

Universidad Católica de Santa María
Escuela de Postgrado
Maestría en Gestión de Riesgo y Desarrollo Sostenible



**ÁREAS PROBABLES A SER AFECTADAS POR GRANDES TERREMOTOS EN
EL BORDE OCCIDENTAL DE ECUADOR, PERU Y CHILE: ESTIMACION DE
PERIODOS DE RETORNO BASADO EN LA DISTRIBUCION DE VALORES DE
B, PERIODO 1973 – 2020**

Tesis presentada por el Bachiller:

Aguilar Puruhuaya, Emeterio Víctor

Para optar del Grado Académico de:

**Maestro en Gestión de Riesgo y Desarrollo
Sostenible**

Asesor:

Mg. Ticona Baldarrago, Augusto Isrrael

Arequipa – Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
ESCUELA DE POSTGRADO
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 30 de Agosto del 2023

Dictamen: 005170-C-EPG-2023

Visto el borrador del expediente 005170, presentado por:

2008000011 - AGUILAR PURUHUAYA EMETERIO VICTOR

Titulado:

**ÁREAS PROBABLES A SER AFECTADAS POR GRANDES TERREMOTOS EN EL BORDE
OCCIDENTAL DE ECUADOR, PERÚ Y CHILE: ESTIMACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO BASADO
EN LA DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE B, PERIODO 1973 - 2020**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**08831172 - PAJUELO PONCE ELENA ROSSANA
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**44087928 - VILLANUEVA PAREDES KAREN SOLEDAD
DICTAMINADOR**



ÁREAS PROBABLES A SER AFECTADAS POR GRANDES TERREMOTOS EN EL BORDE OCCIDENTAL DE ECUADOR, PERU Y CHILE: ESTIMACION DE PERIODOS DE RETORNO BASADO EN LA DISTRIBUCION DE VALORES DE B, PERIODO 1973 - 2020

INFORME DE ORIGINALIDAD

28%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.utea.edu.pe

Fuente de Internet

5%

2

dokumen.tips

Fuente de Internet

4%

3

documentop.com

Fuente de Internet

3%

4

www.buenastareas.com

Fuente de Internet

2%

5

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

2%

6

tr.scribd.com

Fuente de Internet

2%

7

www.csn.uchile.cl

Fuente de Internet

2%

bibliotecadigital.ciren.cl

8	Fuente de Internet	1 %
9	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	1 %
10	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	1 %
11	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	1 %
12	doczz.net Fuente de Internet	1 %
13	memoriachilena.cl Fuente de Internet	1 %
14	revistas.uap.edu.pe Fuente de Internet	1 %
15	diariocorreo.pe Fuente de Internet	1 %
16	anmperu.org.pe Fuente de Internet	1 %
17	updocs.net Fuente de Internet	1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1 %

Excluir bibliografía

Apagado

AGRADECIMIENTOS

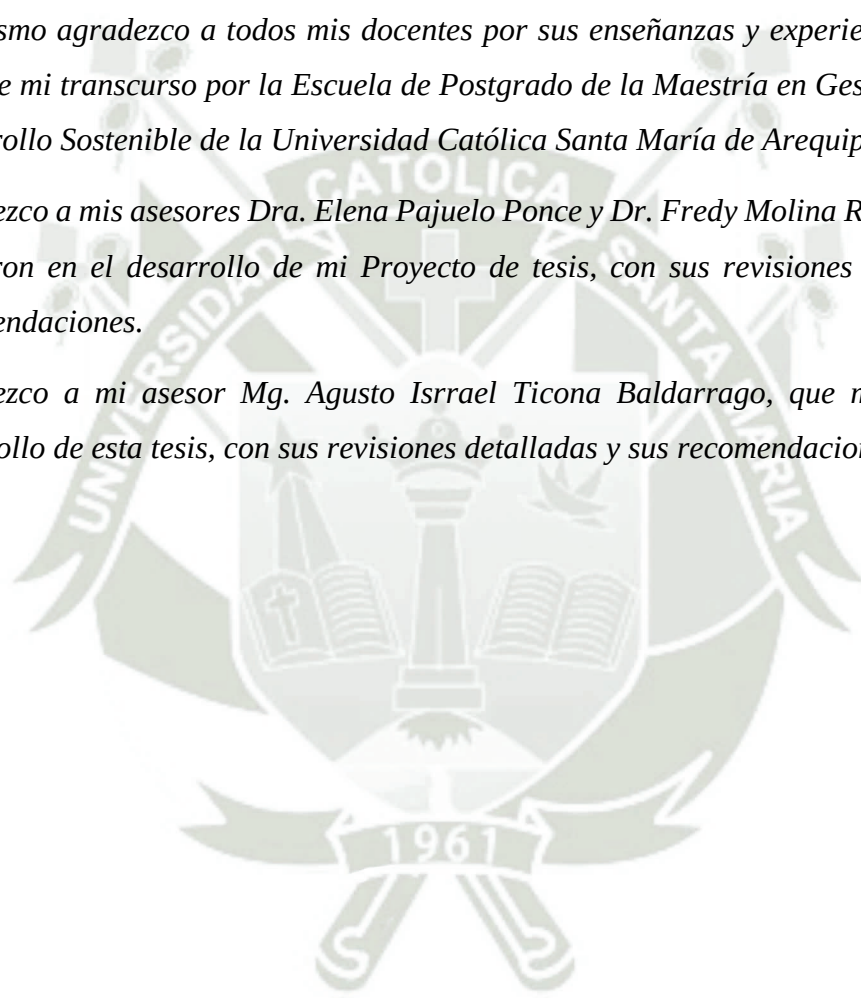
Quiero brindar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me apoyaron en mi formación como profesional.

Agradezco a mi esposa, Delmira Frisancho Maydana, hijas Mercedes, Viky y mi hijo Pablo, por su motivación y apoyo para superar los retos y obstáculos presentados y que ellos me encaminaron a buscar la mejor solución.

Así mismo agradezco a todos mis docentes por sus enseñanzas y experiencias impartidas durante mi transcurso por la Escuela de Postgrado de la Maestría en Gestión del Riesgo y Desarrollo Sostenible de la Universidad Católica Santa María de Arequipa.

Agradezco a mis asesores Dra. Elena Pajuelo Ponce y Dr. Fredy Molina Rodríguez, que me ayudaron en el desarrollo de mi Proyecto de tesis, con sus revisiones detalladas y sus recomendaciones.

Agradezco a mi asesor Mg. Augusto Isrrael Ticona Baldarrago, que me ayudó con el desarrollo de esta tesis, con sus revisiones detalladas y sus recomendaciones.



