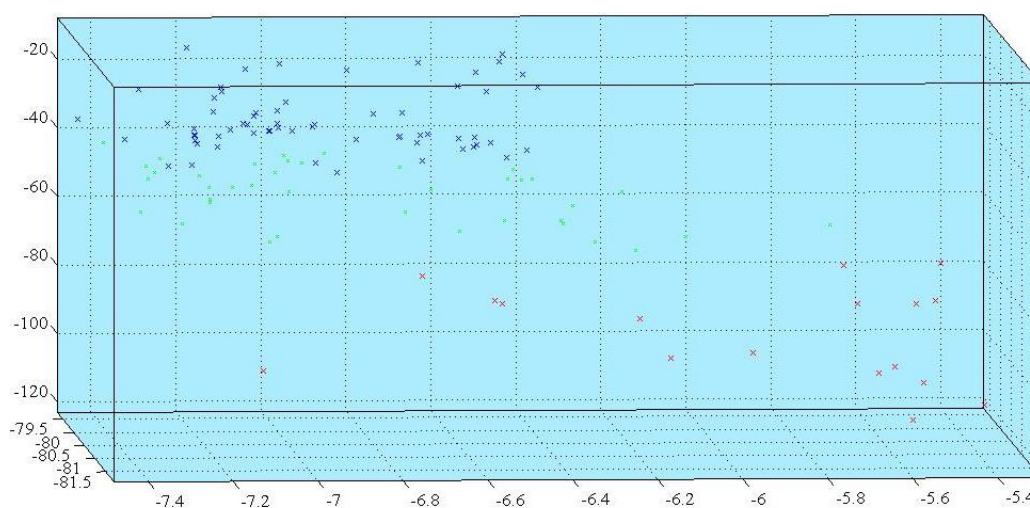


Figura 30: Distribución espacial de los eventos sísmicos en el departamento de Lambayeque

Las fuentes sísmicas delimitadas fueron 2, las cuales se hicieron teniendo en cuenta las fuentes sismogénicas propuestas por Alva y Castillo en 1993, además se agregaron las dos fuentes ya propuestas por Alva y Castillo para poder darle más amplitud de área y obtener mejor resultados en los mapas sísmicos.

Tabla 5: Nuevas Coordenadas de las fuentes F2 y F14 para el estudio sísmico del departamento de Lambayeque.

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (°)	
	Longitud	Latitud
F2	-81.997	-6.484
	-80.306	-5.886
	-79.169	-7.309
	-81.635	-7.78
	-82.635	-6.83
F14	-79.493	-5.123
	-78.752	-5.393
	-78.849	-7.224
	-79.948	-7.964
	-81.293	-6.449

Se puede observar que los polígonos de magenta y negro son aquellas fuentes sísmicas usadas con las coordenadas mostradas anteriormente, mientras que los de rojo y amarillo son los propuestos por Alva y Castillo incluidas en el trabajo.

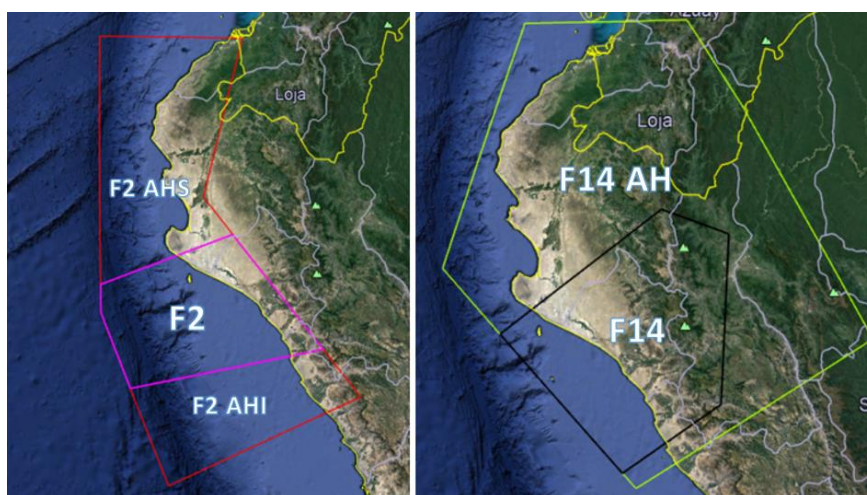


Figura 31: Fuentes sísmicas de Alva y Castillo; y las propuestas en el trabajo.

IV.1.2 Fuente Sísmica F2

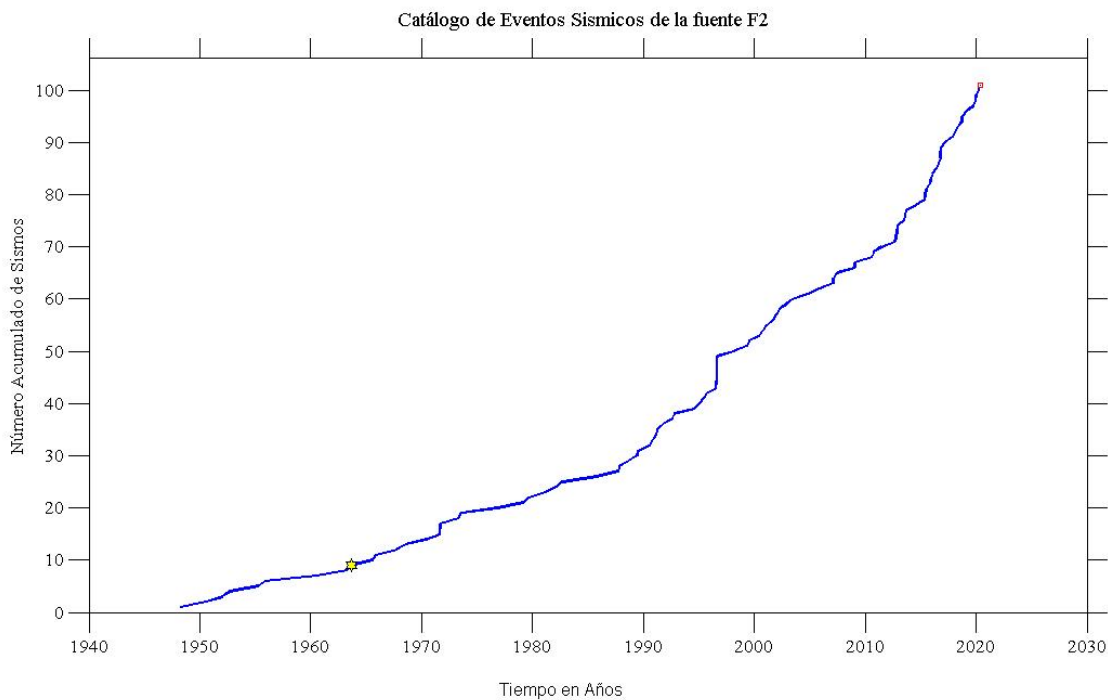


Figura 32: Número acumulado de sismos de la fuente sísmica F2.

Al subdividir el catálogo en las dos fuentes sísmicas, podemos apreciar que la mayoría de los eventos sísmicos ocurren en la fuente F2, si se compara esta gráfica con la gráfica total nos percatamos que poseen un parecido muy similar en la manera en que ascienda dicha línea exponencial.

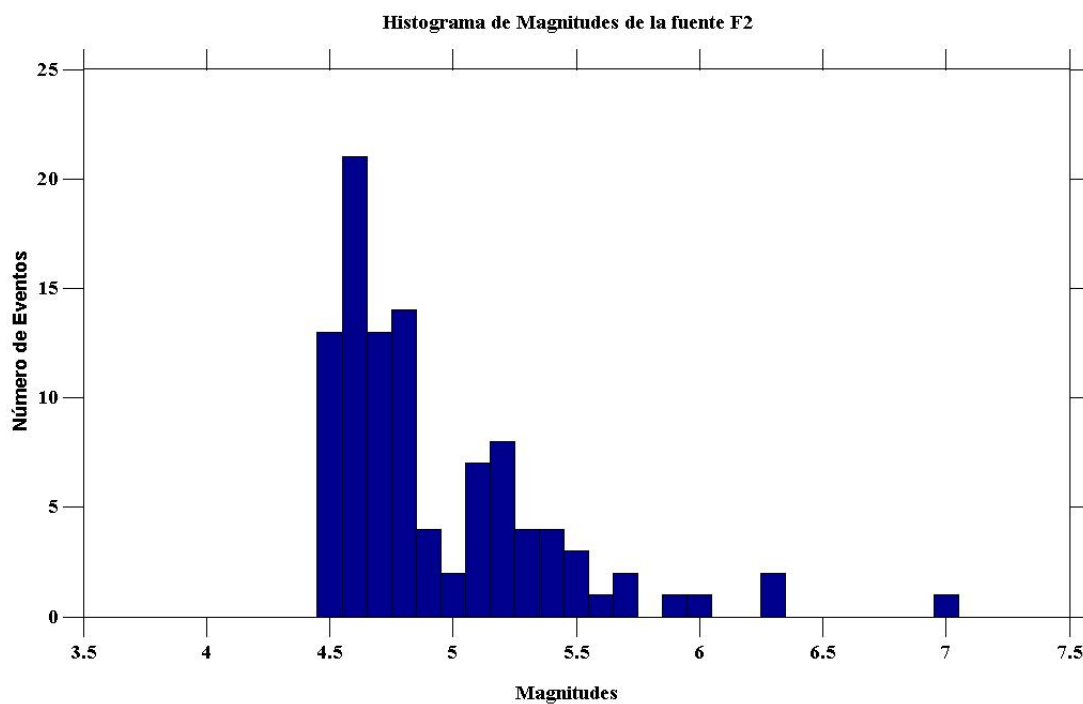


Figura 33: Histograma de magnitudes de la fuente sísmica F2.

La gráfica de magnitudes de fuente F2 nos permite concluir que los eventos sísmicos con mayor ocurrencia en esta zona son de magnitudes 4.5 Mw a 4.8 Mw, posteriormente le siguen los de magnitud 5.1 Mw a 5.5 Mw, después de ellos la ocurrencia de magnitud empieza a disminuir en la fuente F2.

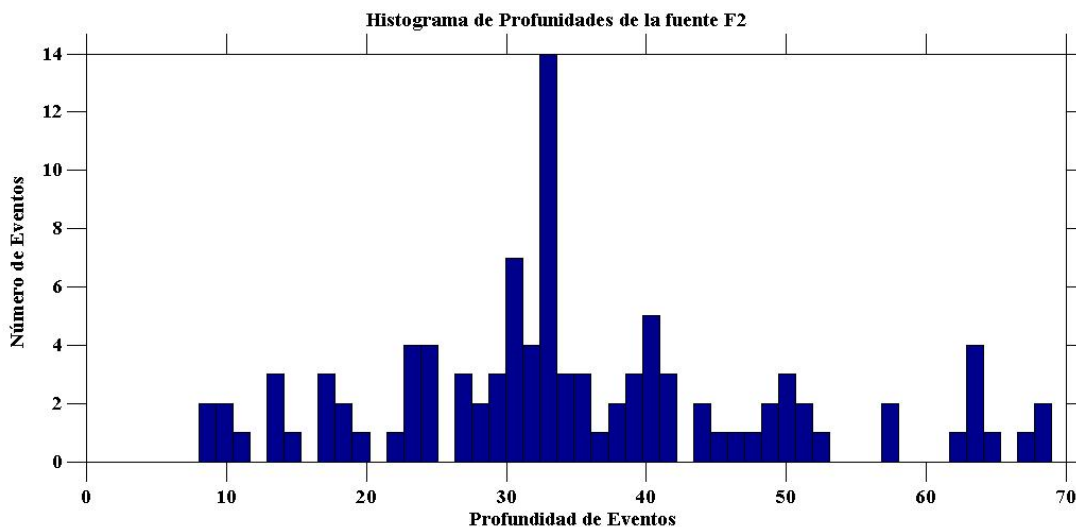


Figura 34: Histograma de profundidades de eventos sísmicos de la fuente sísmica F2.

Al analizar la gráfica de profundidades podemos decir que la gran parte de sismos ocurridos en esta zona se dan a profundidades de 30 a 33 kilómetros, lo cual nos servirá para poder determinar la profundidad de la fuente sísmica F2.

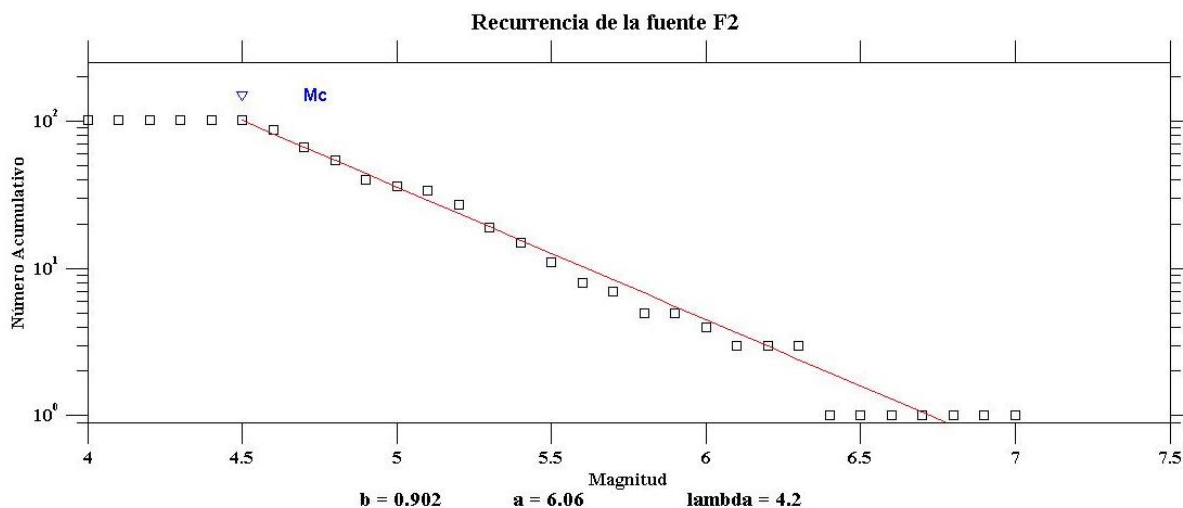


Figura 35: Recurrencia de Gutenberg y Richter de la fuente sísmica F2.

Por último al analizar la fuente sísmicas F2 usando las fórmulas mostradas al inicio del trabajo, nos permitió determinar el valor de λ_0 es de 4.2 y el valor de β igual a 2.077.

IV.1.3 Fuente Sísmica F14

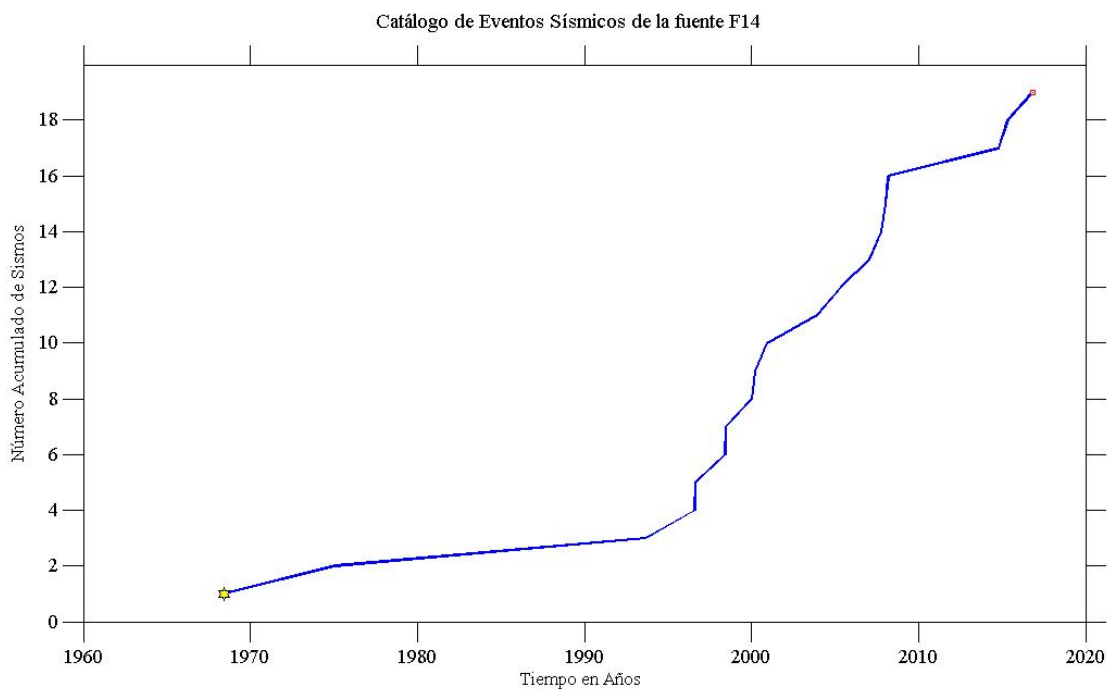


Figura 36: Número acumulado de sismos de la fuente sísmica F14.

La gráfica nos muestra un pendiente muy uniforme entre los años de 1968 hasta 1994, posterior a esta fecha la pendiente aumenta, pero de una manera muy irregular, lo cual indica que la fuente sísmica F14 no presenta mucha sismicidad constante en cada año, lo cual podría permitirnos inferir que esta zona no libera mucha energía tectónica y que está propensa a futuro a liberar dicha energía acumulada en el tiempo.

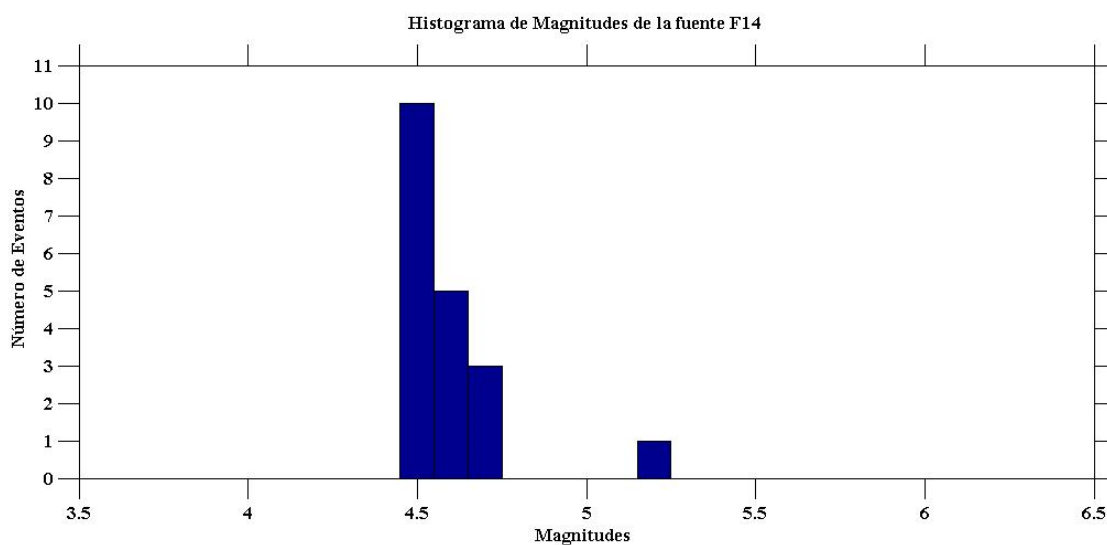


Figura 37: Histograma de magnitudes de la fuente sísmica F14.