DEDICATORIA

A mi esposa:

Delmira Frisancho Maydana

A mis hijas e hijo:

Mercedes, Viky y Pablo.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	4
OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	6
1. Marco Teórico	7
1.1. Principales elementos tectónicos de Ecuador, Perú y Chile.....	7
1.1.1. Sismicidad Histórica de Ecuador.....	7
1.1.2. Sismicidad Instrumental de Ecuador	10
1.1.3. Principales Elementos Tectónicos de Perú.....	11
1.1.4. La Dorsal de Nazca.....	13
1.1.5. La Fractura de Mendaña	13
1.1.6. La Fosa Perú – Chile	13
1.1.7. La Cordillera Andina	14
1.1.8. La Cadena Volcánica.....	14
1.1.9. Los Sistemas de Fallas.....	15
1.1.10. Sismicidad Histórica del Perú.....	16
1.1.11. Sismos Históricos del Perú.....	19
1.2. Sismicidad Instrumental del Perú.....	28
1.2.1. Fuentes Sismogénicas de Chile	29
1.3. Sismos Interplaca (40 - 60 km de profundidad)	30
1.4. Sismos Intraplaca de profundidad intermedia (50 – 250 km de profundidad)	30
1.5. Sismos Superficiales o Corticales (< 60 km de profundidad)	30
1.6. Sismos Outer-Rise (< 30 km de profundidad).....	31

1.7.	Sismicidad Histórica de Chile	32
1.8.	Sismos Importantes de Chile	34
1.9.	Sismicidad Instrumental de Chile.....	41
1.9.1.	Distribución Espacial de las Áreas de Ruptura y Lagunas Sísmicas en el borde Occidental de Sudamérica	43
1.10.	Análisis de antecedentes investigativos.....	50
CAPÍTULO II METODOLOGÍA		56
1.	Metodología.....	57
1.1.	Modelos de Ruptura, Relación Frecuencia – Magnitud de Wiemer y Wyss.....	57
1.1.1.	Modelos de Rupturas	57
1.1.2.	Modelo de Asperidades.....	58
1.2.	Relación Frecuencia - Magnitud.....	60
1.3.	Distribución de Magnitudes.....	61
1.4.	Parámetros “a” y “b”	61
1.5.	Variaciones del Parámetro “b”	63
1.6.	Método de Wiemer y Wyss (Z-MAP)	64
1.7.	Periodo de Recurrencia.....	65
1.8.	Análisis y Selección de la base de datos	66
1.9.	Catálogo base de datos del NEIC	66
1.10.	Análisis Estadístico y Homogenización del Catálogo	66
1.11.	Procedimiento para Analizar la zona de Estudio.....	68
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN		74
1.	Resultados y Discusión.....	75
2.	Asperidades encontradas en el borde Occidental de Sudamérica.....	78
CONCLUSIONES.....		81
RECOMENDACIONES		83

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sismos Históricos del Ecuador con intensidades mayores a VIII	8
Tabla 2 Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Ecuador desde 1906 a 2016.	10
Tabla 3 Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde al año 1500, según Silgado y Dorbath et al. Modificado por (Víctor Aguilar).....	27
Tabla 4 Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el Borde Oeste de Sudamérica desde el año 1500 ($M_w \geq 8$)	44
Tabla 5 Resultados del cálculo del parámetro de “b” para diferentes regiones tectónicas (zonas de subducción, sistemas de fallas activas, volcanes activos).	64
Tabla 6 Asperezas ubicadas en el borde occidental de Ecuador denotando valores mínimos de “b”	79
Tabla 7 Asperezas ubicadas en el borde occidental de Perú denotando valores mínimos de “b”	79
Tabla 8 Asperezas ubicadas en el borde occidental de Chile denotando valores mínimos de “b”	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de los principales rasgos tectónicos presentes en la placa de Nazca y el borde Occidental de Sudamérica.	3
Figura 2 Mapa de la sismicidad histórica de Ecuador desde 1541	9
Figura 3 Mapa Sísmico de Ecuador, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020.	11
Figura 4 Principales elementos tectónicos superficiales presentes en continente y en el borde Oeste del Perú.....	12
Figura 5 Distribución de la actividad sísmica del Perú (1513 y 1959) según Silgado (1978).	ggg18
Figura 6 Mapa Sísmico del Perú, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020.	29
Figura 7 Perfil esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC, registrada entre 1973 y 2007	31
Figura 8 Distribución de sismos importantes desde 1800 al presente de Chile con relación al lugar y al tiempo.....	33
Figura 9 Sismos importantes de Chile desde el año 1570 hasta el presente.....	41
Figura 10 Mapa Sísmico de Chile, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020	42
Figura 11 Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XVI y XVII.....	46
Figura 12 Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XVIII y XIX	47
Figura 13 Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XX y XXI.	49
Figura 14 Modelos de ruptura sísmica a) barreras y b) asperezas.....	59
Figura 15 Representación de la Frecuencia Magnitud de los sismos en función del parámetro “b”	62

Figura 16 Gráfica de la distribución de frecuencia - magnitud representando los valores del parámetro "b"	65
Figura 17 Resultados del análisis de datos del catálogo sísmico del NEIC	67
Figura 18 Curva de magnitud de Completitud (Mc)	67
Figura 19 Histogramas de sismos acumulativos período (1973-2020)	68
Figura 20 Programa Zmap	69
Figura 21 Cuadro de dialogo del programa	70
Figura 22 Cuadro de dialogo del programa donde nos muestra más opciones	70
Figura 23 Nos muestra que formato debemos de elegir	71
Figura 24 El cuadro de dialogo nos muestra como es el formato de datos	71
Figura 25 Nos muestra los diferentes parámetros que tiene el programa.....	72
Figura 26 Mapa preliminar de los sismos que nos muestra para el estudio	72
Figura 27 Cuadro de dialogo donde nos muestra que constantes debemos de ingresar.....	73
Figura 28 Mapas que nos muestra cómo se va generando el parámetro b	73
Figura 29 Mapa de distribución espacial de sismos superficiales para el análisis del presente estudio, 1973-2020.....	75
Figura 30 Mapa de valores de "b" para el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, período 1973 - 2020	77
Figura 31 Mapa de periodos de recurrencia para un sismo de magnitud 8.0 Ms.	78

RESUMEN

En el presente estudio se emplea información del Catálogo Sísmico del National Earthquake Information Center (NEIC) USGS desde 1973 – 2020, para Analizar y Evaluar en forma espacial la distribución de la sismicidad ocurrida a lo largo del borde Occidental de Sudamérica (4°S - 44°S), que comprende los países de Ecuador, Perú y Chile, con la finalidad de identificar las áreas con mayor y menor probabilidad para la ocurrencia de un sismo de magnitud elevada en el futuro, denominadas “Lagunas Sísmicas”.

Para alcanzar este objetivo, se empleó una base de datos que se deriva de la obtenida del NEIC, estableciendo un límite mínimo de magnitud sísmica de 4.5 ms. Utilizando esta información, se determinan los valores inusuales de “b” = 0.5 y los periodos de retorno específicos de la región para terremotos de cierta magnitud, siguiendo el método propuesto por Wiemer y Wyss en 1979. La distribución de estos valores atípicos de b y los periodos de retorno locales ayuda a definir la geometría de las irregularidades en la corteza terrestre.

Los resultados obtenidos muestran la presencia de doce asperezas con diferentes dimensiones y con periodos de retorno de 30 años para sismos con magnitud Ms 8.0. Las asperezas encontradas son 2 para Ecuador, 6 para Perú y 4 para Chile, la aspereza de mayor tamaño (1) se localiza frente a la costa de Tocopilla, Mejillones y Antofagasta (-22.30°S - 27.20°S). Las asperezas de mediano tamaño, aspereza (3) localizada frente a las costas de San Antonio, Constitución, Concepción y Lebu (-33.60°S - 37.62°S) Chile, aspereza (6) se localiza frente a las costas de Moquegua, Tacna y Arica (-17.53°S – 19.34°S) Perú y Chile, aspereza (1) localizada frente a las costas de Piura y Chiclayo (-4.26°S - 6.74°S) en Perú, aspereza (1) localizada frente a las costas de (1.41°N - 0.47°S) en Ecuador. Asperezas de menor tamaño se ubican en las siguientes localidades, las asperezas (2 y 4) en Chile, la primera frente a las costas de Serena y Coquimbo (-28.50°S - 33.00°S) y la segunda se localiza frente a las costas de Puerto Saavedra y Valdivia (-38.78 – 39.82°S); las asperezas (2, 3, 4 y 5) en Perú, aspereza (2) frente a las a las costas de Ancash (-9.22°S - 10.40°S), aspereza (3) se ubica frente a las costas del norte de Lima (-10.50°S - 11.55°S), aspereza (4) se ubica frente a las costas de Callao (-11.60°S – 13.90°S), aspereza (5) se ubica frente a las costas de Lomas y Ático (-15.38°S - 16.91°S). Según los hallazgos, estas áreas serían las más propensas a sufrir un terremoto en el futuro. Los datos indican que el valor de b varía de 0.5 a 1.22. Esta fluctuación está vinculada a los cambios en las propiedades físicas (como la heterogeneidad y la deformación interna) de la placa de Nazca en la zona estudiada. Esto se debe al aumento de las tensiones a medida que la placa se hunde, para las cuales se han calculado periodos de retorno local de entre 20 y 40 años.

Palabras clave: Valor de b, Placa de Nazca, Áreas afectadas por terremotos.

ABSTRACT

In the present study the information of the Seismic Catalog of the National Earthquake Information Center (NEIC) USGS from 1973 - 2020 is used to analyze and evaluate in spatial form the distribution of the seismicity occurred along the Western border of South America (4°S - 44°S), which includes the countries of Ecuador, Peru and Chile, with the purpose of identifying the areas with greater and smaller probability for the occurrence of an earthquake of high magnitude in the future, denominated "Seismic Gaps".

For this purpose, a database corresponding to the one extracted from the NEIC with a minimum threshold for magnitude of 4.5 ms is used. From this database, the anomalous values of " b " = 0.5 and local return periods for earthquakes of a given magnitude are calculated using the methodology of Wiemer and Wyss (1979). The spatial distribution of the anomalous values of b and local periods allows configuring the geometry of the asperities.

The results obtained show the presence of twelve (12) asperities with different dimensions and with return periods of 30 years for earthquakes with magnitude M_s 8.0. The asperities found are 2 for Ecuador, 6 for Peru and 4 for Chile, the largest asperity (1) is located off the coast of Tocopilla, Mejillones and Antofagasta (-22.30°S - -27.20°S). The medium-sized asperities, asperity (3) located off the coasts of San Antonio, Constitución, Concepción and Lebu (-33.60°S - -37.62°S) Chile, asperity (6) is located off the coasts of Moquegua, Tacna and Arica (-17.53°S - -19.34°S) Peru and Chile, asperity (1) located off the coasts of Piura and Chiclayo (-4.26°S - -6.74°S) in Peru, asperity (1) located off the coasts of (1.41°N - 0.47°S) in Ecuador. Smaller asperities are located in the following localities, asperities (2 and 4) in Chile, the first one off the coasts of Serena and Coquimbo (-28.50°S - -33.00°S) and the second one is located off the coasts of Puerto Saavedra and Valdivia (-38.78 - 39.82°S); the asperities (2, 3, 4 and 5) in Peru, asperity (2) off the coasts of ncash (-9.22°S - -10.40°S), asperity (3) is located off the northern coasts of Lima (-10.50°S - -11.55°S), roughness (4) is located off the coasts of Callao (-11.60°S - -13.90°S), roughness (5) is located off the coasts of Lomas and Attic (-15.38°S - -16.91°S). According to the results, these areas would be the most likely to be affected by an earthquake in the future. The results show that the value of b oscillates between 0.5 and 1.22. This variation is related to changes in the physical properties (e.g., heterogeneity and internal deformation) of the Nazca plate within the study region, due to the increase of stresses as it subducts, for which local return periods of 20 to 40 years were estimated.

Keywords: b value, Nazca Plate, Areas affected by earthquakes.

INTRODUCCIÓN

“En Sismología, el valor de b es importante en el estudio de las regiones sísmicamente activas y puede reflejar las propiedades físicas de la tectónica en una región determinada” (Kossobokov & Keilis-Borok, 2000).

El valor de b comúnmente se relaciona con el cambio de los niveles de esfuerzo, la heterogeneidad del material, la deformación, presión de poros, la temperatura, la edad de la placa y acoplamiento de la misma. Además, puede servir en el análisis de sismos precursoros a partir de la identificación de asperezas en zonas de subducción y fallas geológicas. (Wiemer & Wyss, 1997)

El borde Oeste de Sudamérica constituye como una de las más importantes fuentes sismogénicas en el mundo debido a la alta velocidad con la cual convergen las placas de Nazca (oceánica) y Sudamérica (continental). Esta velocidad es del orden de 6-8 cm/año. La continua fricción entre dichas placas da origen con mayor frecuencia a los más violentos sismos conocidos en la historia sísmica de Sudamérica. Por ejemplo, en Chile ocurrió en mayo de 1960 frente a la ciudad de Valdivia, terremoto de una magnitud de 9.5 Mw y de una longitud de ruptura de 800 Km, en marzo de 2010 en Concepción de magnitud de 8.8 Mw con una ruptura de 600 Km. Como consecuencia de estos sismos es que dio origen a tsunamis transoceánicos conocidos por la humanidad, además permitió que, por primera vez, que muchos investigadores observaran las oscilaciones propias de la Tierra, sin considerar que su eje de rotación varió ligeramente. (Demets, Gordon, Aargus, & Stein, 1990)

En el Perú, sismos importantes que ocurrieron en la región Sur en agosto de 1868 de una magnitud de 9.0 Mw, otro en el norte de Chile en mayo de 1877 que produjeron daños considerables. Estos sismos generaron tsunamis con olas del orden de 16 a 20 m. de altura. Para ambos sismos se estima un periodo de retorno es de más de 100 años. En Ecuador los sismos más importantes fueron en enero 1906 de 8.8 Mw, diciembre 1979 de 8.1 Mw y abril 2016 de 7.8 Mw. La ocurrencia de sismos en los bordes de estas placas es debido al proceso de fricción entre ambas, es continuo en el tiempo geológico. Cuando las fuerzas que movilizan a las placas es mayor al total de las fuerzas que se oponen, entonces el deslizamiento de una de las placas se realizará de manera violenta produciendo un sismo y cuyo tamaño dependerá de la longitud de dicho deslizamiento y de las dimensiones del área afectada. (Wiemer & Wyss, 1997)

El proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana se realizan a lo largo de toda su superficie de contacto, es decir, sobre una longitud de 5,000 km. aproximadamente. En el caso de estas zonas de convergencia, conocidas como «zonas de subducción», las superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar. Figura 1. (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006)

La distribución espacial de los grandes sismos o de sus áreas de ruptura permite prevenir la presencia de otras áreas con diferentes geometrías que podrían estar comprometidas en un futuro producir, un sismo de gran magnitud. Esta particularidad, ha llevado a investigadores como Kelleher (1972), Keileher et al. (1973), Keileher y McCann (1976), McCann et al. (1979), Nishenko (1985), Nishenko, (1991), Muchica (2000), Condori (2013) y Villegas (2016) a proponer y sustentar una teoría observacional a largo plazo para la predicción de sismos. (Kelleher, 1972; Mccann, Nishenko, Sykes, & Krause, 1979)

En este estudio, se realiza un análisis detallado de la distribución espacial de las zonas donde no se ha producido sismos de mayor magnitud en los últimos 100 años en el borde Oeste de Ecuador, Perú y Chile a fin de identificar otras con mayor probabilidad de dar origen a un nuevo sismo en el futuro. Para tal fin, se estudia y se discute las características de las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en el borde Oeste de estos países desde el año de 1500 a la fecha y cuya información se ha recopilado de diferentes catálogos sísmicos. (Wiemer & Wyss, 1997)

Figura 1

Mapa de los principales rasgos tectónicos presentes en la placa de Nazca y el borde Occidental de Sudamérica.