La mayor ocurrencia de sismos de la fuente F14, casi en su totalidad es conformada por magnitudes de 4.5Mw, algunas de 4.6 a 4.7 Mw y escasas de magnitudes superiores a estas.

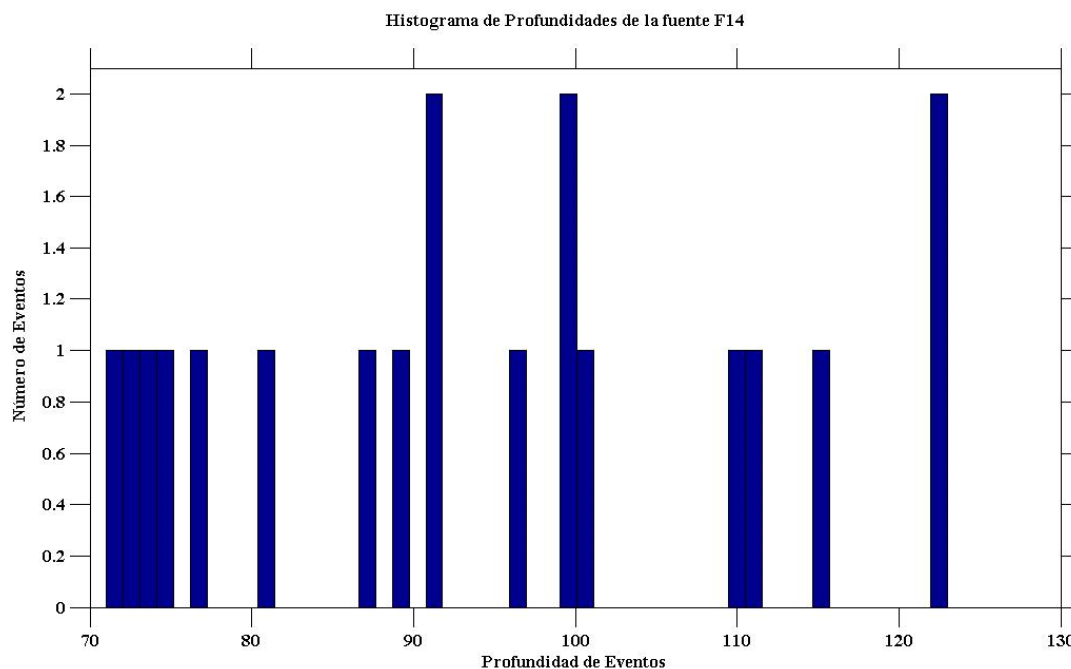


Figura 38: Histograma de profundidades de eventos sísmicos de la fuente sísmica F14.

Dentro de la fuente F14 la mayor ocurrencia de eventos sísmicos se da entre los 70 hasta los 100 kilómetros de profundidad, dicha data de este histograma nos permitirá determinar la profundidad máxima de mayor probabilidad de ocurrencia de para la fuente F14.

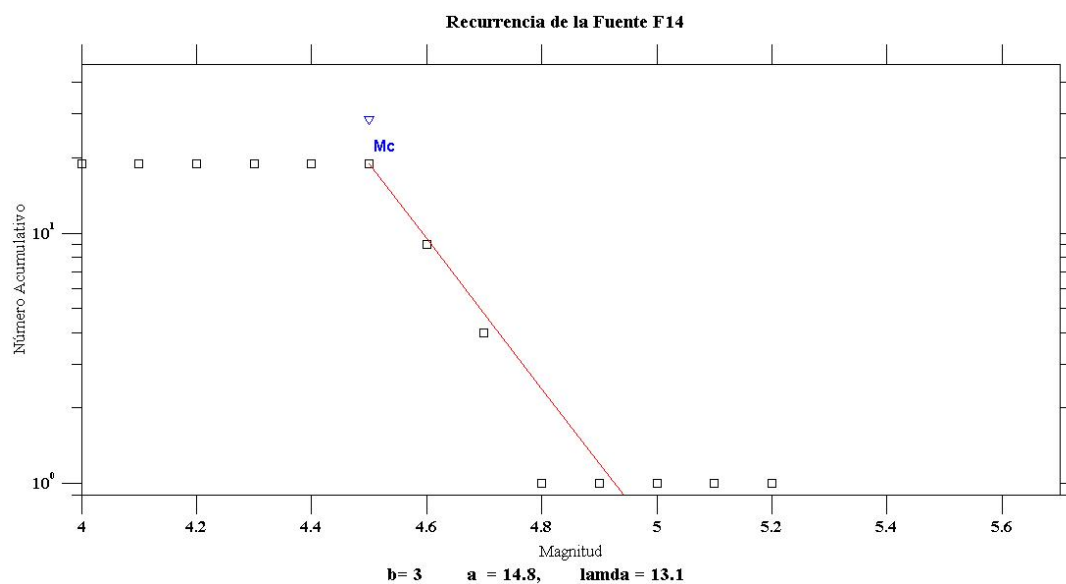


Figura 39: Recurrencia de Gutenberg y Richter de la fuente sísmica F2.

Finalmente, al analizar la fuente sísmicas F14 usando las fórmulas mostradas al inicio del trabajo, nos permitió determinar el valor de λ_0 es de 13.1 y el valor de β igual a 6.908.

IV.1.4 Parámetros finales de las fuentes sísmicas

Una vez analizadas las dos fuentes sísmicas por separado podemos realizar unas tablas resumen, que nos permitirá conocer las características de dichas fuentes y posteriormente ingresarlas al programa R-Crisis, para poder hacer el análisis final.

Tabla 6: Coordenadas y Profundidades de las fuentes utilizadas en RCRISIS

Fuente Sísmica	COORDENADAS GEOGRAFICAS (°)		Profundidad (Km)
	Longitud	Latitud	
F2	-81.997	-6.484	30
	-80.306	-5.886	30
	-79.169	-7.309	30
	-81.635	-7.78	30
	-82.635	-6.83	30
F2 AHS	-82.000	-3.390	40
	-80.170	3.450	40
	-80.670	5.420	40
	-80.306	-5.886	40
	-81.997	-6.484	40
F2 AHI	-79.169	-7.309	40
	-79.270	-7.900	40
	-81.170	-9.000	40
	-81.635	-7.780	40
F14	-79.493	-5.123	90
	-78.752	-5.393	90
	-78.849	-7.224	90
	-79.948	-7.964	90
	-81.293	-6.449	90
F14 AH	-79.2	-3.07	130
	-78.6	-4	130
	-77.17	-6.53	130
	-79.8	-8.13	130
	-79.948	-7.964	130

	-78.849	-7.224	130
	-78.752	-5.393	130
	-79.493	-5.123	130
	-81.293	-6.449	130
	-81.93	-5.73	130
	-81	-3.07	130

Tabla 7: Parámetros propios de cada fuente sismogénica.

Fuentes	Mmin	Mmáx	a	b	β	λ
F2	4.5	7	6.06	0.902	2.077	4.2
F14	4.5	5.2	14.80	3.000	6.908	13.1
F2 AHS	5.5	7	6.08	0.840	1.93	1.61
F14 AH	5	6.1	4.36	0.640	1.48	1.01
F2 AHÍ	5.5	7	6.08	0.840	1.93	1.61

IV.1.5 Ángulo de buzamiento Lambayecano.

Recopilando todos los sismos producidos en el departamento de Lambayeque desde 1932 hasta el 2022, se utilizó el método de recta de progresión con los datos de latitud y profundidad de cada evento sísmico con la finalidad de hallar el ángulo de buzamiento de la Benioff para la zona analizada.

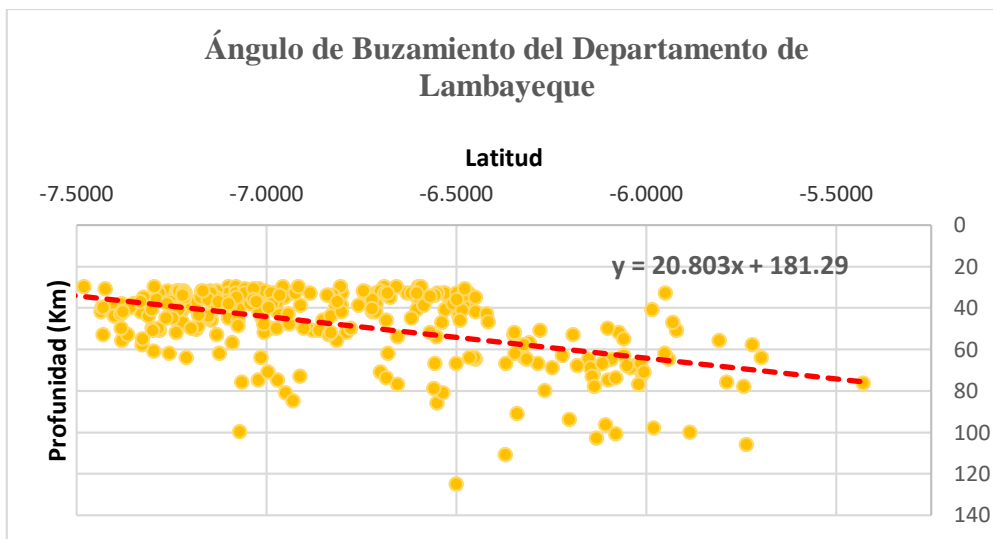


Figura 40: Angulo de Buzamiento de benioff departamento de Lambayeque.

Como se puede observar, el ángulo de subducción de la placa de Nazca sobre la placa Sudamericana es de 20.8° para los eventos sísmicos producidos en la zona de eventos de interface.

IV.1.6 Curva de Peligro Sísmico

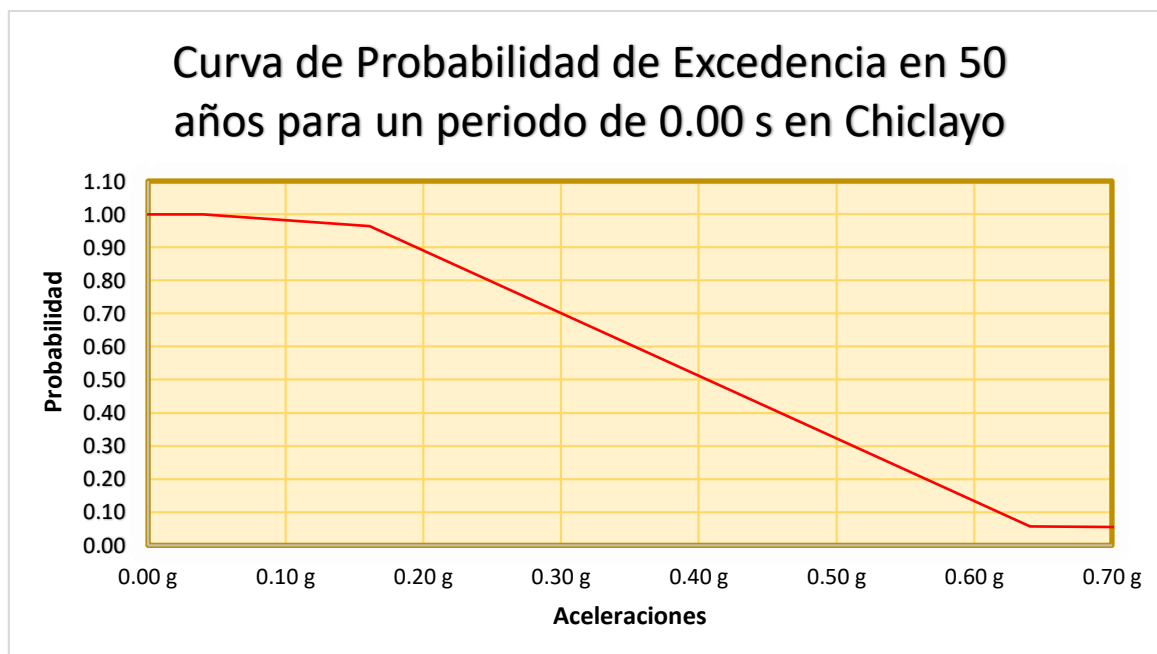


Figura 41: Curva de Probabilidad de Excedencia en 50 años para un periodo de 0.10 s en Chiclayo.

La probabilidad de excedencia mostrada en esta gráfica nos permite hallar las aceleraciones probables en la ciudad de Chiclayo, los datos fueron obtenidos de las coordenadas -79.84216 y -06.78284.

IV.1.6 Mapas de Peligro Sísmico

Finalmente se obtienen los mapas de aceleraciones en suelo rígido para diferentes años de excedencia con una probabilidad del 10%. los cuales dieron los siguientes resultados:

Tabla 8: Aceleraciones en suelo rígido del departamento de Lambayeque.

Periodo Estructural	Tiempo de Exposición	Aceleración Máxima	Aceleración Mínima	Mapa de Aceleración
0.00 s	50 años	0.49 g	0.26 g	Anexo 06 (E01)
0.10 s	50 años	0.92 g	0.42 g	Anexo 06 (E02)
0.20 s	50 años	0.91 g	0.40 g	Anexo 06 (E03)
0.30 s	50 años	0.78 g	0.32 g	Anexo 06 (E04)
0.40 s	50 años	0.68 g	0.28 g	Anexo 06 (E05)
0.50 s	50 años	0.60 g	0.26 g	Anexo 06 (E06)
0.60 s	50 años	0.47 g	0.22 g	Anexo 06 (E07)

Como se observa en la tabla mostrada anteriormente, la máxima aceleración en el suelo es de 0.49 g para un periodo estructural de 0.00 segundos en un tiempo de exposición de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10%, mientras que para 0.10 segundos nos da un pico de 0.92 g con pick ground acceleration este resultado nos permite inferir que las aceleraciones del suelo cuando son analizadas con fuentes focalizadas puede aumentar su valor con respecto a la norma peruana.

IV.1.7 Peligro Sísmico Uniforme

Las normas sismo resistentes en el mundo se basan en espectros de suelo con una aceleración constante la cual luego es escalada a un valor máximo pico de dicho suelo, dicha distribución se conoce como distribución de peligro no uniforme, debido a dicho peligro no abarcaría los diferentes periodos estructurales.

El análisis elaborado en este documento nos muestra como son los máximos picos de aceleración en un determinado punto del mapa de análisis con sus diferentes periodos estructurales en el basamento rocoso.

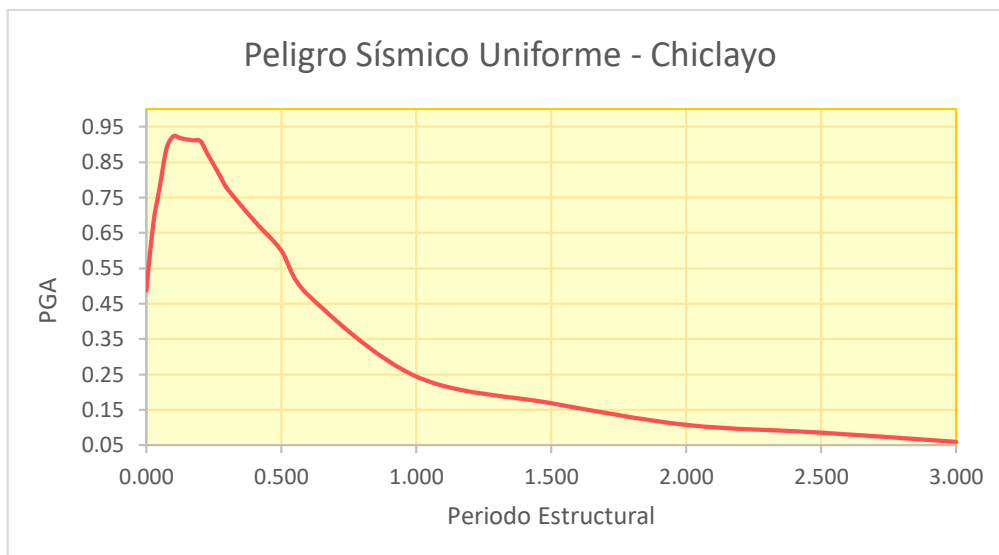


Figura 42: Peligro sísmico uniforme para una misma probabilidad de excedencia en 50 años en la ciudad de Chiclayo

Este peligro sísmico uniforme permitiría tener una respuesta espectral más clara y concisa en función de los parámetros de magnitudes y distancias del evento sísmico al sitio, logrando así tener un espectro que abarque las posibles combinaciones de periodos estructurales con una misma probabilidad de excedencia en un periodo de retorno determinado.

Teniendo esto claro podemos dar como ejemplo el diseño de una edificación, la cual normalmente asume como base para el diseño sísmico una aceleración pico dada por la norma que solo sirve para un periodo estructural, la cual no depende de las características detalladas de diversas estructuras sino principalmente del porcentaje de amortiguamiento y frecuencia, dando una desventaja en el diseño sísmico, ya que no se toma en cuenta la amplitud del movimiento y la duración del movimiento en el suelo; por lo tanto tomando el valor de Z de la norma en el diseño sísmico de la edificación estaría generando un espectro de diseño para un periodo de probabilidad de excedencia de solo periodos cortos y excluyendo los periodos largos, generando así diseños sísmicos con probabilidades de fallas diferentes.

V. Discusión

Si comparamos los eventos sísmicos de acuerdo a su profundidad con el estudio realizado por Vergaray y Aguilar [26] podemos darnos cuenta que, se puede reafirmar al decir que la mayor presencia de eventos sísmicos son los eventos de interfase y posteriormente le siguen los eventos de interplaca intermedia, la gráfica de distribución espacial de los eventos sísmicos en el departamento de Lambayeque lo avala.

Al analizar la tasa de sismos de la fuente F2 de este trabajo versus la tasa de sismos de la fuente F2 propuesta por Bolaños y Monroy [17], observamos una pequeña diferencia en esta, ya que la de Bolaños y Monroy da un valor de 4.050 y la del trabajo es de 4.2; pero si comparamos con otro trabajo propuesto por Alva y Castillo [15] donde su tasa es de 1.61, podemos percatarnos que existe una diferencia muy considerable. Analizando esto a más detalle podemos observar que el valor dado por Bolaños y Monroy es muy cercano al nuestro ya que ha usado un catálogo de magnitudes M_w ; mientras que el trabajo de Alva y Castillo utiliza como base un catálogo de magnitudes M_s .

Comparando los resultados de la fuente F14, podemos observar que los valores de tasa de Bolaños y Monroy es de 2.435, la de Alva y Castillo es de 1.01 y la de nuestro trabajo da un valor de 13.1; aquí si existe una gran diferencia debido a que nuestra fuente F14 está centrada netamente en el área del nuestro departamento, mientras los otros dos trabajos utilizan una fuente F14 que abarca muchos departamentos, logrando así disminuir la tasa de sismos para dicha fuente.

Las aceleraciones del resultado final del trabajo de Osmar y Charca [18] indican que en la zona de Tumbes y Piura las aceleraciones dadas por la norma sísmo resistente en el Perú se encuentran ligeramente dimensionadas dándole diferencias de 0.15g a 0.20g, asimismo en el trabajo de Bolaños y Monroy indica que en Tumbes y Piura las aceleraciones están también ligeramente sobredimensionada en un 0.14g, al comparar con los resultados de nuestras aceleraciones, donde la aceleración máxima fue de 0.49g.

Las magnitudes mínimas para hallar los parámetros propios de cada fuente para el trabajo de Bolaños y Monroy fueron de 4.0 M_w y 3.8 M_w para las fuentes F2 y F14 respectivamente, mientras que en nuestro trabajo las magnitudes mínimas fueron de 4.5 M_w para ambas fuentes sísmicas.

VI. Conclusiones

1. El Catálogo sísmico utilizado alberga 438 eventos sísmicos, los cuales se encuentran distribuidos dentro de la zona de estudio (fuentes sísmicas F2 Y F14).
2. Las fórmulas de homogenización de magnitudes utilizadas fueron planteadas por el ing. Hernando Tavera e ing. Angélica Cahuari, cabe mencionar que dichas fueron utilizadas debido a que fueron elaboradas teniendo en cuenta la zona de subducción de nuestro país.

3. Se trabajó un total de 2 fuentes sísmicas: la fuente F2 para eventos sísmicos de interfase y la F14 para eventos sísmicos de intraplaca (Tabla 5), dichas fuentes sísmicas fueron tomadas teniendo en cuenta el trabajo de fuentes sísmicas en el Perú de Alva y Castillo y se completó con más fuentes de su trabajo para dar un mejor resultado al estudio.
4. Al sub-delimitar las fuentes sísmicas para realizar un análisis más detallado de la zona, concluimos que las fuentes sísmicas que abarcan las cotas del Perú no varían en tasa anual de recurrencia de sismos como es el caso de la fuente F2, sin embargo las fuentes que ya no abarcan las costas peruanas varían en la tasa, debido a que focaliza de manera más concreta la zona de estudio, en donde la tasa estará en función solo de la nueva área focalizada en la sub-delimitación de fuente como es en el caso de fuente F14.
5. Se concluye que para fuente F2 valores de a igual a 6.06 y b igual a 0.902, de la misma forma para la fuente F14 se obtuvo un a igual a 14.80 y un b igual a 3.00, aplicando la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter.
6. Se obtuvo una curva de peligro sísmico para una probabilidad de excedencia de 50 años y un periodo de retorno de 0.10s, en las coordenadas -06.78284 latitud y 79.84216 longitud, donde se concluye que dicha zona existe una probabilidad del 70% de presencia de aceleraciones de 0.30g, 50% de presentarse aceleraciones de 40g y una probabilidad muy baja del 10% de presentarse aceleraciones de 60g.
7. Las aceleraciones para diferentes periodos estructurales en un periodo de exposición de 50 años con una probabilidad de 10% nos indican que el periodo estructural de 0.10 segundos da la aceleración máxima en el departamento de Lambayeque con un valor de 0.92 g y un valor mínimo de 0.42g.
8. La norma peruana E.030 Diseño Sismorresistente indica un valor de aceleración de 0.45g para un 10% de probabilidad dentro de 50 años de exposición, pero los resultados finales del este trabajo concluyen que dichos valores dados por la norma difieren en un 8.8% en relación a la aceleración pico de la norma de 0.45g.
9. Se concluye que la mayor parte de los eventos sísmicos ocurren cerca a las costas peruanas, mientras más lejos de ellas ocurran dichos eventos disminuirán la presencia cantidad de estos.
10. Los eventos cerca a la costa de nuestro departamento son de poca profundidad, pero si los dichos eventos se dan más lejos de ellas, la profundidad de aumenta progresivamente.
11. En ángulo de buzamiento de la placa de Nazca en la costa de Lambayeque es de 20.8° , este resultado se puede corroborar con los cálculos de peligro sísmico y superficie de

subducción realizados por Vergaray y Aguilar, los cual indican en su trabajo que el ángulo de subducción por las costas lambayequeanas oscila entre los 20 a 25° entre los eventos sísmicos de profundidad 33 a 120 km, también conocidos como eventos de interfase.

VII. Recomendaciones

Los catálogos para la elaboración estos análisis de peligro sísmico deberían de estar en magnitud Kanamori, ya que las otras magnitudes se saturan y no pueden captar la magnitud real del evento sísmico.

La obtención de los datos del catalogó sísmico deberán estar actualizados para poder así obtener resultados más precisos.

Se deben realizar análisis de peligro sísmico para cada departamento para conocer mejor como se presentas las aceleraciones en el suelo y la probabilidad de ocurrencia de dichas aceleraciones.

Se debe tener en cuenta que dicho estudio de peligro sísmico uniforme presentado en el trabajo solo será útil para la zona del departamento de Lambayeque – Chiclayo, dejando en claro que no se puede usar para cualquier diseño sísmico en otra parte del Perú.

VIII. Referencias

- [1] T. Fuller y C. Metz , «A.I. Is Helping Scientists Predict When and Where the Next Big Earthquake Will Be,» *The New York Times*, p. 1, 26 Octubre 2018.
- [2] H. Tavera, «Peligro sísmico en Lima y el país,» *Prevención*, nº 14, p. 6, 2008.
- [3] El Comercio, «Pisco: hace 12 años se registró uno de los terremotos más destructivos del Perú,» *El Comercio*, 17 Agosto 2019.
- [4] N. J. Moreno Moreno , «Modelado numérico del maremoto de Lambayeque,» UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS , Lima, 2017.
- [5] Radio Nacional, «Sismo de 5.3 grados remece distrito de Pimentel en Lambayeque,» *Radio Nacional*, 16 Octubre 2016.
- [6] J. M. Rodríguez Sosa, «Potencial Sísmico De Las Fallas Del Cinturón Deformado Del Centro De Costa Rica,» Universidad De Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, 2017.
- [7] P. Quinde Martínez y E. Reinoso Angulo, «Estudio De Peligro Sísmico De Ecuador Y Propuesta De Espectro De Diseño Para La Ciudad De Cuenca,» *Revista de Ingeniería Sísmica*, nº 94, pp. 1-26, 2016.

- [8] F. Leyton Flórez y S. Sepúlveda Valenzuela, «Peligro Sísmico En El Segmento Norte De La Región Del Maule, Chile,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011.
- [9] E. R. Ancco Huanacuni, «Influencia del Espectros Determinísticos Y Probabilísticos Para La Evaluación Del Peligro Sísmico En Estructuras De La Región De Tacna,» Universidad Privada De Tacna, Tacna, 2018.
- [10] Sisa, «Informe Peligro Sísmico Y Vulnerabilidad,» Sedapar, Arequipa, 2016.
- [11] H. Tavera, «Estudio De Peligro Sísmico Para El Cerro Tamboraque Distrito De San Mateo- Provinica De Huarochiri,» Lima, 2011.
- [12] F. Uloa, «Manual de gestión de riesgos de desastre para comunicadores sociales: una guía práctica para el comunicador social comprometido en informar y formar para salvar vidas,» 2011. [En línea]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219184>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [13] USGS, «Servicio Geológico de los Estados Unidos,» 18 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/media/images/usgs-map2>. [Último acceso: 18 Mayo 2020].
- [14] E. R. Ancco Huanacuni, «Influencia De Espectros Determinísticos y Probabilísticos Para Evaluar Del Peligro Sismico En Estructuras De La Región De Tacna,» Universidad Privada de Tacna, Tacna, 2018.
- [15] J. Alva Hurtado, «Actualización de los Parámetros Sismológicos en la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú,» *Ingeniería Antisísmica*.
- [16] J. Suarez Diaz, *Visión Geotécnica de la Amenaza Sísmica con énfasis en el Nororiente de Colombia y la ciudad de Bucaramanga*, Bucaramanga: Geotecnología S.A.S.
- [17] A. M. Bolaños Luna y O. M. Monroy Concha, «Espectros De Peligro Sísmico Uniforme,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2004.
- [18] O. A. Charca Mendoza, «Selección de Leyes de Atenuación Sísmica De Subducción Para La Evaluación Del Peligro Sísmico En El Perú,» Universidad Nacional De Ingeniería, Lima, 2018.
- [19] O. A. Charca Mendoza, «Selección De Leyes De Atenuación Sísmica De Subducción Para La Evaluación Del Peligro Sísmico En El Perú,» Universidad Nacional De Ingeniería, Lima, 2018.
- [20] alamy, *Los principales tipos de ondas sísmicas: P, S, de amor y de Rayleigh*.
- [21] Centro Sismológico Nacional, «Reporte Acelerómetro Sismo del 19 de octubre del 2019,» Ministerio del Ambiente, Lima, 2019.
- [22] L. V. y Z. Aguilar, «uperficie de Subducción para Cálculos de Peligro Sísmico en el Perú,» de *XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, 2018, 2018.
- [23] Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile, *Glosario Términos Habituales*, Santiago de Chile: Centro Sismológico Nacional.
- [24] Science earthjay, *Gráfica de Relación de Magnitudes*.
- [25] H. Tavera , «La Tierra, Tectónica y Sismicidad,» Instituto Geofísico del Perú, Lima, 1993.

- [26] L. Vergaray y Z. Aguilar, «Superficie de Subducción para Cálculos de Peligro Sísmico en el Perú,» de *XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Lima, 2018.
- [27] R-Crisis, «R-Crisis,» [En línea]. Available: <http://www.r-crisis.com/explore/features/>. [Último acceso: 25 Mayo 2020].
- [28] ETH Zürich, «Swiss Seismological Service,» [En línea]. Available: <http://www.seismo.ethz.ch/en/research-and-teaching/products-software/software/ZMAP/>. [Último acceso: 21 Agosto 2020].
- [29] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. d. P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, Ciudad de México: McGRAW-HILL, 2014.
- [30] H. Tavera y C. Agüero, *Catálogo Sísmico del Perú 1471-1982*, Lima: Instituto Geofísico del Perú, 2001.
- [31] Centro de Sismología para América del Sur, *Catalogo de Terremotos Para America Del Sur*, vol. 7a, Centro de Sismología para América del Sur, 1985.

IX. Anexos

IX.1 Anexo 01: Catálogo de Sismos

Tabla 9: Catálogo de Sismos en el departamento de Lambayeque.

Latitud	Longitud	Año	Mes	Día	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Hora	Minuto
-7.0000	-80.3000	1948	4	18	4.8	40	0	5
-7.0000	-80.3000	1950	8	8	4.8	40	3	35
-7.3000	-79.9000	1952	1	24	5.1	50	16	40
-7.4000	-79.8000	1952	9	23	4.8	40	8	8
-7.1000	-80.4000	1955	4	25	4.7	30	0	24
-7.0000	-80.5000	1955	11	26	4.8	40	20	40
-7.0000	-80.0000	1960	7	19	5.1	33	4	19
-6.6000	-81.2000	1963	3	31	5.5	31	4	45
-7.1000	-81.6000	1963	8	29	7.0	23	15	30
-7.4290	-81.3650	1965	8	3	5.7	27	2	1
-6.4830	-81.1630	1965	12	10	4.7	10	2	59
-6.5000	-80.4000	1967	4	24	4.4	125	14	54
-7.3300	-81.4050	1967	9	27	5.1	22	6	2
-7.0700	-80.7300	1968	5	27	5.2	99.8	18	25
-6.9360	-80.4380	1968	7	30	6.30	30	20	38
-7.2240	-80.7920	1970	5	17	5.3	42	21	24
-7.3300	-80.4160	1971	8	25	5.2	42	4	11
-7.3270	-80.1050	1971	9	12	5.1	58	0	46
-7.1840	-80.5220	1971	9	22	5.7	51	0	40
-7.0400	-80.4020	1973	4	26	4.8	32	16	44
-7.1940	-80.8360	1973	8	7	5.4	23	2	5
-6.1070	-79.2330	1975	2	1	4.7	96.4	12	50
-6.4670	-81.0470	1976	11	20	5.2	33	22	37
-6.5900	-81.0800	1979	3	1	5.4	29	5	37
-6.8680	-80.5830	1979	8	26	5.2	13	12	18
-6.4700	-81.3890	1981	2	28	5.6	39	21	56
-6.9550	-81.8660	1982	3	16	4.7	33	4	14
-6.9800	-80.3100	1982	9	12	4.7	33	16	57
-6.9100	-80.3800	1985	10	25	4.6	39	12	43
-6.6900	-80.8400	1987	10	10	4.7	30	7	42
-6.7100	-80.7500	1987	10	31	5.9	33	8	52
-6.5100	-81.6700	1988	8	29	5.2	37	21	32
-6.7400	-81.5930	1989	6	22	5.0	32	15	8
-7.1300	-80.3600	1989	7	6	4.5	32	17	51
-6.3700	-79.4600	1989	12	20	4.2	111	4	24
-6.1000	-79.5400	1990	2	6	4.2	75	2	21
-7.3200	-79.8700	1990	8	3	4.5	24	4	58
-7.0200	-80.4100	1990	11	10	4.8	31	17	20
-6.9900	-79.6700	1991	3	1	4.9	50	17	34
-7.1800	-80.3600	1991	4	7	5.0	49	13	9
-6.9500	-80.7700	1991	5	4	4.3	81	22	41

-6.0800	-79.9300	1991	8	4	4.3	74	4	9
-6.6800	-79.6400	1991	10	28	4.6	62	18	55
-6.9700	-80.6900	1992	2	28	4.2	75	6	57
-6.3200	-79.7300	1992	8	6	4.6	64	4	15
-6.9500	-79.0600	1992	8	12	4	114	22	5
-7.3100	-80.4200	1992	10	6	4.8	44	0	30
-6.0800	-80.1300	1993	9	8	4.5	101	14	10
-6.8100	-80.7100	1994	8	13	4.6	25	7	23
-6.4200	-80.6100	1995	1	14	4.5	18	10	36
-6.6000	-80.7300	1995	6	11	4.5	35	7	48
-6.6600	-79.8100	1995	9	13	4.5	17	22	0
-6.0092	-79.8427	1996	1	9	4.2	72	20	16
-5.8411	-80.1067	1996	1	14	4	100	10	45
-6.2671	-80.4337	1996	5	10	4	80	12	10
-7.0217	-79.5740	1996	6	1	4	75	20	19
-6.1390	-79.7357	1996	7	22	4	72	18	59
-7.1452	-80.7523	1996	7	26	4.5	46	8	14
-6.3077	-80.0713	1996	8	8	5.4	57	14	56
-6.5556	-79.6922	1996	8	15	4.6	67	1	57
-6.4493	-79.2481	1996	8	15	4.6	91	9	10
-6.6842	-80.5089	1996	8	25	4.7	74	1	15
-7.1975	-80.7831	1996	8	25	4.5	50	0	40
-7.0425	-80.8083	1996	8	26	5.2	23	9	24
-6.0294	-79.8227	1996	8	29	5.1	68	10	43
-7.2141	-79.9901	1996	8	30	5.2	11	19	7
-7.2280	-80.7690	1998	2	7	4.7	33	9	5
-5.4884	-79.6939	1998	6	12	4.5	123	6	36
-5.4290	-79.5666	1998	6	29	4.5	89	5	49
-5.4392	-79.8884	1998	9	12	4.2	107	10	49
-6.5290	-81.3480	1999	4	29	4.5	33	9	10
-6.2473	-79.8818	1999	7	14	4.6	69	20	10
-5.2985	-79.2363	2000	1	15	4.6	122	19	51
-5.4280	-79.7790	2000	3	27	4.5	76.4	9	54
-6.6880	-79.6400	2000	6	10	4.6	33	14	9
-6.4829	-79.0210	2000	7	21	4	102	20	42
-5.5398	-79.6784	2000	10	21	4.3	97	7	20
-7.3233	-81.3303	2000	10	24	4.6	35	18	50
-5.6053	-79.4049	2000	12	12	4.5	91	5	29
-5.5556	-79.7822	2001	1	23	4	128	10	39
-6.9870	-81.4970	2001	2	28	4.8	33	2	57
-5.7429	-79.7968	2001	9	8	4.1	78	12	21
-7.2820	-81.5830	2001	9	25	4.7	33	23	22
-7.0070	-80.6530	2002	1	11	4.5	48	20	16
-5.6853	-80.0142	2002	1	23	4	84	9	41
-5.7357	-79.7364	2002	1	31	4.2	106	5	2
-7.1000	-80.5530	2002	4	3	4.8	29	14	8
-6.7420	-80.5420	2002	11	28	4.5	33	19	40
-6.4520	-79.7100	2003	6	13	4.6	64	10	32