Nota: Demets, Gordon, Aargus, & Stein, (1990).

Los triángulos rojos indican la localización de los volcanes y las líneas negras representan a los principales sistemas de fallas. Se puede observar la Cordillera de los Andes, las flechas amarillas representan la dirección de convergencia de la Placa de Nazca con la Sudamericana. (Demets, Gordon, Aargus, & Stein, 1990)

HIPÓTESIS

Dado que el valor de B permite determinar la relación entre los periodos de retorno de terremotos en una determinada zona geográfica.

Es probable que el presente estudio de la distribución de valores de “B” en el borde Occidental de América del Sur permita establecer de manera aproximada las áreas de ocurrencia de futuros terremotos en Ecuador, Perú y Chile.



OBJETIVOS

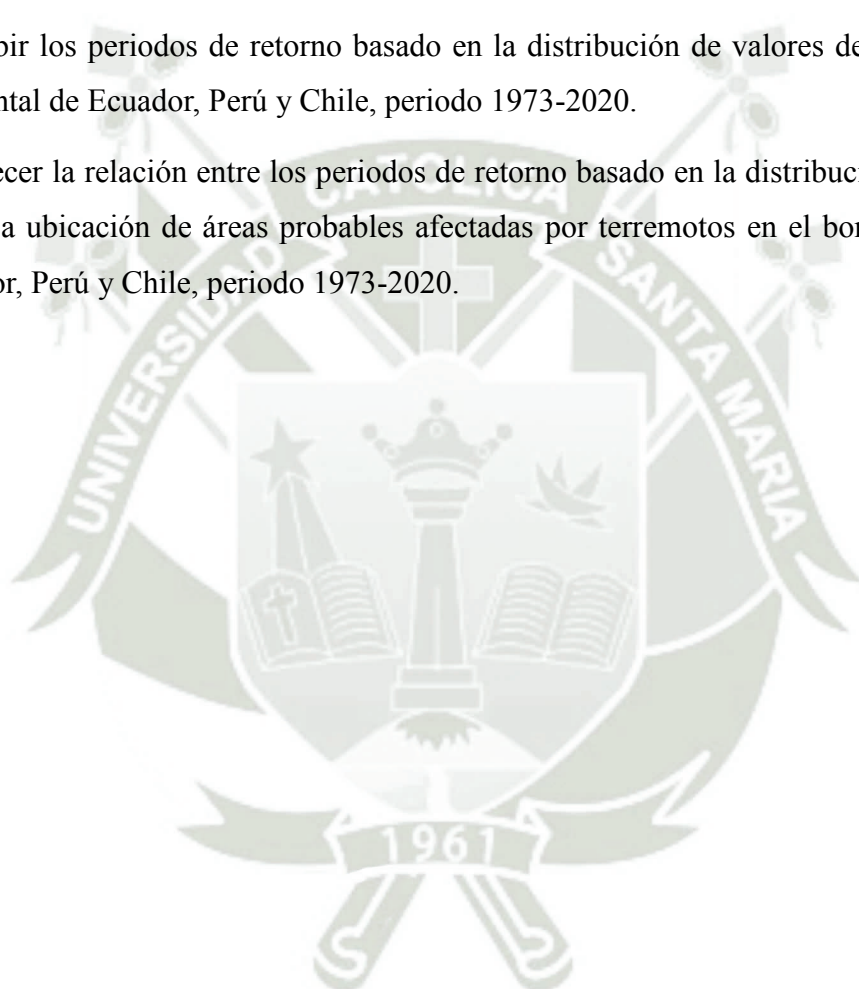
Objetivo General

Determinar la relación entre los periodos de retorno basado en la distribución de valores de “b” y la ubicación de áreas probables afectadas por terremotos, en el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, periodos 1973 – 2020.

Objetivos Específicos

Describir los periodos de retorno basado en la distribución de valores de “b” en el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, periodo 1973-2020.

Establecer la relación entre los periodos de retorno basado en la distribución de valores de “b” y la ubicación de áreas probables afectadas por terremotos en el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, periodo 1973-2020.





CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. Marco Teórico

1.1. Principales elementos tectónicos de Ecuador, Perú y Chile

1.1.1. Sismicidad Histórica de Ecuador

La historia sísmica del Ecuador está llena de dolorosas experiencias producto de grandes catástrofes que dejaron a su paso muerte y destrucción a lo largo y ancho de todo el territorio nacional. Hasta la actualidad, en un lapso de 475 años han ocurrido en el territorio del Ecuador, 38 terremotos de intensidad igual o mayor a VIII según la escala Internacional de Mercalli, grado al partir del cual, los efectos son de consideración, y si se toma en cuenta los sismos a partir de la intensidad VI, que es el grado desde el cual se presentan daños leves, hay que añadir 96 eventos que han causado daño desde leve hasta moderados. Es imposible cuantificar las pérdidas materiales ocasionadas por estos terremotos y en lo referente a las pérdidas de vidas, estas superan las 80.000 personas. (Ramos Chura, 2017)

Según el Catálogo Sísmico del Ecuador en los últimos años se registraron sismos cuyo impacto fue notorio, destacándose: el sismo de Abril de 1541 con una magnitud de 7.0, el sismo del 16 de Agosto de 1868 de magnitud 7.7, el sismo ocurrido el 31 de Enero de 1906 con magnitud 8.8, otro gran sismo se registra el 23 de Junio de 1925 cuya magnitud se estima en 6.8 y una profundidad de 180 Km, también se registraron eventos importantes que incluyen un sismo de magnitud 7.9, el 14 de Mayo de 1942 y el 19 de Enero de 1958 con magnitudes estimadas de 7.8, el 5 de Marzo de 1987 con magnitud 6.9 y el último en Abril de 7.8 de magnitud como se puede observar en la tabla 1 y tabla 2. (Egred, 1999)