-5.8850	-80.0830	2003	12	9	4.6	100	8	38
-5.5991	-79.6814	2004	7	16	4.2	80	14	18
-5.5709	-79.7989	2004	9	28	4	72	9	44
-7.0140	-80.2530	2004	10	28	5.1	64	20	45
-6.5357	-80.2563	2005	1	30	4.4	81	6	51
-5.9801	-79.4901	2005	2	12	4	98	13	48
-5.4917	-79.9271	2005	5	22	4.5	87	18	8
-6.5592	-79.2622	2005	11	27	4	98	16	48
-6.3147	-79.7214	2005	12	1	4.5	65	23	3
-6.0190	-79.7619	2005	12	19	4	77	14	17
-6.3398	-79.4567	2006	11	23	4	91	3	49
-6.2020	-79.4863	2007	1	20	4	94	7	36
-5.5084	-79.2283	2007	1	22	4.5	111	10	47
-7.0060	-80.4850	2007	2	24	6.30	23	2	36
-7.1730	-80.6110	2007	2	26	5.3	35	0	19
-6.9240	-80.1430	2007	6	27	4.7	33	6	36
-6.9119	-79.4872	2007	7	21	4	73	13	53
-5.6693	-80.0458	2007	10	13	4.5	75	1	34
-6.9961	-79.5551	2008	1	12	4.7	71	3	48
-6.1420	-79.7070	2008	3	16	4.6	73	12	37
-6.6540	-79.9780	2008	8	1	4.2	77	14	40
-6.7570	-80.8900	2009	2	8	5.2	39	21	23
-6.5670	-81.1500	2009	2	9	6.0	15	14	8
-5.7877	-79.9864	2009	7	7	4	76	18	27
-5.6959	-79.9184	2010	8	17	5.3	64	3	22
-6.9300	-79.4024	2010	9	10	4.2	85	2	21
-7.2993	-81.4656	2010	10	26	4.8	51	18	55
-6.4930	-80.7100	2011	6	27	4.7	44	21	5
-7.0642	-80.5450	2012	1	5	4	76	14	2
-6.1920	-80.0519	2012	9	7	4.7	53	12	26
-7.4800	-80.2000	2012	10	19	4.6	30	15	42
-5.2805	-79.3020	2012	11	18	4.3	114	12	29
-6.5880	-81.0700	2012	11	29	5.5	10	7	9
-6.9847	-80.8488	2012	12	17	4.9	38	1	18
-5.5130	-79.6877	2013	1	15	4.2	91	5	55
-6.4840	-80.7550	2013	7	4	4.6	41	2	59
-6.7221	-81.6504	2013	8	13	4.5	40	0	41
-7.1065	-81.0025	2013	9	22	4.8	28	41	41
-5.3392	-79.4033	2013	12	9	4	121	8	34
-6.5587	-79.5914	2014	2	8	4.1	79	1	35
-5.3606	-79.4150	2014	5	13	4.2	97	16	26
-6.1307	-79.2984	2014	6	24	4.2	103	20	31
-6.7460	-81.6355	2014	8	4	5.4	24	3	20
-6.0049	-79.7768	2014	8	13	4	71	9	40
-5.4443	-79.3189	2014	10	26	4.5	115	2	7
-5.5628	-79.5940	2015	5	12	4.5	110	4	10
-6.8392	-80.4869	2015	5	17	4.6	34	11	1
-5.2750	-79.5339	2015	6	2	4.3	112	4	30

-6.6309	-81.0822	2015	6	7	4.8	14	6	39
-7.1700	-80.7055	2015	7	6	5.2	17	11	17
-6.7445	-80.6272	2015	11	20	4.6	32	21	28
-7.2462	-80.9637	2015	12	6	4.9	27	18	17
-7.0951	-80.7599	2016	2	3	4.6	25	9	27
-7.2642	-79.7570	2016	6	14	4.6	45	12	53
-7.0441	-80.9764	2016	8	15	4.7	8	3	23
-6.1360	-79.8010	2016	9	4	4	78	23	39
-7.0978	-80.4237	2016	10	16	4.9	14	13	4
-7.0709	-80.3934	2016	10	17	5.1	27	10	27
-6.5038	-80.6675	2016	11	9	4.6	8	15	1
-6.5038	-80.6675	2016	11	9	4.6	81	15	1
-7.1958	-81.1403	2017	4	2	5.3	28	1	38
-7.2431	-80.9610	2017	11	17	4.6	29	0	33
-7.2179	-80.4496	2018	2	10	4.6	33	17	54
-6.6035	-80.6100	2018	5	25	4.5	33	14	25
-6.5686	-80.7350	2018	10	2	4.6	34	10	40
-6.5578	-81.1660	2018	10	10	4.6	30	3	48
-5.2792	-79.1069	2019	2	14	4	104	2	24
-6.4595	-79.6308	2019	3	7	5.5	18	4	5
-5.4944	-79.5772	2019	3	24	4	98	9	55
-7.1908	-80.8309	2019	10	19	4.8	19	9	13
-7.0996	-80.9084	2019	12	22	4.6	38	13	2
-7.0742	-80.2824	2019	12	31	4.8	49	11	48
-7.1755	-80.8534	2020	3	20	4.7	17	8	18
-7.2200	-80.5100	2020	5	19	4.7	34	3	8

IX.2 Anexo 02: Catálogo de Sismos solo de la fuente F2

Tabla 10: Catálogo de Sismos solo de la fuente F2 para el departamento de Lambayeque.

Latitud	Longitud	Año	Mes	Día	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Hora	Minuto
-7.0000	-80.3000	1948	4	18	4.8	40	0	5
-7.0000	-80.3000	1950	8	8	4.8	40	3	35
-7.3000	-79.9000	1952	1	24	5.1	50	16	40
-7.4000	-79.8000	1952	9	23	4.8	40	8	8
-7.1000	-80.4000	1955	4	25	4.7	30	0	24
-7.0000	-80.5000	1955	11	26	4.8	40	20	40
-7.0000	-80.0000	1960	7	19	5.1	33	4	19
-6.6000	-81.2000	1963	3	31	5.5	31	4	45
-7.1000	-81.6000	1963	8	29	7.0	23	15	30
-7.4290	-81.3650	1965	8	3	5.7	27	2	1
-6.4830	-81.1630	1965	12	10	4.7	10	2	59
-7.3300	-81.4050	1967	9	27	5.1	22	6	2
-6.9360	-80.4380	1968	7	30	6.30	30	20	38
-7.2240	-80.7920	1970	5	17	5.3	42	21	24
-7.3300	-80.4160	1971	8	25	5.2	42	4	11
-7.3270	-80.1050	1971	9	12	5.1	58	0	46
-7.1840	-80.5220	1971	9	22	5.7	51	0	40
-7.0400	-80.4020	1973	4	26	4.8	32	16	44
-7.1940	-80.8360	1973	8	7	5.4	23	2	5
-6.4670	-81.0470	1976	11	20	5.2	33	22	37
-6.5900	-81.0800	1979	3	1	5.4	29	5	37
-6.8680	-80.5830	1979	8	26	5.2	13	12	18
-6.4700	-81.3890	1981	2	28	5.6	39	21	56
-6.9550	-81.8660	1982	3	16	4.7	33	4	14
-6.9800	-80.3100	1982	9	12	4.7	33	16	57
-6.9100	-80.3800	1985	10	25	4.6	39	12	43
-6.6900	-80.8400	1987	10	10	4.7	30	7	42
-6.7100	-80.7500	1987	10	31	5.9	33	8	52
-6.5100	-81.6700	1988	8	29	5.2	37	21	32
-6.7400	-81.5930	1989	6	22	5.0	32	15	8
-7.1300	-80.3600	1989	7	6	4.5	32	17	51
-7.3200	-79.8700	1990	8	3	4.5	24	4	58
-7.0200	-80.4100	1990	11	10	4.8	31	17	20
-6.9900	-79.6700	1991	3	1	4.9	50	17	34
-7.1800	-80.3600	1991	4	7	5.0	49	13	9
-6.6800	-79.6400	1991	10	28	4.6	62	18	55
-6.3200	-79.7300	1992	8	6	4.6	64	4	15
-7.3100	-80.4200	1992	10	6	4.8	44	0	30
-6.8100	-80.7100	1994	8	13	4.6	25	7	23
-6.4200	-80.6100	1995	1	14	4.5	18	10	36
-6.6000	-80.7300	1995	6	11	4.5	35	7	48
-6.6600	-79.8100	1995	9	13	4.5	17	22	0
-7.1452	-80.7523	1996	7	26	4.5	46	8	14

-6.3077	-80.0713	1996	8	8	5.4	57	14	56
-6.5556	-79.6922	1996	8	15	4.6	67	1	57
-7.1975	-80.7831	1996	8	25	4.5	50	0	40
-7.0425	-80.8083	1996	8	26	5.2	23	9	24
-6.0294	-79.8227	1996	8	29	5.1	68	10	43
-7.2141	-79.9901	1996	8	30	5.2	11	19	7
-7.2280	-80.7690	1998	2	7	4.7	33	9	5
-6.5290	-81.3480	1999	4	29	4.5	33	9	10
-6.2473	-79.8818	1999	7	14	4.6	69	20	10
-6.6880	-79.6400	2000	6	10	4.6	33	14	9
-7.3233	-81.3303	2000	10	24	4.6	35	18	50
-6.9870	-81.4970	2001	2	28	4.8	33	2	57
-7.2820	-81.5830	2001	9	25	4.7	33	23	22
-7.0070	-80.6530	2002	1	11	4.5	48	20	16
-7.1000	-80.5530	2002	4	3	4.8	29	14	8
-6.7420	-80.5420	2002	11	28	4.5	33	19	40
-6.4520	-79.7100	2003	6	13	4.6	64	10	32
-7.0140	-80.2530	2004	10	28	5.1	64	20	45
-6.3147	-79.7214	2005	12	1	4.5	65	23	3
-7.0060	-80.4850	2007	2	24	6.30	23	2	36
-7.1730	-80.6110	2007	2	26	5.3	35	0	19
-6.9240	-80.1430	2007	6	27	4.7	33	6	36
-6.7570	-80.8900	2009	2	8	5.2	39	21	23
-6.5670	-81.1500	2009	2	9	6.0	15	14	8
-5.6959	-79.9184	2010	8	17	5.3	64	3	22
-7.2993	-81.4656	2010	10	26	4.8	51	18	55
-6.4930	-80.7100	2011	6	27	4.7	44	21	5
-6.1920	-80.0519	2012	9	7	4.7	53	12	26
-7.4800	-80.2000	2012	10	19	4.6	30	15	42
-6.5880	-81.0700	2012	11	29	5.5	10	7	9
-6.9847	-80.8488	2012	12	17	4.9	38	1	18
-6.4840	-80.7550	2013	7	4	4.6	41	2	59
-6.7221	-81.6504	2013	8	13	4.5	40	0	41
-7.1065	-81.0025	2013	9	22	4.8	28	41	41
-6.7460	-81.6355	2014	8	4	5.4	24	3	20
-6.8392	-80.4869	2015	5	17	4.6	34	11	1
-6.6309	-81.0822	2015	6	7	4.8	14	6	39
-7.1700	-80.7055	2015	7	6	5.2	17	11	17
-6.7445	-80.6272	2015	11	20	4.6	32	21	28
-7.2462	-80.9637	2015	12	6	4.9	27	18	17
-7.0951	-80.7599	2016	2	3	4.6	25	9	27
-7.2642	-79.7570	2016	6	14	4.6	45	12	53
-7.0441	-80.9764	2016	8	15	4.7	8	3	23
-7.0978	-80.4237	2016	10	16	4.9	14	13	4
-7.0709	-80.3934	2016	10	17	5.1	27	10	27
-6.5038	-80.6675	2016	11	9	4.6	8	15	1
-7.1958	-81.1403	2017	4	2	5.3	28	1	38
-7.2431	-80.9610	2017	11	17	4.6	29	0	33

-7.2179	-80.4496	2018	2	10	4.6	33	17	54
-6.6035	-80.6100	2018	5	25	4.5	33	14	25
-6.5686	-80.7350	2018	10	2	4.6	34	10	40
-6.5578	-81.1660	2018	10	10	4.6	30	3	48
-6.4595	-79.6308	2019	3	7	5.5	18	4	5
-7.1908	-80.8309	2019	10	19	4.8	19	9	13
-7.0996	-80.9084	2019	12	22	4.6	38	13	2
-7.0742	-80.2824	2019	12	31	4.8	49	11	48
-7.1755	-80.8534	2020	3	20	4.7	17	8	18
-7.2200	-80.5100	2020	5	19	4.7	34	3	8

IX.3 Anexo 03: Catálogo de Sismos solo de la fuente F14

Tabla 11: Catálogo de Sismos solo de la fuente F14 para el departamento de Lambayeque.

Latitud	Longitud	Año	Mes	Día	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Hora	Minuto
-6.5000	-80.4000	1967	4	24	4.4	125	14	54
-7.0700	-80.7300	1968	5	27	5.2	99.8	18	25
-6.1070	-79.2330	1975	2	1	4.7	96.4	12	50
-6.3700	-79.4600	1989	12	20	4.2	111	4	24
-6.1000	-79.5400	1990	2	6	4.2	75	2	21
-6.9500	-80.7700	1991	5	4	4.3	81	22	41
-6.0800	-79.9300	1991	8	4	4.3	74	4	9
-6.9700	-80.6900	1992	2	28	4.2	75	6	57
-6.9500	-79.0600	1992	8	12	4	114	22	5
-6.0800	-80.1300	1993	9	8	4.5	101	14	10
-6.0092	-79.8427	1996	1	9	4.2	72	20	16
-5.8411	-80.1067	1996	1	14	4	100	10	45
-6.2671	-80.4337	1996	5	10	4	80	12	10
-7.0217	-79.5740	1996	6	1	4	75	20	19
-6.1390	-79.7357	1996	7	22	4	72	18	59
-6.4493	-79.2481	1996	8	15	4.6	91	9	10
-6.6842	-80.5089	1996	8	25	4.7	74	1	15
-5.4884	-79.6939	1998	6	12	4.5	123	6	36
-5.4290	-79.5666	1998	6	29	4.5	89	5	49
-5.4392	-79.8884	1998	9	12	4.2	107	10	49
-5.2985	-79.2363	2000	1	15	4.6	122	19	51
-5.4280	-79.7790	2000	3	27	4.5	76.4	9	54
-6.4829	-79.0210	2000	7	21	4	102	20	42
-5.5398	-79.6784	2000	10	21	4.3	97	7	20
-5.6053	-79.4049	2000	12	12	4.5	91	5	29
-6.5503	-79.4553	2001	1	15	4	86	5	5
-5.7429	-79.7968	2001	9	8	4.1	78	12	21
-5.5556	-79.7822	2001	1	23	4	128	10	39
-5.6853	-80.0142	2002	1	23	4	84	9	41
-5.7357	-79.7364	2002	1	31	4.2	106	5	2
-5.8850	-80.0830	2003	12	9	4.6	100	8	38
-5.5991	-79.6814	2004	7	16	4.2	80	14	18
-5.5709	-79.7989	2004	9	28	4	72	9	44
-6.5357	-80.2563	2005	1	30	4.4	81	6	51
-5.9801	-79.4901	2005	2	12	4	98	13	48
-5.4917	-79.9271	2005	5	22	4.5	87	18	8
-6.5592	-79.2622	2005	11	27	4	98	16	48
-6.0190	-79.7619	2005	12	19	4	77	14	17
-6.3398	-79.4567	2006	11	23	4	91	3	49
-6.2020	-79.4863	2007	1	20	4	94	7	36
-5.5084	-79.2283	2007	1	22	4.5	111	10	47
-6.9119	-79.4872	2007	7	21	4	73	13	53
-5.6693	-80.0458	2007	10	13	4.5	75	1	34

-6.9961	-79.5551	2008	1	12	4.7	71	3	48
-6.1420	-79.7070	2008	3	16	4.6	73	12	37
-6.6540	-79.9780	2008	8	1	4.2	77	14	40
-5.7877	-79.9864	2009	7	7	4	76	18	27
-6.9300	-79.4024	2010	9	10	4.2	85	2	21
-7.0642	-80.5450	2012	1	5	4	76	14	2
-5.2805	-79.3020	2012	11	18	4.3	114	12	29
-5.5130	-79.6877	2013	1	15	4.2	91	5	55
-5.3392	-79.4033	2013	12	9	4	121	8	34
-6.5587	-79.5914	2014	2	8	4.1	79	1	35
-5.3606	-79.4150	2014	5	13	4.2	97	16	26
-6.1307	-79.2984	2014	6	24	4.2	103	20	31
-6.0049	-79.7768	2014	8	13	4	71	9	40
-5.4443	-79.3189	2014	10	26	4.5	115	2	7
-5.5628	-79.5940	2015	5	12	4.5	110	4	10
-5.2750	-79.5339	2015	6	2	4.3	112	4	30
-6.1360	-79.8010	2016	9	4	4	78	23	39
-6.5038	-80.6675	2016	11	9	4.6	81	15	1
-5.2792	-79.1069	2019	2	14	4	104	2	24
-5.4944	-79.5772	2019	3	24	4	98	9	55

IX.4 Anexo 04: Manual de ingreso de datos al Zmap

Paso 1: Descargar el programa Zmap en la página <http://www.seismo.ethz.ch/en/research-and-teaching/products-software/software/ZMAP/>



Requisitos

ZMAP 7 requiere MathWorks MATLAB® R2018a o superior con las siguientes cajas de herramientas:

- Caja de herramientas de creación de mapas [obligatorio]
- Caja de herramientas de estadísticas y aprendizaje automático [obligatorio]
- Caja de herramientas de computación en paralelo [opcional, habilita la computación en paralelo]
- Caja de herramientas de optimización [opcional, ZMAP actualmente funciona bien sin él]

ZMAP está alojado actualmente en GitHub en: <https://github.com/CelsoReyes/zmap7>

O haga clic [aquí](#) para descargar un archivo .zip

Figura 43: Página web del programa Zmap.

Paso 2: Abrir el Matlab y ejecutar el programa llamándolo con la palabra “Zmap”

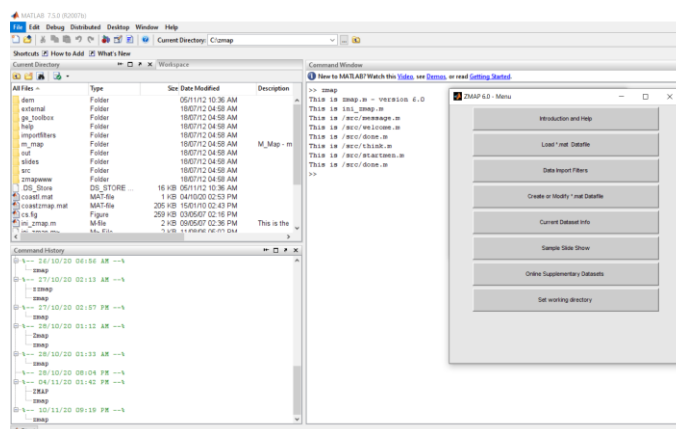


Figura 44: Ejecución del programa Zmap.

Paso 3: en este caso nuestros sismos se encuentran en archivos formato “.txt”, por lo cual seleccionaremos el botón que dice “Data Import Filters”.