Tabla 1
Sismos Históricos del Ecuador con intensidades mayores a VIII

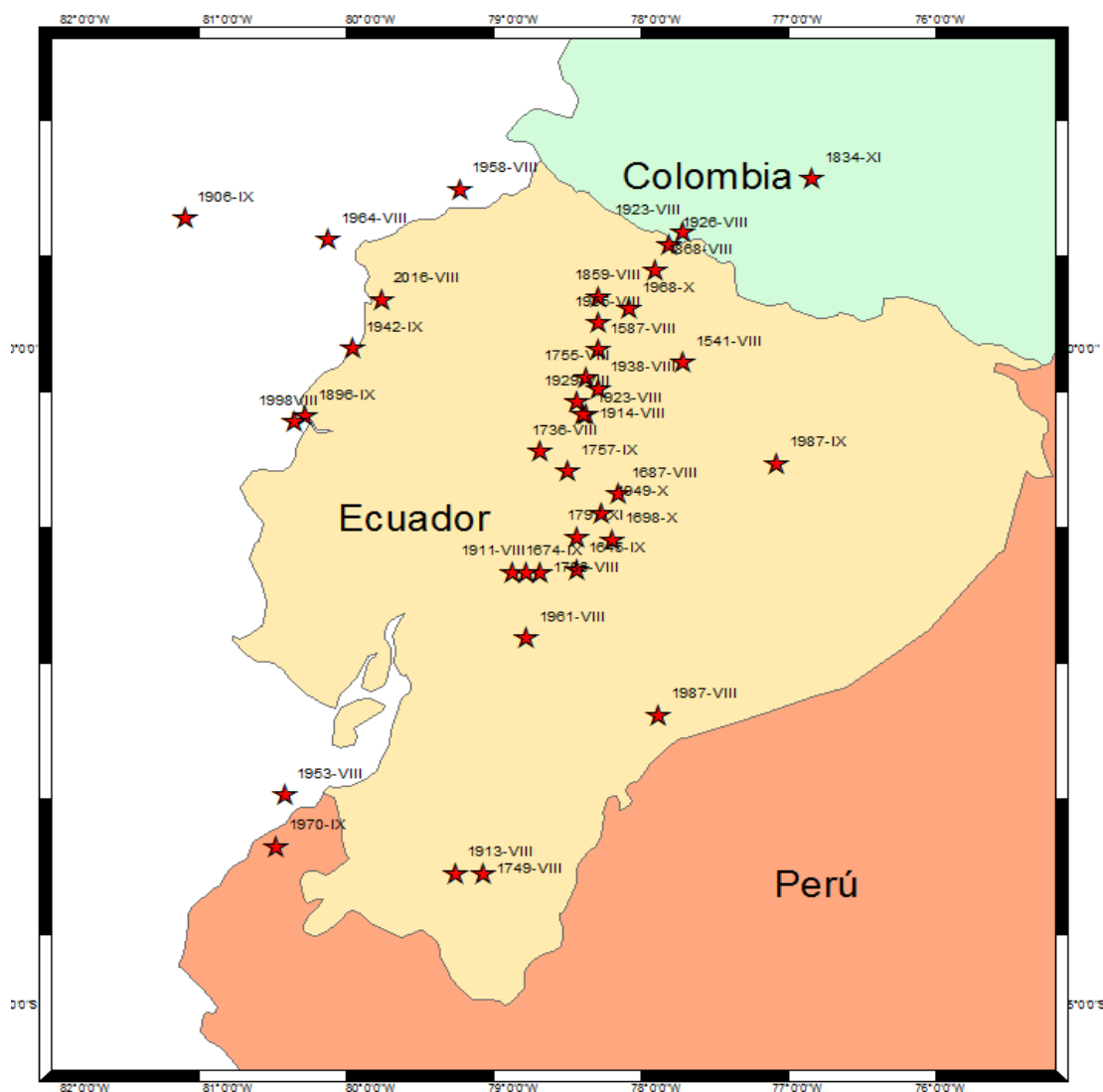
Fecha	Latitud	Longitud	Prof.	Intensidad	Referencia
01 04 1541	-0.10	-77.80	-	VIII	Napo
31 08 1587	0.00	-78.40	-	VIII	Pichincha
15 03 1645	-1.68	-78.55	-	IX	Chimborazo-Tungurahua
29 08 1674	-1.70	-79.00	-	IX	Chimborazo Bolívar
22 11 1687	-1.10	-78.25	-	VIII	Tungurahua
20 06 1698	-1.45	-78.30	-	X	Chimborazo Tungurahua
06 12 1736	-0.78	-78.80	-	VIII	Pichincha Cotopaxi
20 01 1749	-4.00	-79.20	-	VIII	Loja
28 04 1755	-0.21	-78.48	-	VIII	Pichincha
22 02 1757	-0.93	-78.61	-	IX	Cotopaxi Tungurahua
20 01 1834	1.30	-76.90	-	XI	Carchi Nariño
10 05 1786	-1.70	-78.80	-	VIII	Chimborazo
04 02 1797	-1.43	-78.55	-	XI	Chimborazo, Tungurahua
22 03 1859	0.40	-78.40	-	VIII	Pichincha, Imbabura
15 08 1868	0.60	-78.00	-	VIII	Carchi
16 08 1868	0.31	-78.18	-	X	Imbabura, Carchi Pichincha
03 05 1896	-0.51	-80.45	-	IX	Marabí
31 01 1906	1.00	-81.30	25	IX	Esmeraldas, Nariño
23 09 1911	-1.70	-78.90	-	VIII	Chimborazo, Bolívar
23 02 1913	-4.00	-79.40	-	VIII	Loja
31 05 1914	-0.50	-78.48	-	VIII	Pichincha, Cotopaxi
05 02 1923	-0.50	-78.50	-	VIII	Pichincha
16 12 1923	0.90	-77.80	-	VIII	Carchi, Nariño
18 12 1926	0.80	-77.90	-	VIII	Carchi
15 07 1929	-0.40	-78.55	-	VIII	Pichincha
10 08 1938	-0.30	-78.40	-	VIII	Pichincha
14 05 1942	0.01	-80.12	20	IX	Marabí, Guayas
05 08 1949	-1.25	-78.37	60	X	Chimborazo, Tungurahua
12 12 1953	-3.40	-80.60	-	VIII	Loja, norte de Perú
20 07 1955	0.20	-78.40	-	VIII	Pichincha, Imbabura
19 01 1958	1.22	-79.37	40	VIII	Esmeraldas
08 04 1961	-2.20	-78.90	24	VIII	Chimborazo
19 05 1964	0.84	-80.29	34	VIII	Marabí
10 12 1970	-3.79	-80.66	42	IX	Loja, El Oro, Azuay
06 03 1987	-0.87	-77.14	12	IX	Napo Sucumbíos
02 10 1995	-2.79	-77.97	24	VIII	Morona, Santiago
04 08 1998	-0.55	-80.53	39	VIII	Marabí
16 04 2016	0.38	-79.92	19	VIII	Pedernales, Marabí

Nota: Elaboración propia.

“En términos generales, los sismos registrados por los sismógrafos, en Ecuador, suman decenas de miles por año. Dentro de esta gran cantidad de actividad sísmica, en el tiempo histórico, ocurren grandes terremotos. Figura 2” (Buñay Guachizaca & Tenelema Guaranga, 2014).

Figura 2

Mapa de la sismicidad histórica de Ecuador desde 1541



Nota: Elaboración propia.

“Se ha considerado sismos con intensidades mayores e iguales a VIII MM”
(Egred, 1999).

Tabla 2
Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Ecuador desde 1906 a 2016.