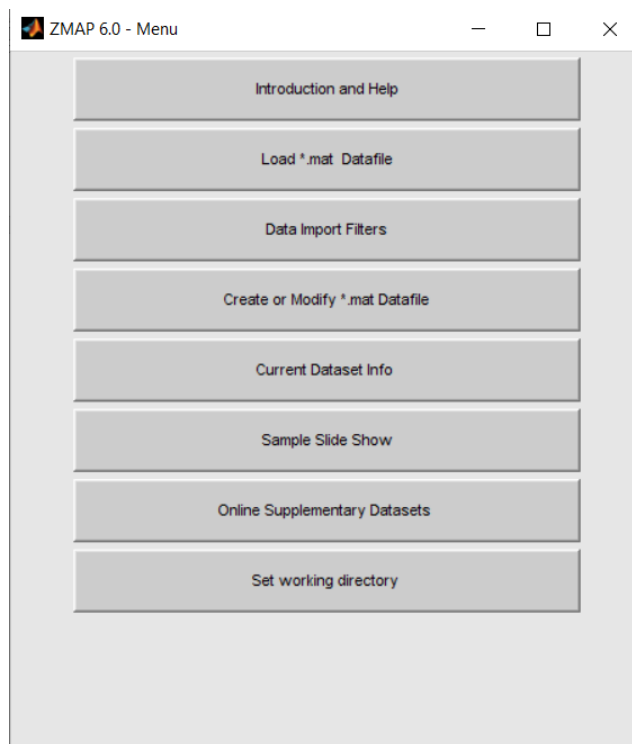


Figura 45: Menú del Zmap.

Paso 4: existen varias formas de cargar archivos, pero el block posee los datos separados por espacios en blanco y luego le damos “Import”.

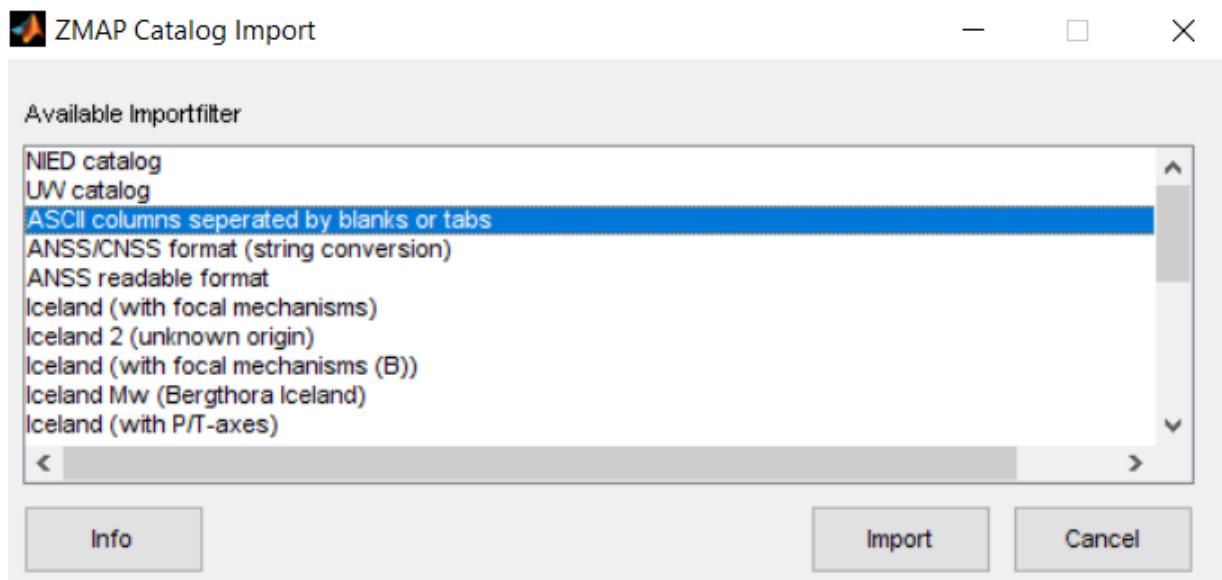


Figura 46: Menú de importación del catálogo.

Paso 5: Se busca el archivo a cargar y le damos y cargará el catálogo de manera automática.

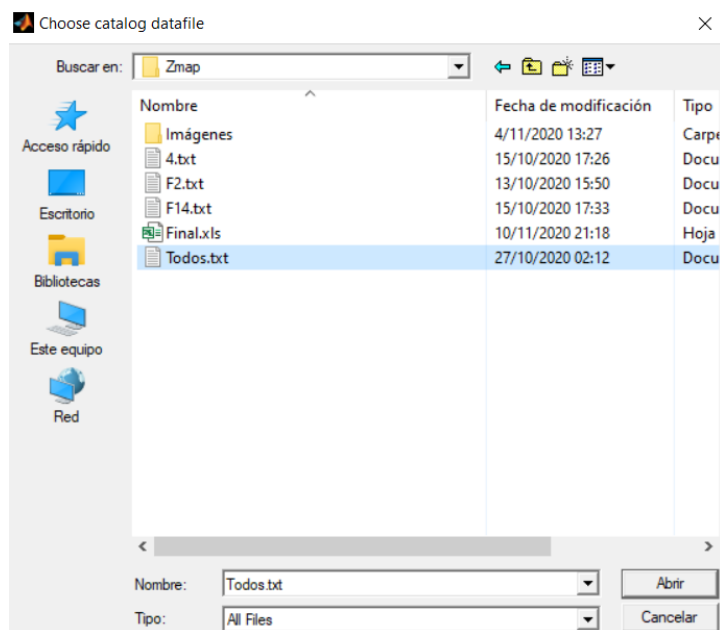


Figura 47: Archivo formato “.txt” importado.

Paso 6: Automáticamente aparece un cuadro resumen de los datos importados, donde se indica la cantidad de sismos del catálogo, la magnitud máxima, la magnitud mínima, el año de inicio del catálogo, el año final del catálogo, la mínima profundidad y la máxima profundidad. Después de ver esto le damos “Go” para que plotee los sismos según sus coordenadas.

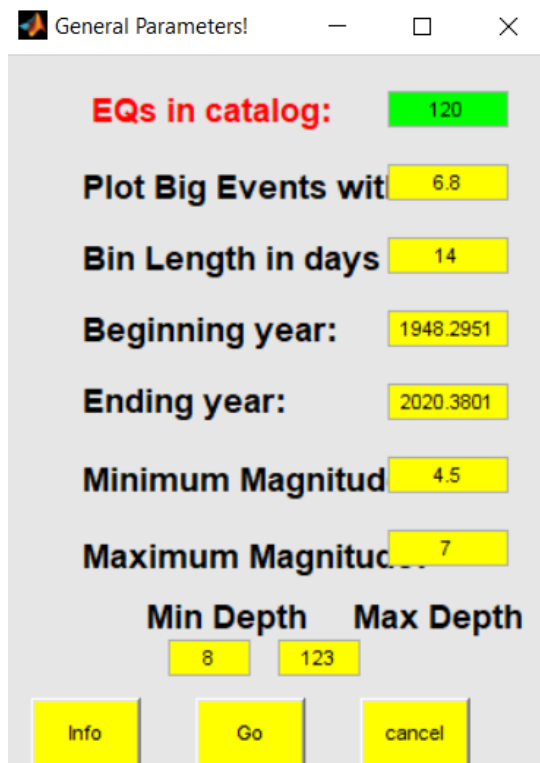


Figura 48: Parámetros generales del catálogo sísmico.

Paso 7: Vemos los datos ploteados por el programa, la estrella dentro del mapa indica la máxima magnitud existente en dicho catálogo.

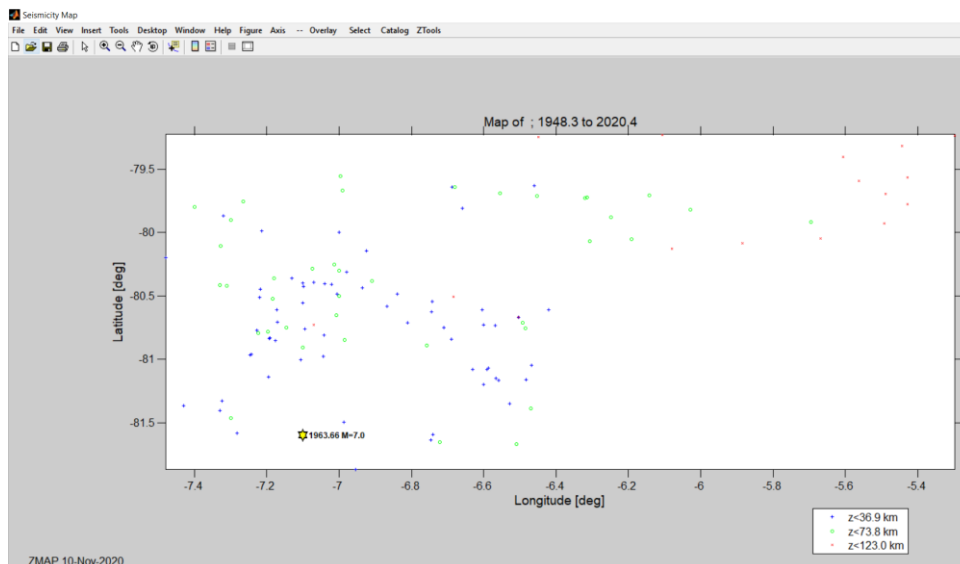


Figura 49: Ubicación de los sismos del catálogo.

Paso 8: Para hallar la gráfica de número acumulado de sismos, seleccionamos la pestaña “Ztools” y posterior a esto aparecerá una lista desplegable donde debemos hacer clic a “Analyse time series”

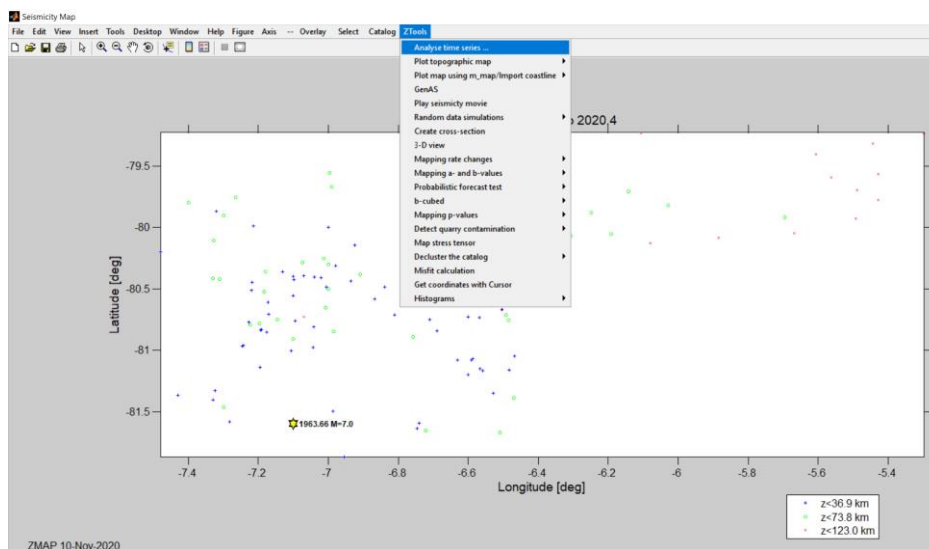


Figura 50: Proceso para hallar la gráfica de número acumulado de sismos.

Paso 9: Dentro de esta gráfica podemos seleccionar nuevamente la pestaña “Ztools”, seleccionamos la pestaña “Mc and b-value estimation” y luego “automatic” con el fin de hallar la gráfica de recurrencia para dicho catálogo sísmico.

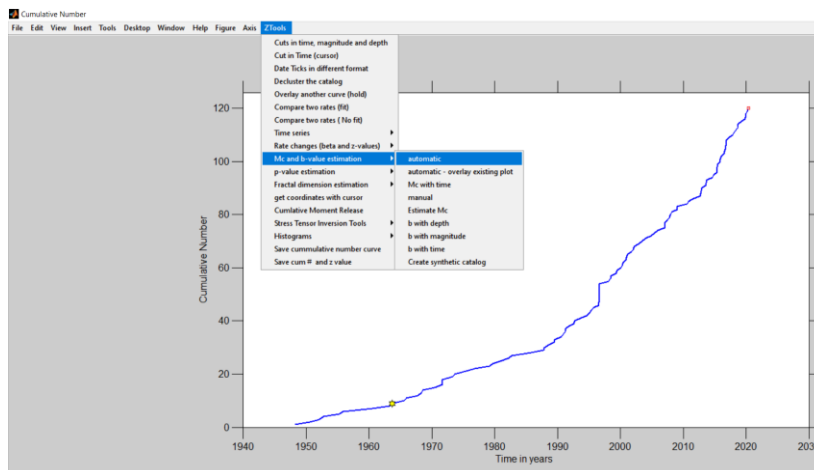


Figura 51: Procedimiento para determinar la recurrencia del catálogo.

Paso 10: Dentro de esta gráfica podemos seleccionar nuevamente la pestaña “Ztools”, seleccionamos la pestaña “Histograms” y seleccionamos el histograma que deseemos obtener ya sea de magnitud, profundidad, tiempo o horas del día.

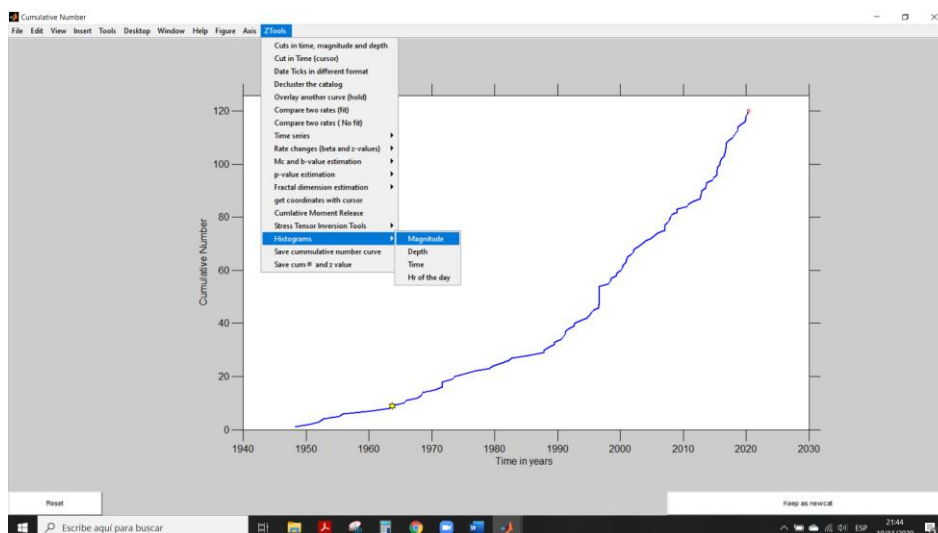


Figura 52: Procedimiento para hallar diferentes histogramas.

IX.5 Anexo 05: Manual de ingreso de datos al R-Crisis

Paso 1: Al abrir el programa nos aparece varias pestañas, donde se ingresan los datos será en la pestaña “Input”.

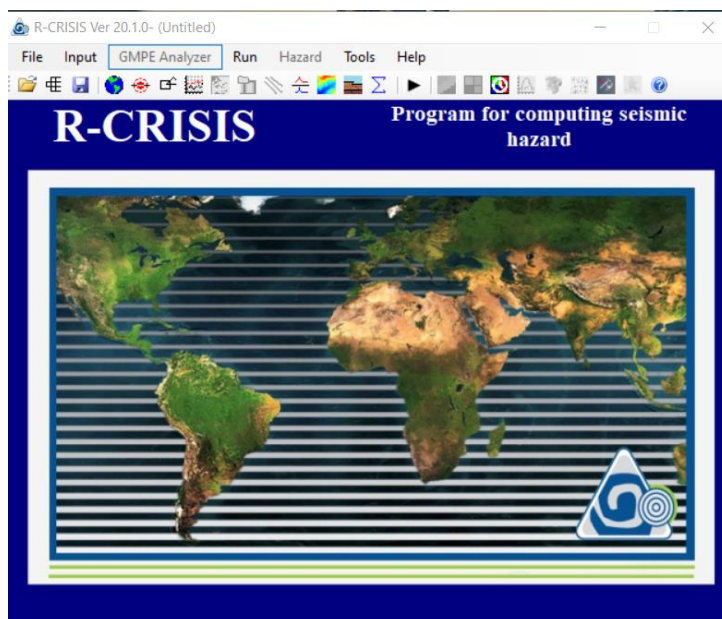


Figura 53: Interfaz inicial del programa.

Paso 2: El primer paso es cargar un mapa del lugar donde se realizará el análisis, para lo cual seleccionamos la opción “Maps (optional)” o también se puede ir directamente al botón donde aparece un mapa del mundo.

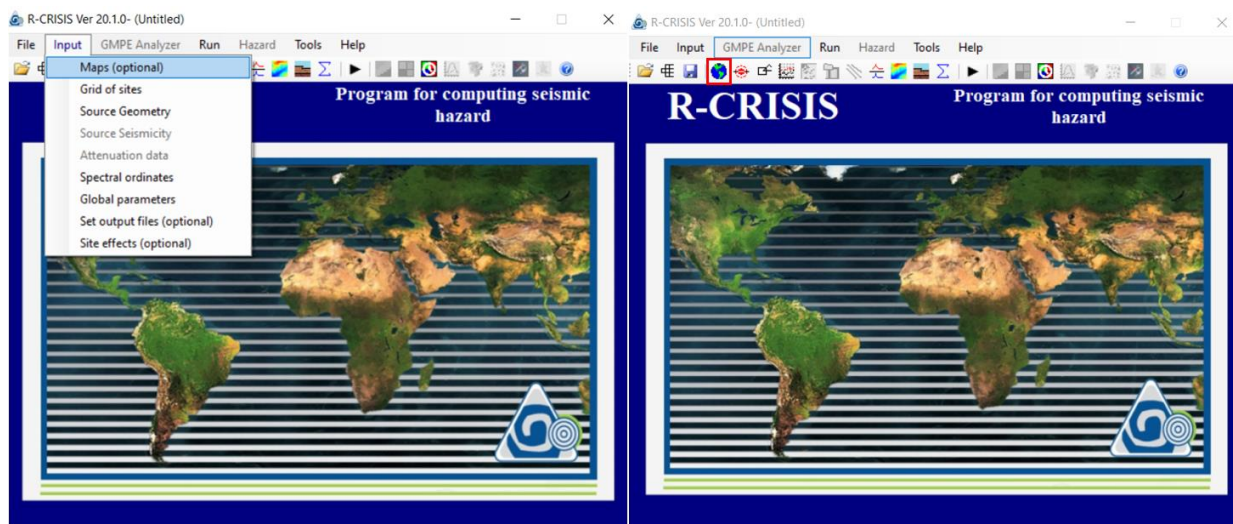


Figura 54: Maneras de acceder a la pestaña de mapas.

Paso 3: Se abrirá una pestaña donde nos aparecen dos opciones, la opción uno es cargar un mapa y la opción número dos es cargar ciudades dentro del mapa, luego de cargarlos se da clic al botón “exit”, es importante recalcar que los mapas deben estar en formato Shape “.shp” y las ciudades en formato “.asc”, si no se tiene dichos mapas en esos formatos el programa no los reconocerá.

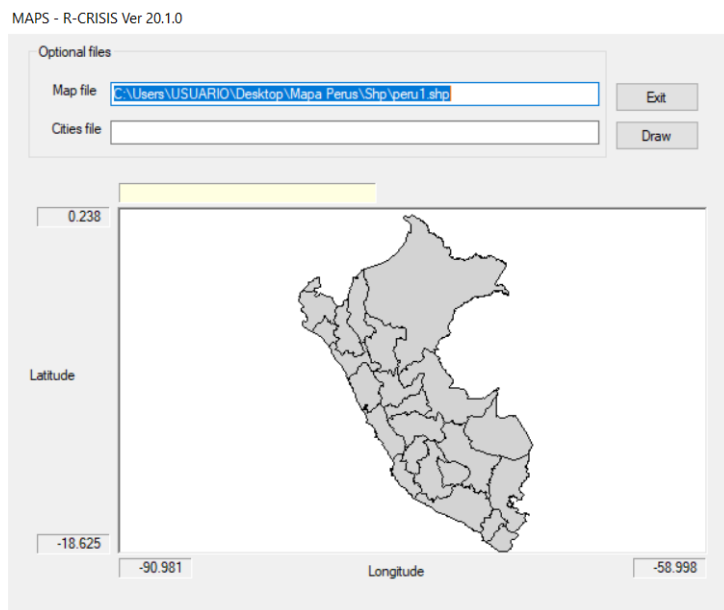


Figura 55: Pestaña donde se cargará el mapa.

Paso 4: Después de haber cargado los mapas, será necesario delimitar la grilla donde se realizará el estudio, para lo cual debemos seleccionar la subpestaña “Grid of sites”.

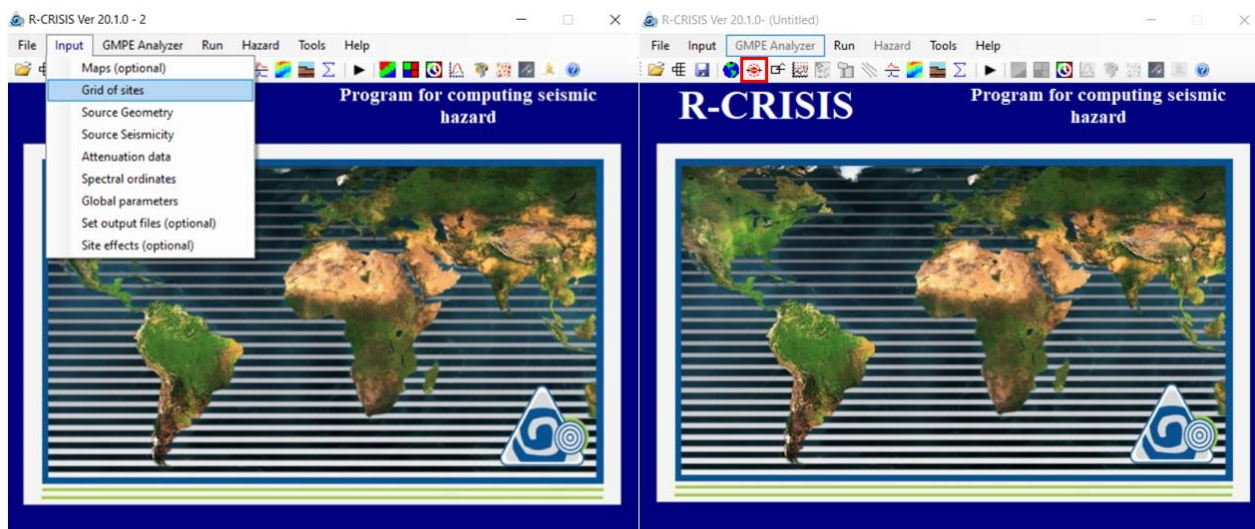


Figura 56: Maneras de acceder a la pestaña Grid of sites.

Paso 5: Posteriormente se selecciona la latitud y longitud donde comenzará la grilla, el incremento de la grilla y el número de líneas que conformará la grilla. Después se debe dibujar el polígono que abarcará el estudio dentro de la grilla.

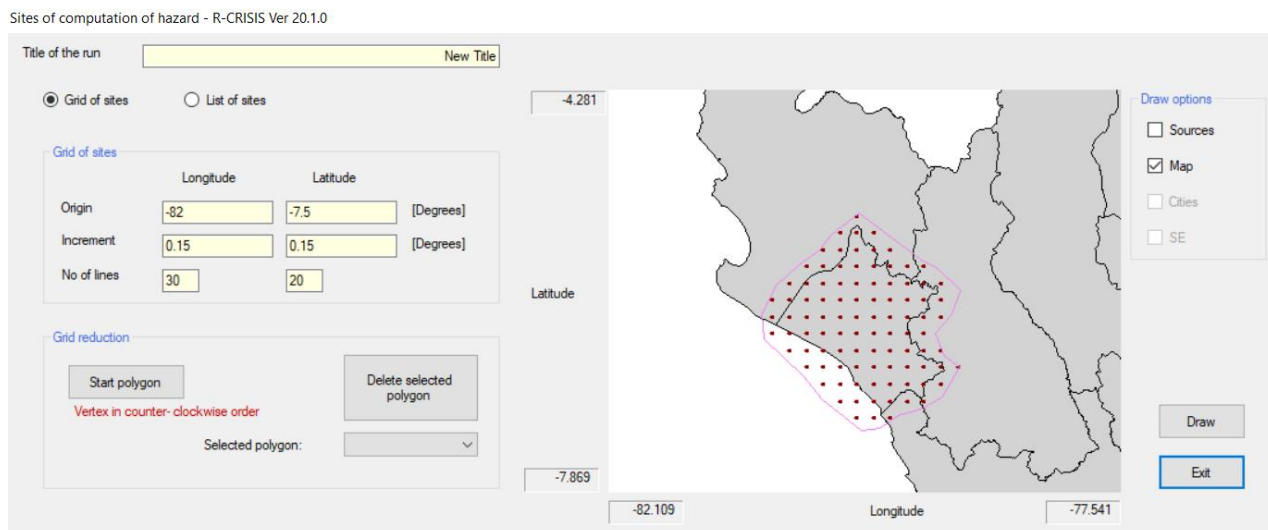


Figura 57: Pestaña de Grid of site.

Paso 6: Luego se necesita ingresar el polígono de la fuente sísmica, para lo cual existen dos maneras de ingresar como se observa en la siguiente imagen.

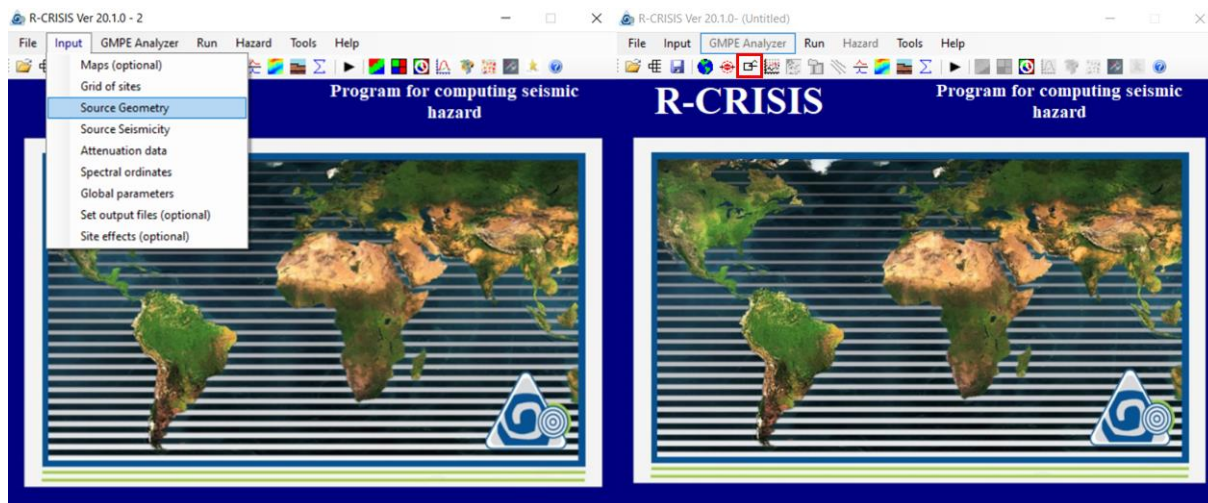


Figura 58: Maneras de acceder a la pestaña Source Geometry.

Paso 7: Una vez ya dentro de la pestaña lo primero que se debe hacer es añadir una fuente con el botón “Add new source”, luego colocar si la fuente será un área, una línea, etc. Posterior a esto se ingresa la latitud, longitud y profundidad de la fuente, estos datos se deben ingresar de manera horaria para que así se pueda dibujar el polígono como aparecen a lado izquierdo los datos en el mapa. Existen otros botones donde se puede ver la fuente en diferentes vistas XY, XZ, YZ, ver la triangulación interna de la fuente ingresada.

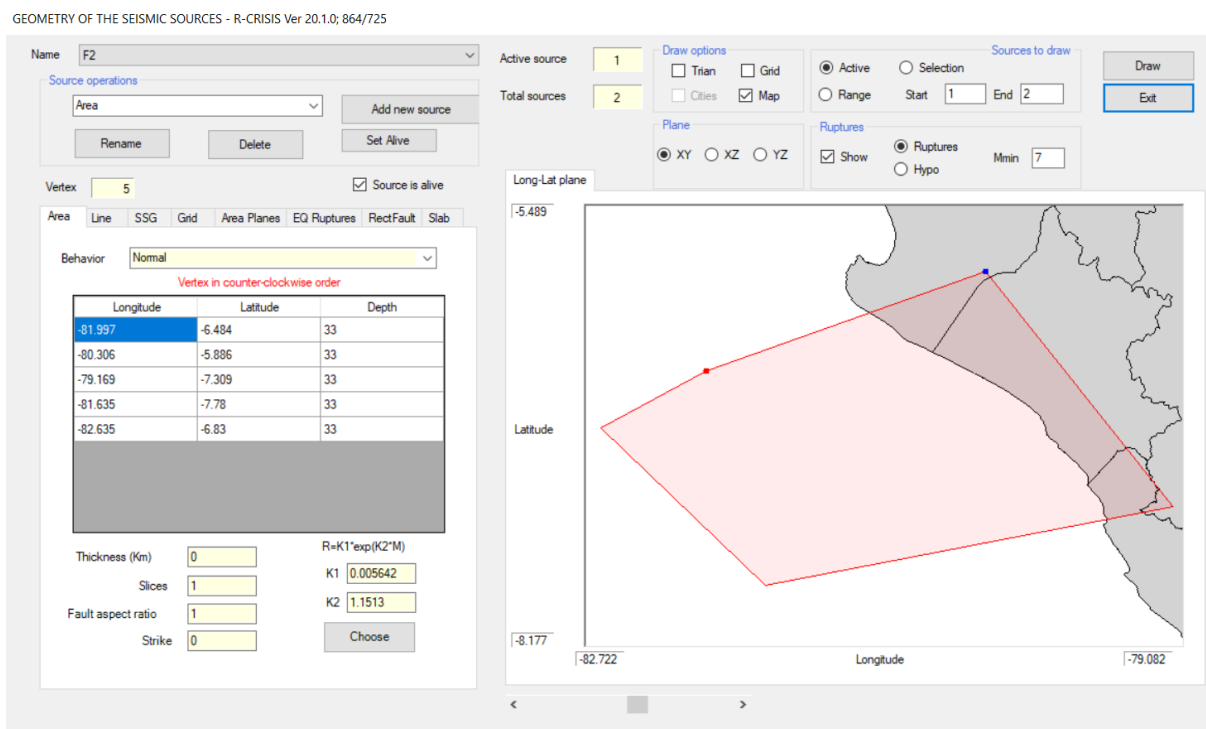


Figura 59: Pestaña Source Geometry.

Paso 8: También se debe ingresar los parámetros de cada fuente sismogénica como son los datos de tasa de recurrencia, magnitud mínima, máxima.

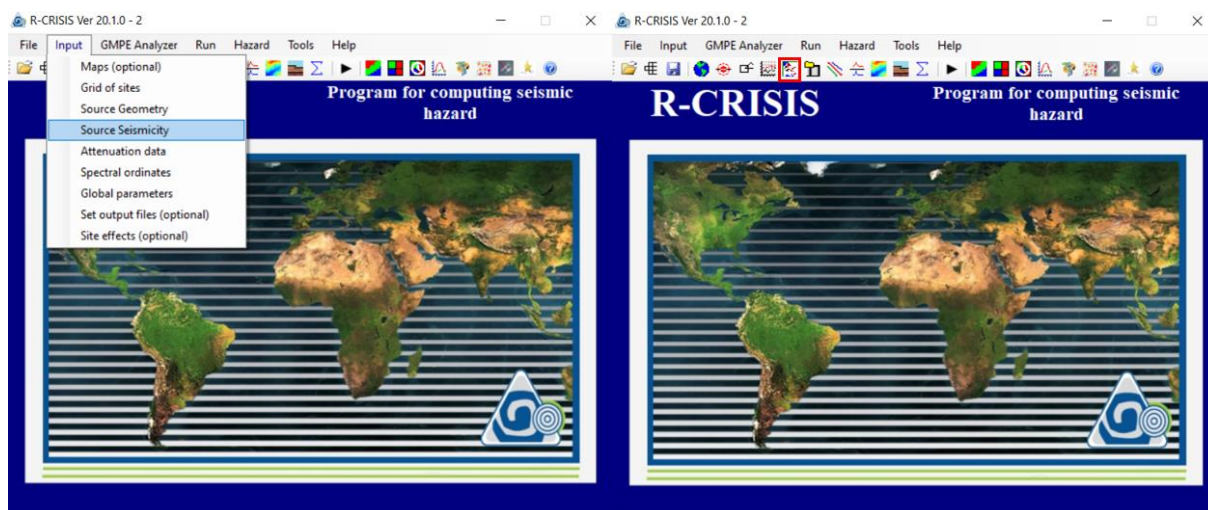


Figura 60: Maneras de acceder a la pestaña Source Seismicity.

Paso 9: Dentro de esta pestaña se ingresa los valores de la magnitud mínima, magnitud máxima, la tasa de recurrencia y el valor beta.

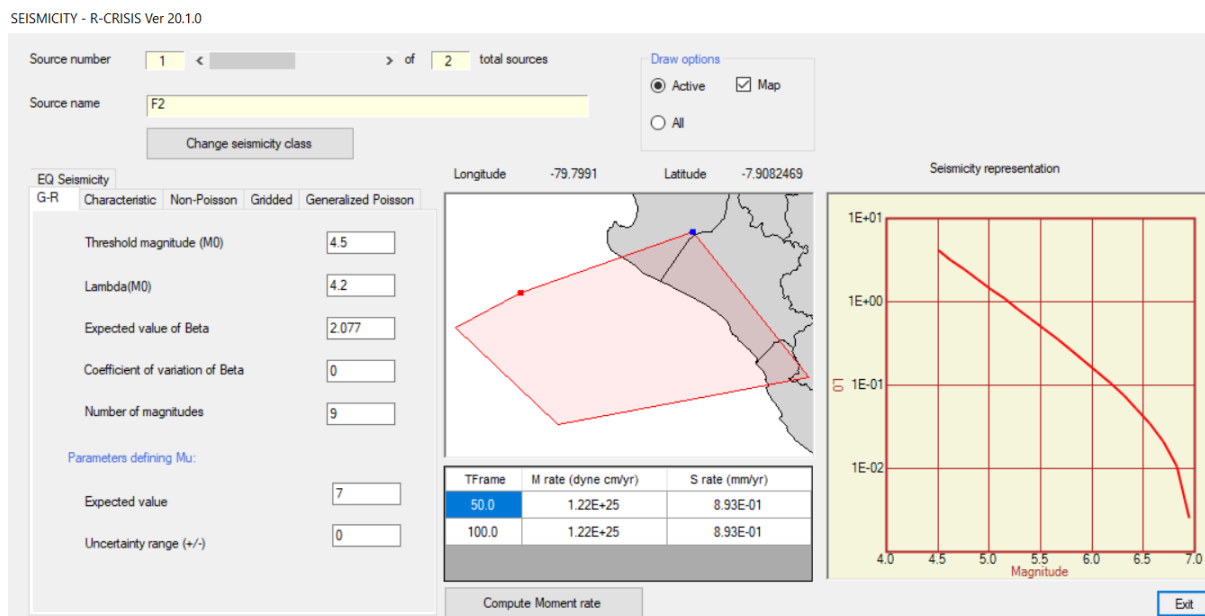


Figura 61: Pestaña Source Seismicity.

Paso 10: En cada fuente será necesario colocar la ley de atenuación de cada fuente sísmica. Existen dos maneras de ingresar a esta ventana.

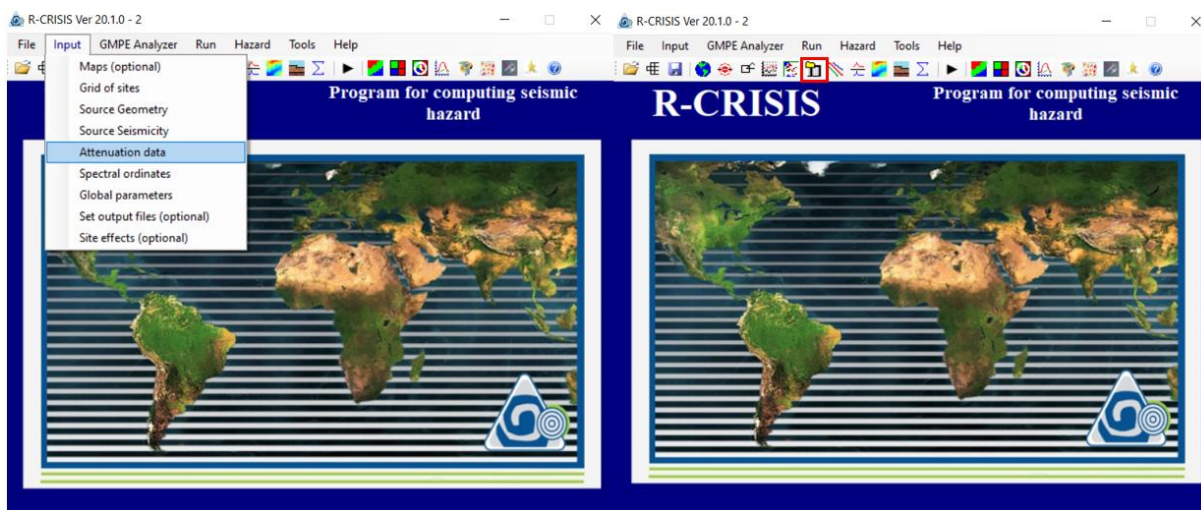


Figura 62: Maneras de acceder a la pestaña Attenuation data.