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud Mw
16/04/2016	0.3517	-79.926	21	7.8
30/09/2012	1.929	-76.362	170	7.3
12/08/2010	-1.266	-77.306	206.7	7.1
04/08/1998	-0.593	-80.393	33	7.2
03/10/1995	-2.75	-77.881	24.4	7.0
06/03/1987	0.151	-77.821	10	7.2
12/12/1979	1.598	-79.358	24	7.7
27/07/1971	-2.839	-77.322	120	7.4
19/01/1958	1.011	-79.489	27.5	7.6
16/01/1956	-0.727	-80.213	20	7.0
12/12/1953	-3.552	-80.636	25	7.3
14/05/1942	-0.025	-79.955	20	7.8
31/01/1906	0.955	-79.369	20	8.3

Nota: Elaboración propia.

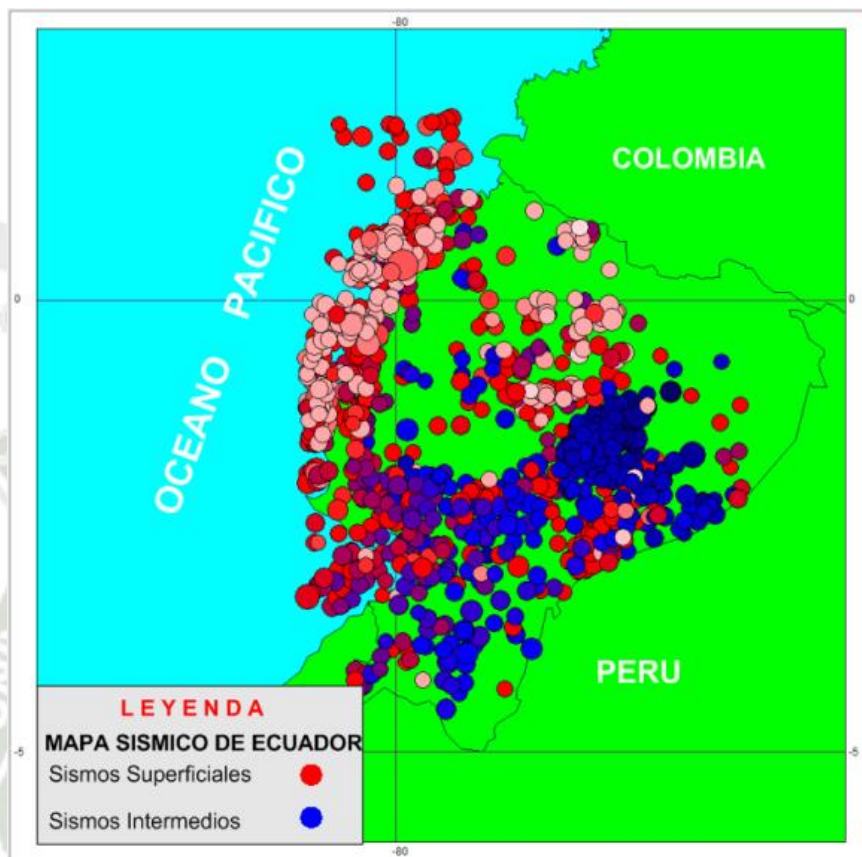
“Según la National Earthquake Interior Center podemos ver las coordenadas de sismos más importantes de 1906 a 2016”.

1.1.2. Sismicidad Instrumental de Ecuador

“Los datos sísmicos utilizados para el presente trabajo fueron del catálogo de la National Earthquake Information Center (NEIC), el cual permitirá determinar el mapa de la distribución espacial de la sismicidad, magnitudes ≥ 4.0 . Figura 3” (Instituto Geofísico del Perú, 2000).

Figura 3

Mapa Sísmico de Ecuador, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020.



Nota: Elaboración propia.

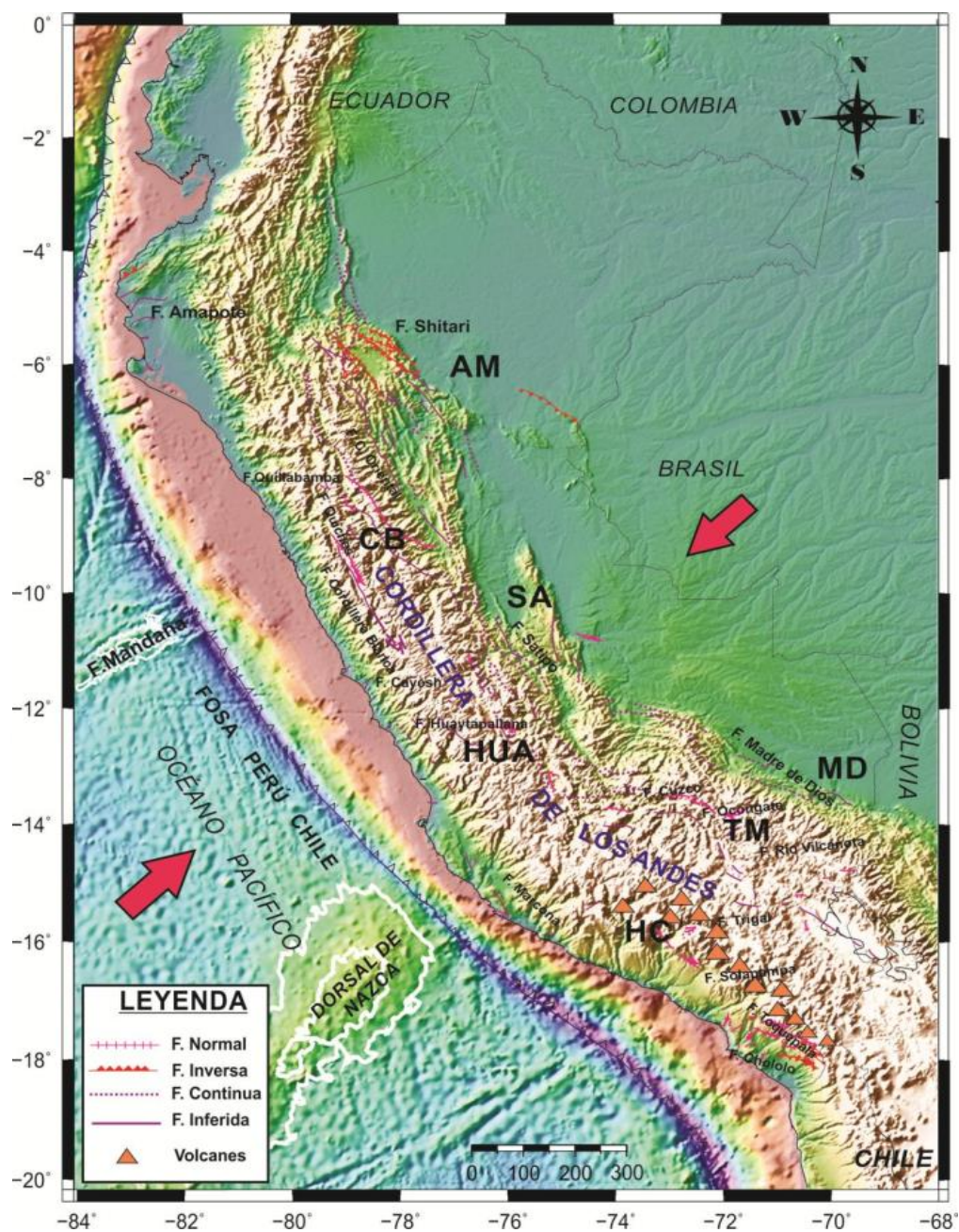
Sismos con magnitudes mayores a 4.5 Magnitud, círculos rojos sismos superficiales y círculos azules sismos intermedios.