Paso 11: Se selecciona el botón “Add model”, donde aparecen diferentes leyes de atenuación, se elige la ley de atenuación de cada fuente y luego le damos “exit”

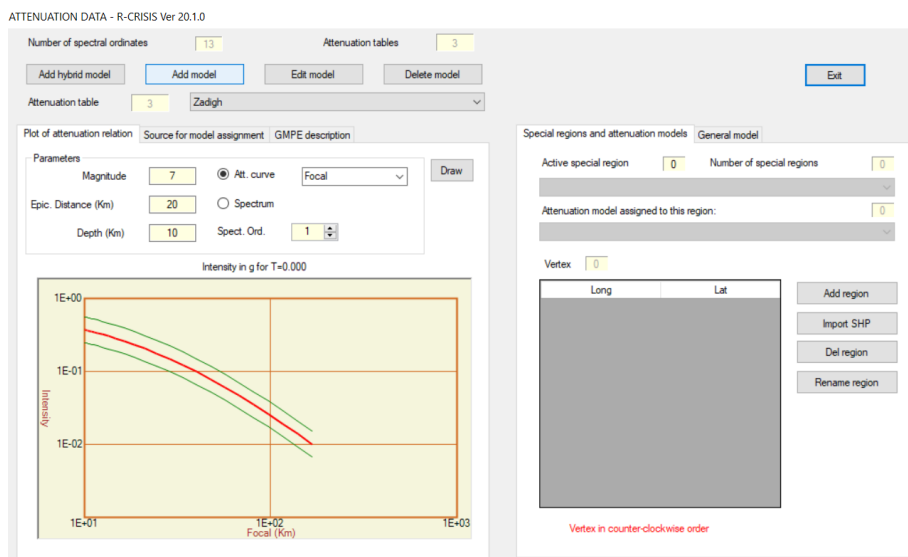


Figura 63: Pestaña Attenuation data.

Paso 12: Se adicionan las ordenadas espectrales al análisis, para lo cual se entra a esta pestaña a través de estas dos opciones.

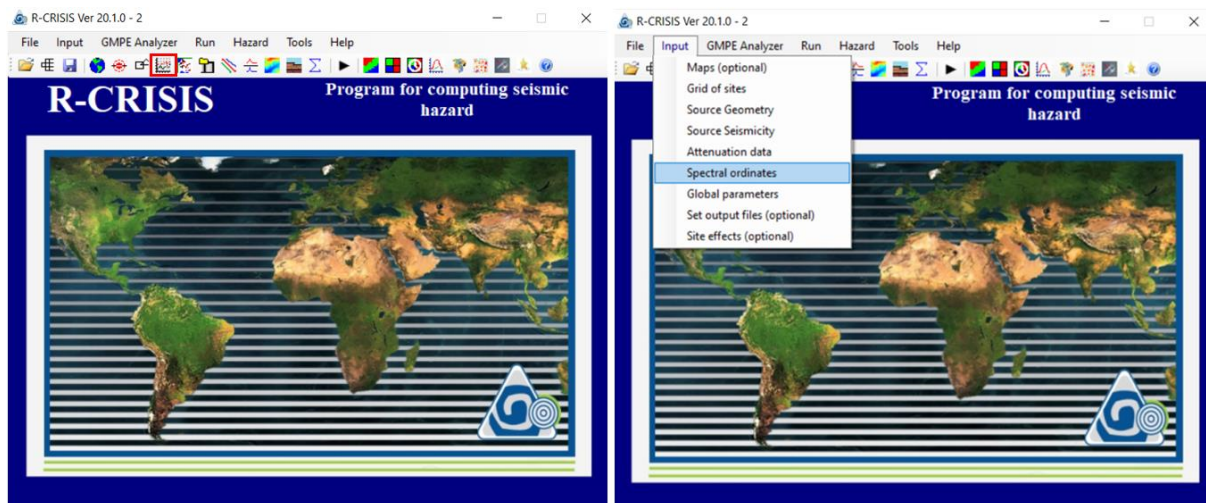


Figura 64: Maneras de acceder a la pestaña Spectral ordinates.

Paso 13: Primero se coloca el número de ordenadas espectrales que desea obtener, luego se coloca los periodos estructurales, el límite mínimo de intensidad, el máximo al podría llegar la intensidad de dicho estudio, como se presentarán los datos de manera logarítmica, linear, etc; se observa la unidad propia del programa la cual es gals (cm/s²).

INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - R-CRISIS Ver 20.1.0

Spectral ordinates

Total number of spectral ordinates: 13

Actual spectral ordinate: 1

Structural period of actual spectral ordinate: 0

Lower limit of intensity level: 0.01

Upper limit of intensity level: 2500

Spacing

Log Linear PEER Large PEER



General values

Units: gals

Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed: 10

Exit

Figura 65: Pestaña Spectral ordinates.

Paso 14: Se selecciona los formatos de salida de los datos, se da guardar  y le damos correr al programa utilizando el botón .

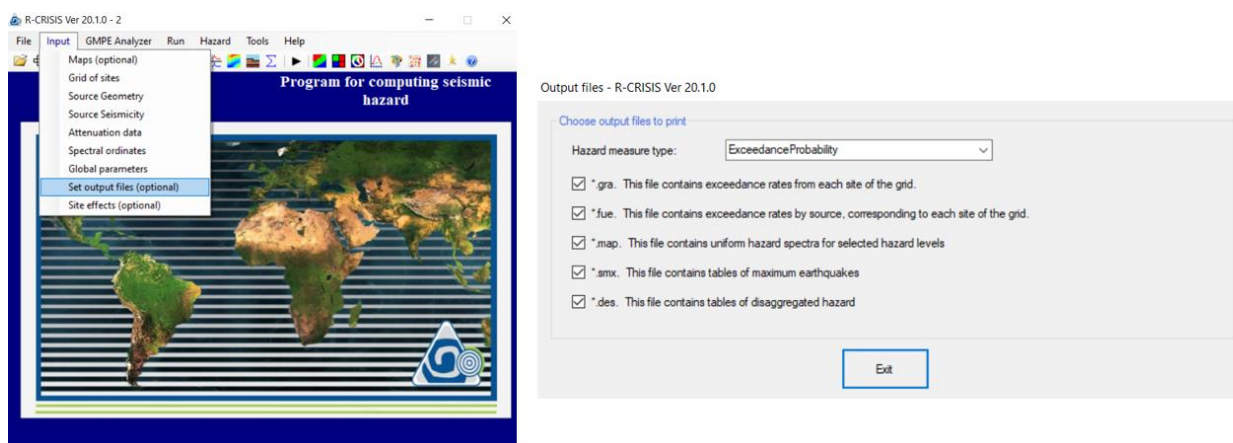


Figura 66: Manera de acceder a Set output files.

Paso 15: Hacemos clic en el botón “See Hazard maps” para poder visualizar los mapas.

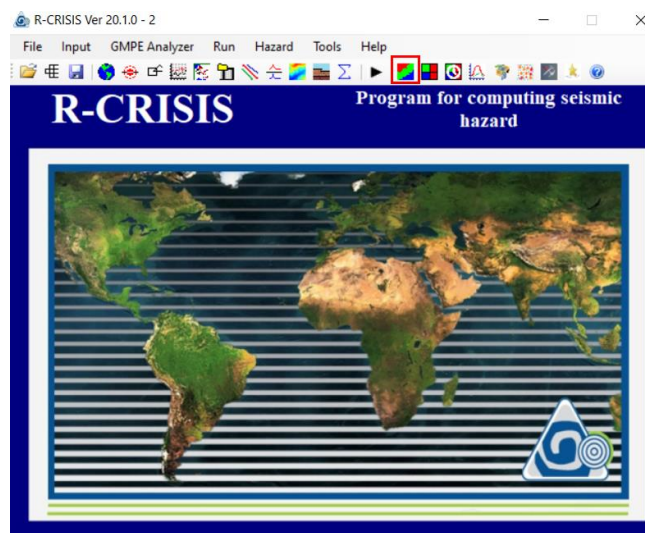



Figura 67: Manera de acceder a See Hazard maps.

Paso 16: Finalmente se puede seleccionar el periodo estructural, el tiempo de exposición; luego de esto se da guardar con el botón  y con esos datos exportados en formatos “.csv”, pueden abrirse en Civil 3d para poder realizar las curvas de aceleración para la zona.

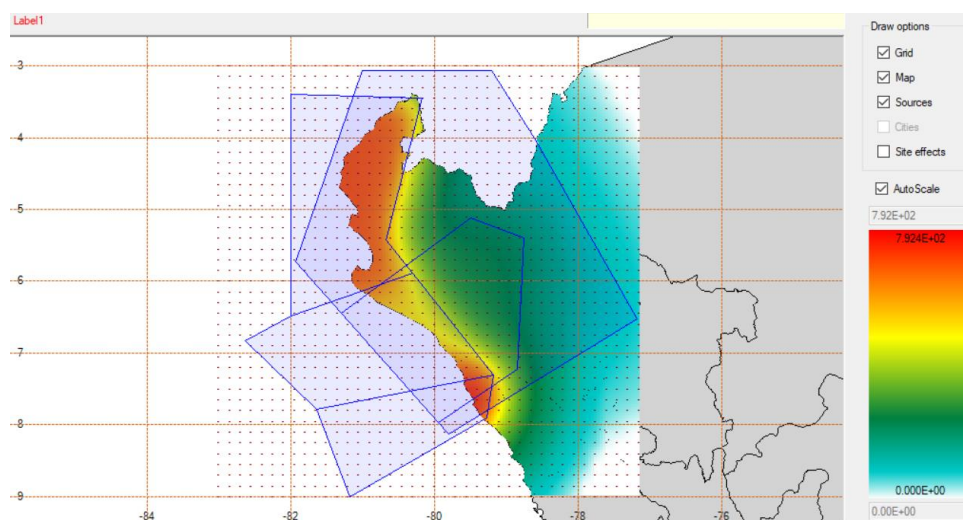
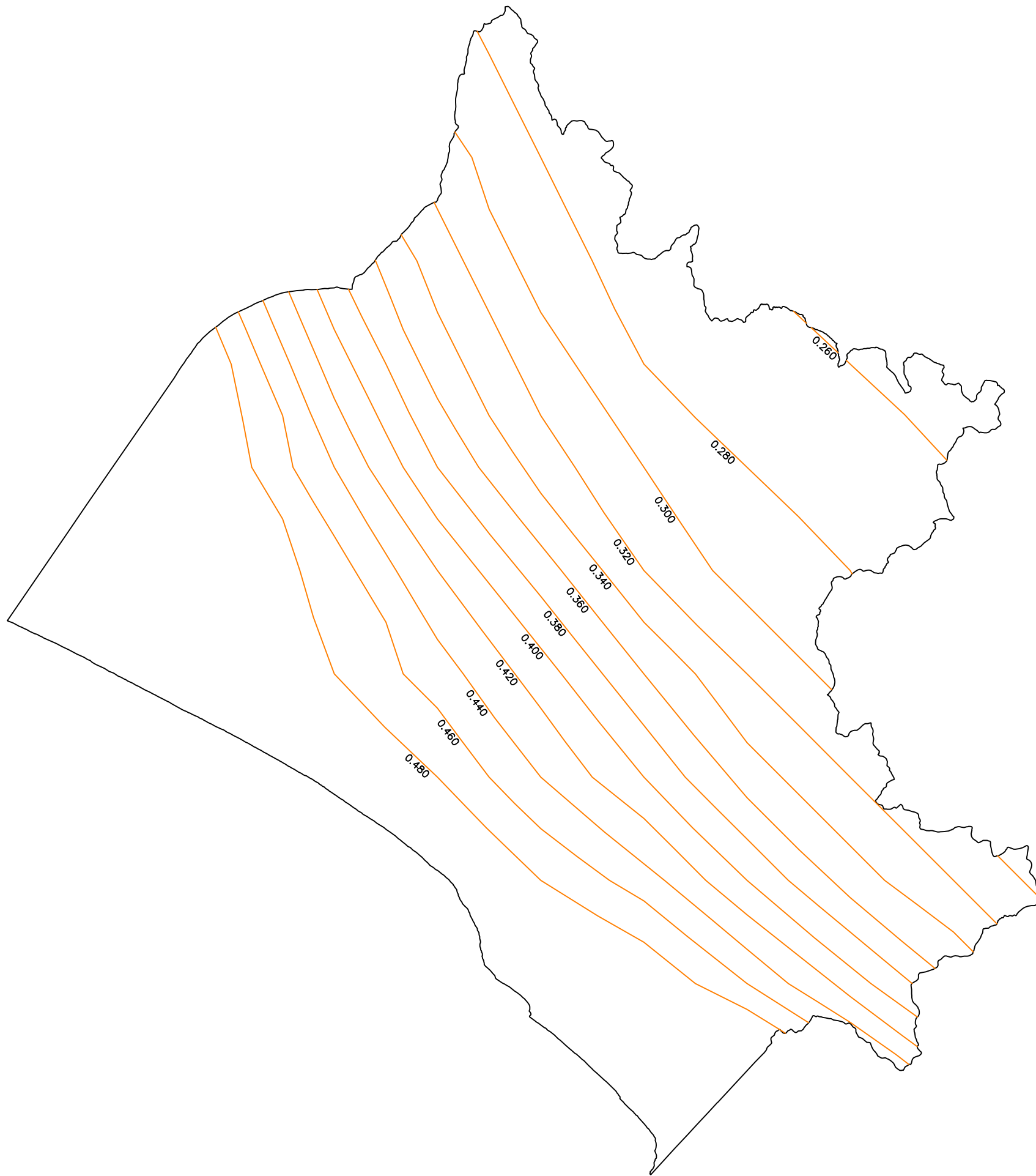
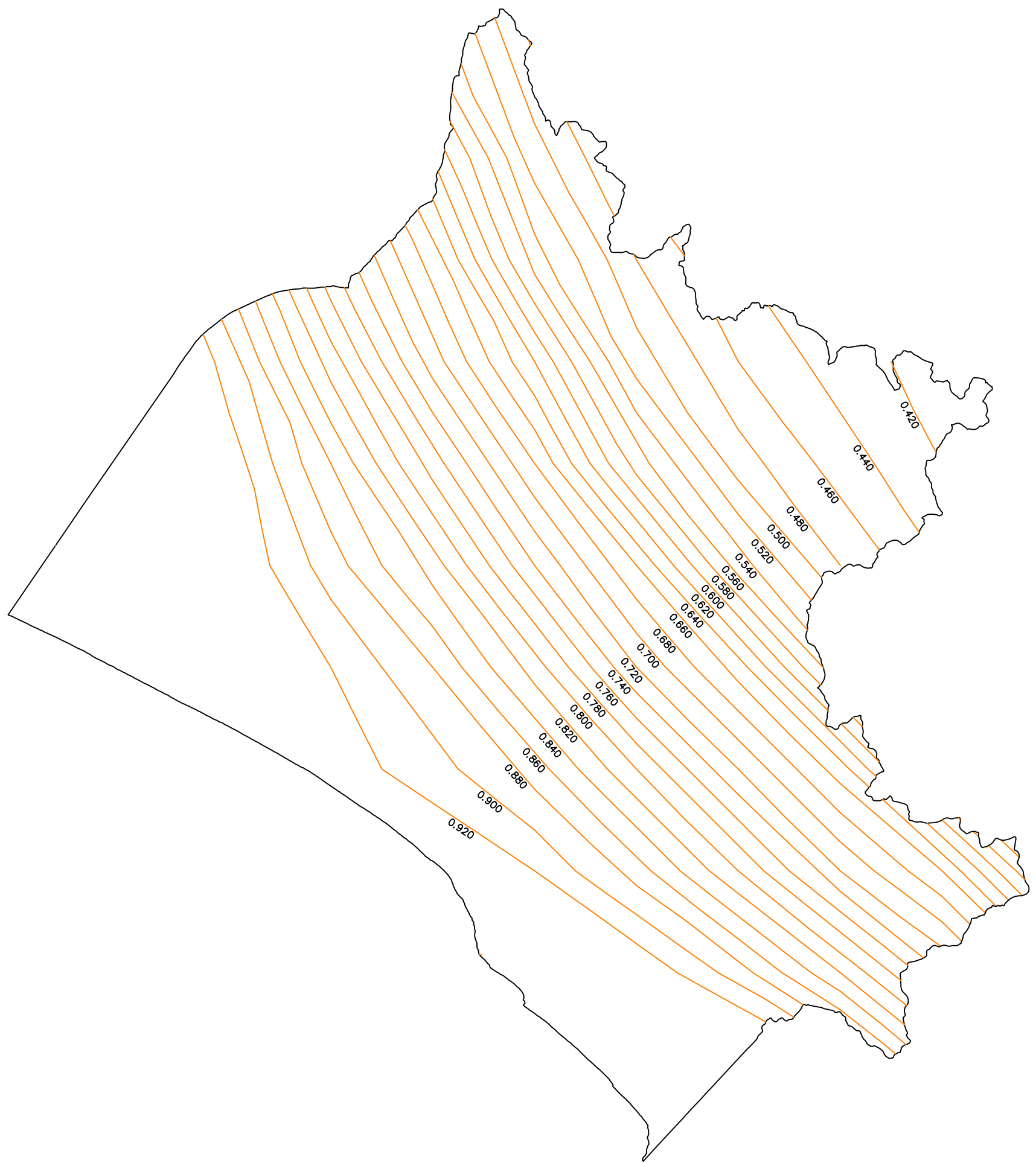



Figura 68: Visualización del mapa ya sus aceleraciones en gals.