1.1.3. Principales Elementos Tectónicos de Perú

El proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana se realiza acompañada de algunos elementos tectónicos que a su vez han dado origen a la formación de otros que hoy en día, controlan toda la geodinámica del borde Oeste de Sudamérica. Estos elementos son la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa Peruano-Chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes Sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente. Figura 4. (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006)

Figura 4

Principales elementos tectónicos superficiales presentes en continente y en el borde Oeste del Perú.



Nota: Sebrier M, F, Megard, & Labaucher, (1985).

“Los triángulos indican la ubicación de los volcanes y las líneas de color azul los principales sistemas de fallas” (Sebrier M, F, Megard, & Labaucher, 1985).

1.1.4. La Dorsal de Nazca

Es reconocida como una cordillera oceánica de forma asimétrica que se localiza en el extremo NO de la región Sur de Perú con una orientación NE-SO (entre 15° y 24° Sur). El extremo NE de la Dorsal se ubica frente al departamento de Ica a una distancia del orden de 50 km de la línea de fosa, teniendo aquí y sobre la cota de 2000 metros, un ancho de 220 km aproximadamente. El ancho y la altitud de esta cordillera disminuye considerablemente en dirección SO y se considera que cotas menores ya subducieron bajo la placa continental. Estudios sobre anomalías magnéticas, permiten considerar la hipótesis de que la Dorsal de Nazca debe su origen a una antigua zona de creación de corteza que cesó su actividad hace 5 a 10 millones de años aproximadamente. (Marocco, 1980; Sebrier M, F, Megard, & Labaucher, 1985)

1.1.5. La Fractura de Mendaña

Corresponde a una posible discontinuidad de la corteza oceánica que se localiza en el extremo NO de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash. En la actualidad, esta fractura tiene una orientación NE -SO y un ancho de 80 km aproximadamente sobre la cota de 1000 metros, la estructura se localizaría a una distancia de 180 km de la línea de fosa. No existe mayor información sobre el origen y otras características de esta estructura. (Guardia Anampa, 2008; Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006)

1.1.6. La Fosa Perú – Chile

Delimita el inicio de la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, y está formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas pre-existentes. Frente al borde Oeste de Perú, la fosa presenta profundidades máximas de hasta 6000 metros en la región Norte y Sur; mientras que, en la región Centro es del orden de 5000 metros. La orientación de la fosa es en dirección NNO-SSE en la región Norte y Centro, y NO-SE en la región Sur de Perú. El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca. (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006; Bernal & Tavera, 2002)

1.1.7. La Cordillera Andina

Se distribuye sobre el borde Oeste de la placa sudamericana y tiene una extensión de 7000 km aproximadamente con alturas máximas del orden de 6000 msnm. En Perú, de Norte a Sur, la Cordillera de los Andes está bien definida y muestra, además la presencia de dos deflexiones importantes: la primera a la altura de 5° Sur llamada deflexión de Huancabamba y la segunda en 14° Sur, conocida como deflexión de Abancay. Estas deflexiones cambian la orientación de la cordillera en dirección NE-SO y Este - Oeste respectivamente. Transversalmente, la Cordillera Andina presenta diversas unidades morfoestructurales (Costa, Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental y zona Subandina) y anchos que oscilan entre 250 km en la región Norte y Centro de Perú hasta 500 km en región Sur y en los límites entre Perú, Chile y Bolivia. (Marocco, 1980; Tavera & Bufo, 2001)

1.1.8. La Cadena Volcánica

Se ubica en la región Sur de Perú por debajo de la deflexión de Abancay hasta los 25°S en Chile. Esta cadena se distribuye sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento con orientación NO-SE en Perú y N-S en el extremo Norte de Chile. Las características geométricas de cada uno de los volcanes que integran esta cadena, muestran que la actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimenta la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al. 1985). En las regiones Norte y Centro de Perú, la actividad volcánica desapareció hace 8 millones de años aproximadamente. (Marocco, 1980)

1.1.9. Los Sistemas de Fallas

Presentes en el Perú, son el resultado del continuo proceso de deformación de la corteza continental, estando presentes en mayor número sobre la zona Subandina de la región Norte y Centro, todas de tipo inverso que evidencian el acortamiento de la corteza. En la Alta Cordillera y sobre la Cordillera Occidental, el número de fallas es menor en número y tamaño, siendo en general de tipo normal y estarían asociadas al levantamiento de la corteza. (Marocco, 1980)

Dentro de la geodinámica del borde Oeste de Perú, los elementos tectónicos descritos anteriormente parecen controlar las características físicas de los procesos de acumulación de energía y posterior deformación. Por ejemplo, se ha observado que al Norte de la Fractura de Mendaña, la ausencia de sismos de magnitud elevada podría sugerir que el proceso de fricción de placas se realiza de manera asísmica, de ahí que la placa sea más continua por debajo del continente y alcance distancias del orden de 700 km desde la fosa. (Tavera & Buform, 2001)

Entre la Fractura de Mendaña y la Dorsal de Nazca, la ocurrencia continua de sismos indicaría mayor fricción y por ende mayor deformación de la placa subducente. Asimismo, la presencia de la Dorsal de Nazca parece controlar la presencia de la deflexión de Abancay y el cambio en el modo de la subducción de la placa. Además, se ha observado que los procesos de ruptura de los sismos que ocurren en la región Sur de Perú tienden a propagarse en dirección Sur-Este. (Marocco, 1980)

1.1.10. Sismicidad Histórica del Perú

La información sobre la Sismicidad Histórica del Perú data del tiempo de la conquista y colonización hasta aproximadamente el año 1500, la misma que en su mayoría se encuentra esparcida en diferentes obras inéditas, manuscritos, crónicas, narraciones, informes administrativos por parte de los clérigos y gobernantes de aquellos años. Gran parte de esa información ha sido recolectada y publicada por Polo (1898), Barriga (1939), Silgado (1978), y Dorbath et al. (1990). La recopilación realizada por Silgado (1978) es la más completa para sismos importantes ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974, y en ella, el autor describe en detalle las principales características de los sismos (valores de intensidad local y regional), siendo muchos de ellos estudiados por el mismo autor. (Barriga, 1939)

Asimismo, el autor estima la magnitud para un gran número de sismos a partir del área de intensidad máxima a fin de poder compararlos con otros sismos. Sobre la Sismicidad Histórica, el trabajo más reciente es el realizado por Dorbath 1990, los mismos que consideran una revisión detallada de toda la información existente sobre sismos históricos a fin de correlacionar las áreas de intensidad máxima con sus respectivas longitudes de ruptura para estimar la magnitud de un gran número de sismos. Asimismo, los autores sugieren que los grandes sismos en el Perú tienen un periodo de recurrencia del orden de una centuria (100 años). En general, Silgado 1978 y Dorbath 1990 indican que el sismo más antiguo para el cual se dispone de información confiable, data del año 1513. (Silgado, 1978)

Es importante remarcar que la calidad de la información disponible para evaluar la sismicidad histórica dependerá de la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas por los sismos; por lo tanto, existe la posibilidad de que hayan ocurrido sismos importantes en áreas no pobladas o próximas a localidades con las cuales era difícil establecer comunicación. De ahí, la ausencia de información sobre sismos que pudieran haber ocurrido en la Alta Cordillera y la Zona Subandina. (Barriga, 1939)