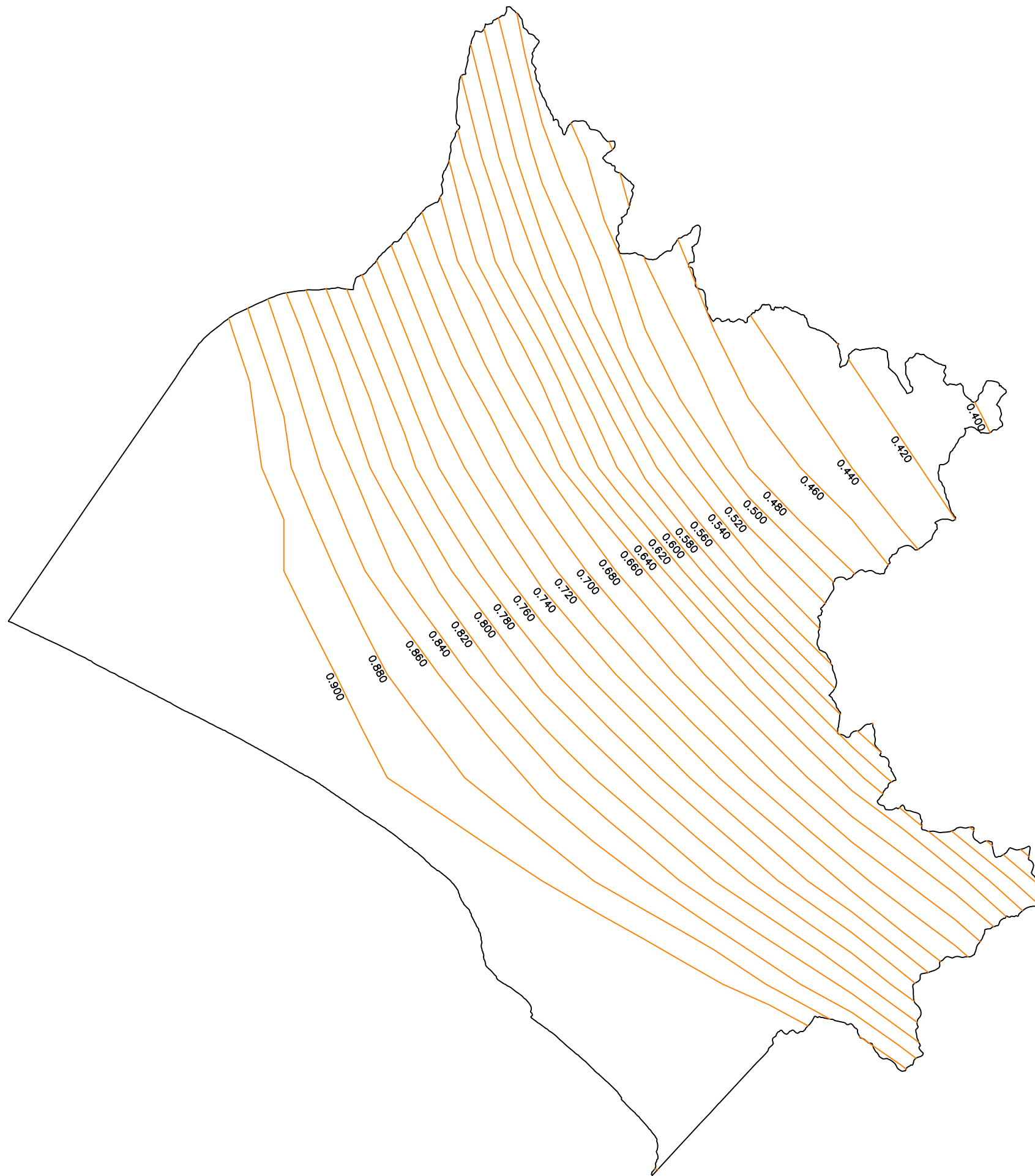
IX.6 Anexo 06: Mapas de Aceleraciones en el suelo para diferentes periodos estructurales.



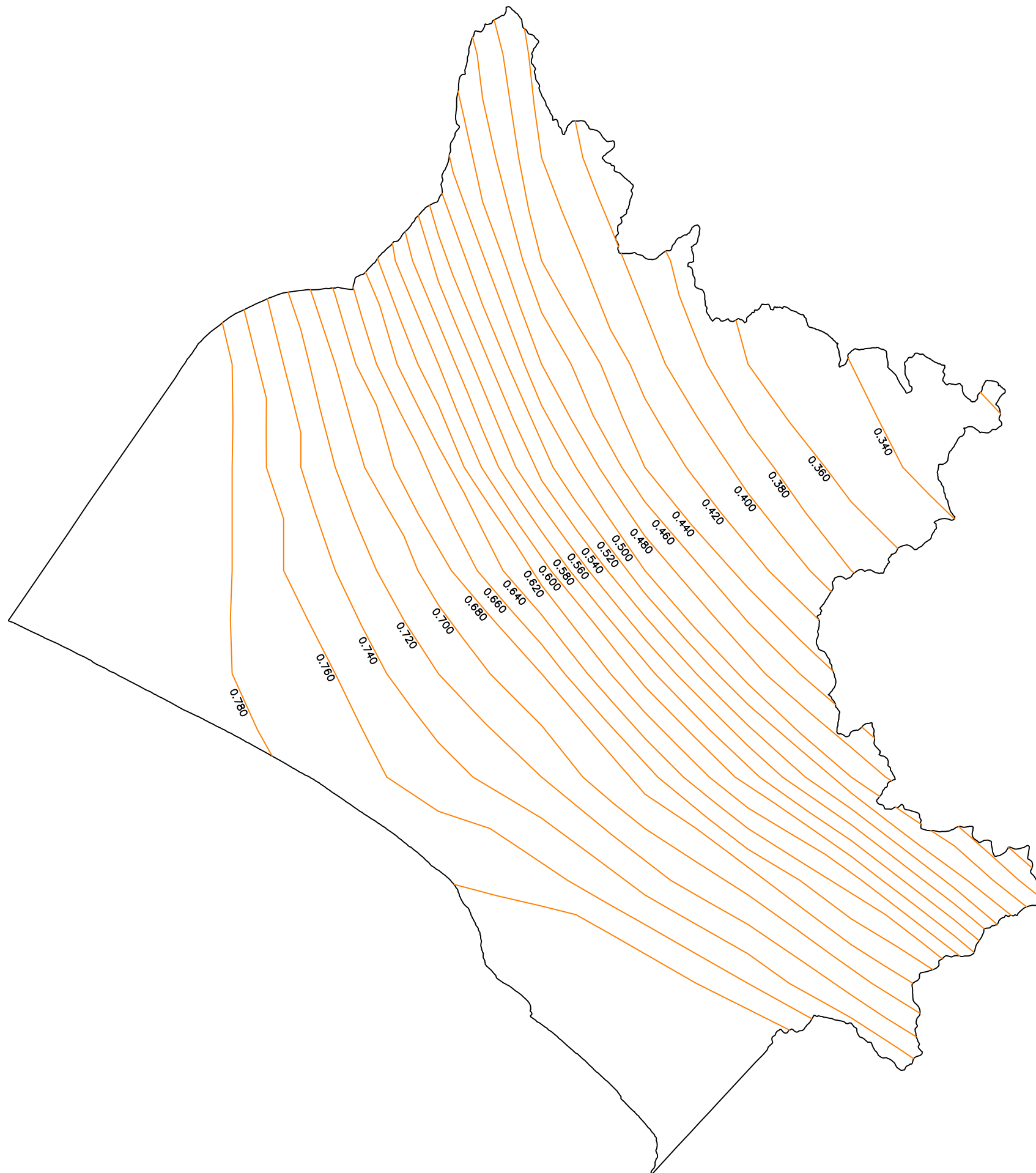
 Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.00 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-01
Probabilidad de Excedencial: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



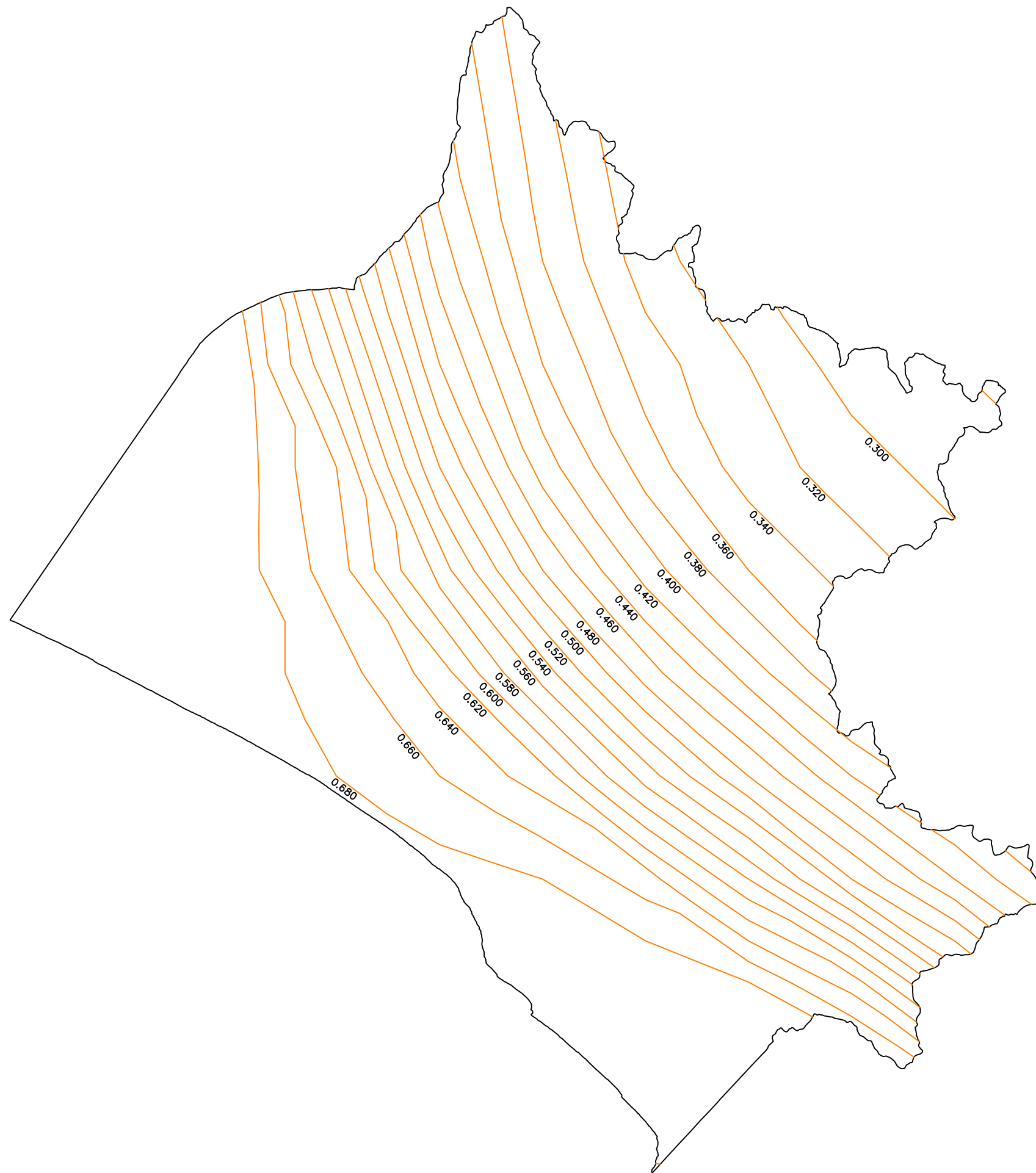
 USAT Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.10 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-02
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



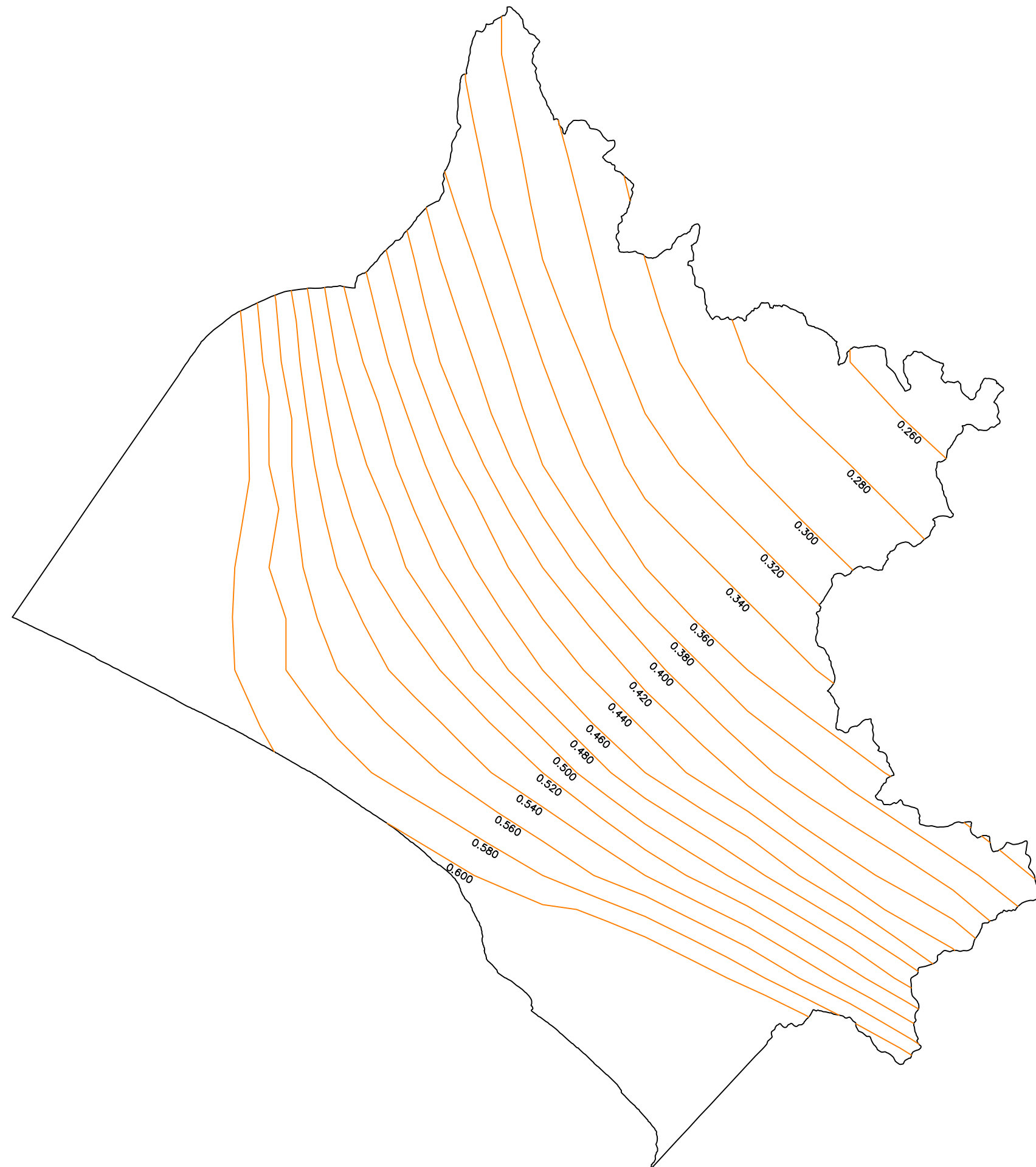
 USAT Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.20 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-03
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



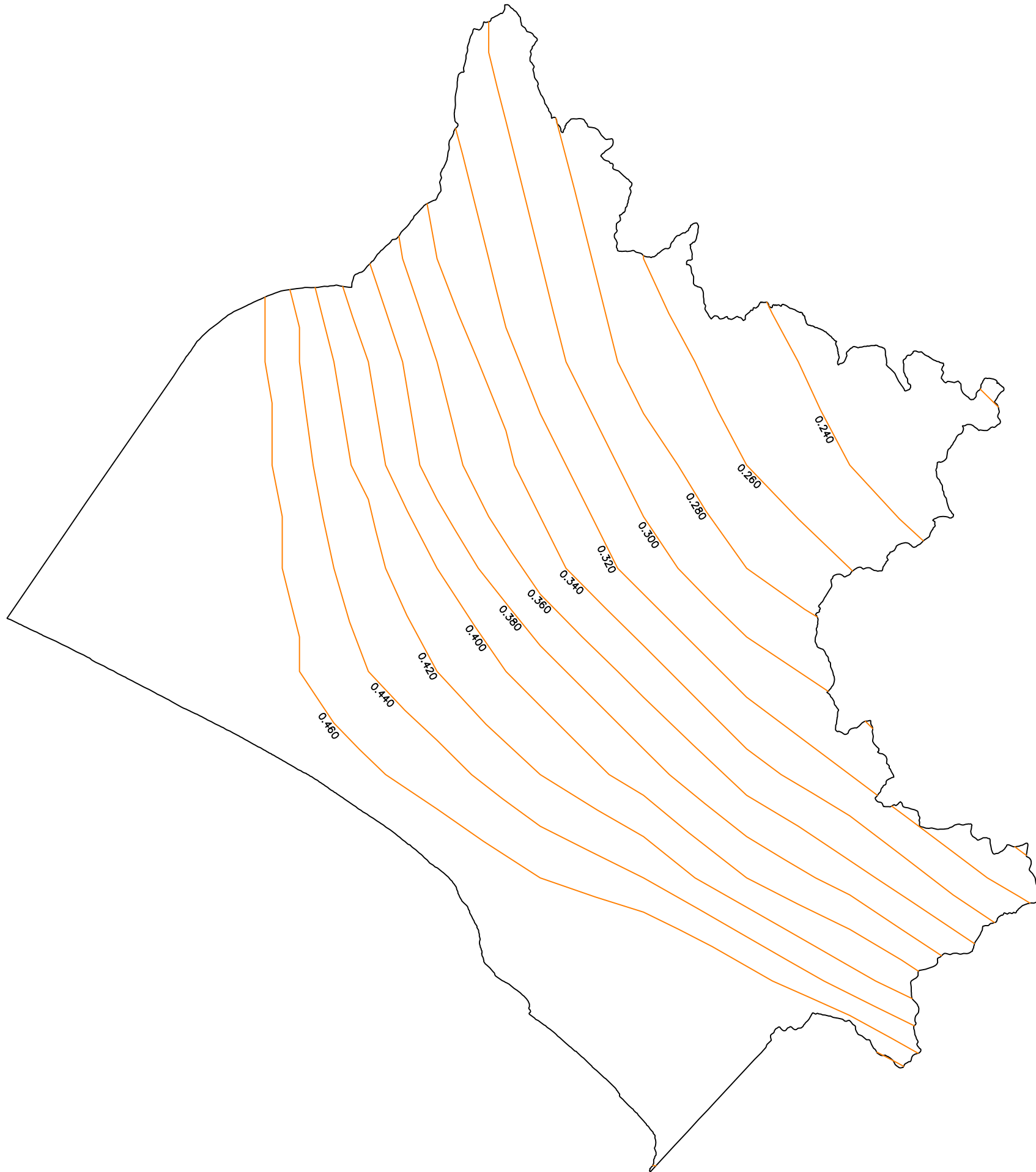
 Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.30 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-04
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



 USAT Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.40 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-05
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



 USAT Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.50 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-06
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	



 Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL	
	Tesis: PELIGRO SÍSMICO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE MEDIANTE EL MÉTODO DE PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS EN EL 2020	
MAPA DE ACELERACIONES EN SUELO RÍGIDO DEL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE		
Periodo Estructural: 0.60 segundos	Tiempo de Exposición: 50 años	P-07
Probabilidad de Excedencia: 10 %	Aceleraciones en función de la gravedad	