Por otro lado, la profundidad focal del total de los sismos históricos no ha sido determinada con precisión; sin embargo, debido a su ubicación geográfica (entre

la fosa y la línea de costa) y daños observados en superficie, estos pueden ser considerados en su mayoría como superficiales. (Silgado, 1978)

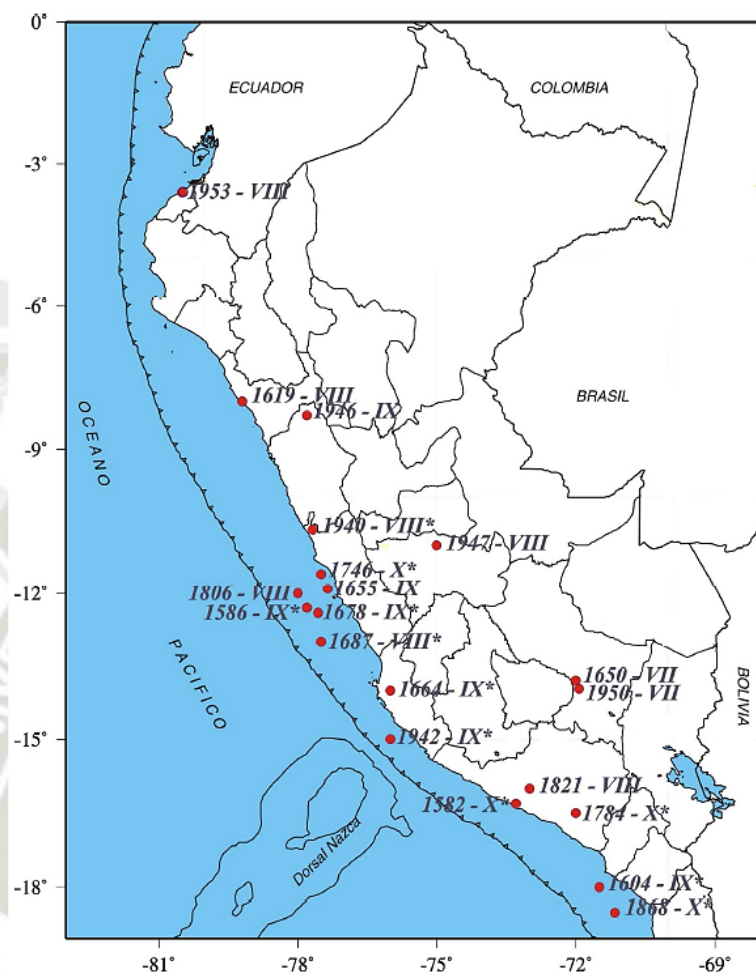
En la figura 5, se muestra la localización y los parámetros hipocentrales de los sismos históricos ocurridos en Perú entre 1500 y 1959 ($M_s \geq 6.0$), los mismos que han generado intensidades mayores a VII en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978; Dorbath et al. 1990). En esta figura se observa que los sismos históricos se distribuyen principalmente entre la línea de fosa y la costa, localizándose en mayor número en la región Centro y Sur del Perú debido probablemente a que estas regiones eran las más pobladas y en donde se constituyeron las ciudades más importantes después del siglo XVI. La mayoría de estos sismos produjeron Tsunamis con olas de diferentes alturas. (Polo, 1898)

Entre los sismos más importantes ocurridos durante el periodo histórico se puede mencionar en la región Norte a los de 1619 y 1953 (VIII MM), ambos produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Trujillo y Tumbes. En la región Central, sobresalen los sismos ocurridos en 1586 (IX MM), primer gran sismo para el cual se tiene información histórica; 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) que destruyeron casi completamente la ciudad de Lima. El sismo de 1746 generó un Tsunami con olas de 15 – 20 metros de altura que inundó totalmente el Puerto del Callao. En la región Sur ocurrieron sismos importantes en 1604 (IX MM), 1784 (X MM) y 1868 (X MM) que destruyeron principalmente a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Puno y Norte de Chile. (Barriga, 1939)

El terremoto de 1868 habría producido una longitud de ruptura del orden de 500 Km y un tsunami con olas de 12 a 16 metros de altura. En el interior del continente, ocurrieron sismos importantes en 1650 (VII MM), 1946 (IX MM) y 1947 (VIII MM) que produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Cusco, Huaraz y Satipo respectivamente. Para este periodo de tiempo (1500 – 1959), no existe información sobre sismos ocurridos en toda la Zona Subandina del Perú (Interior de continente). (Polo, 1898)

Figura 5

Distribución de la actividad sísmica del Perú (1513 y 1959) según Silgado (1978).



Nota: Silgado, (1978).

“A partir del año 1910 se consideran sismos de intensidad mayores a VII en MM.

(*) Indica que el sismo fue acompañado de tsunamis” (Silgado, 1978).

1.1.11. Sismos Históricos del Perú

El 22 enero 1582 a las 11:30 ocurrió un terremoto que arruinó la ciudad de Arequipa. Cayeron alrededor de 300 casas y perdieron la vida más de 30 personas sepultadas entre los escombros. El movimiento se sintió en Lima. El 19 febrero 1600, a las 05:00 inicia un fuerte temblor local en Arequipa causado por la erupción del volcán Huaynaputina (Omate), que arrojó lluvia de cenizas y arenas, que oscureció el cielo de la ciudad. La erupción fue precedida y seguida por un enjambre de temblores. Se desplomaron casi todos los edificios, con excepción de los más pequeños. (Silgado, 1978)

El 23 noviembre 1604, a las 13:30 sucedió un terremoto y tsunami en la Costa Sur. La conmoción sísmica arruinó las ciudades de Arequipa y Arica. El movimiento se extendió en más de 1,650 km. de N a S y en más o menos 130 km. de la costa al interior. El mar destruyó el puerto de Pisco y Arica donde murieron 23 personas. (Kosaka Masuno, Arias Barahona, & Farfán Bazán, 2001)

El 20 octubre 1687, ocurrieron dos sismos, el primero sacudió los edificios de la ciudad de Lima, el segundo, más prolongado acabó de arruinarlo, ocasionando 100 muertos, las antiguas construcciones de adobe con gruesos paredones no soportaron las conmociones del suelo, los daños se extendieron hasta los 700 km. al Sur de Lima, especialmente a los poblados de Ica, Palpa, Nazca y Camaná. El mar inundó parte del litoral comprendido entre Chancay y Arequipa, quedando destruido el Puerto de Pisco. (Silgado, 1978)

“El 27 marzo 1725, sucede un sismo que se sintió en toda la Costa Sur del Perú hasta el Callao; el pueblo de Camaná sufrió mucho daño, y el mar inundó ampliamente la costa” (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018).

El 13 mayo 1784, a las 07:35 inició un terremoto que destruyó la ciudad de Arequipa y la mayor parte de sus templos. Murieron 54 personas y hubo 500 heridos. Igualmente sufrieron grandes daños las poblaciones situadas dentro de un radio de 100 km. (Silgado, 1978)

“El 30 marzo 1813, a las 04:30, sucede un terremoto en Ica, se destruyeron las casas y templos, murieron 32 personas. Grandes grietas se formaron en el cauce del río” (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018).

El 10 Julio 1821, a las 05:00, ocurrió un terremoto que causó grandes daños en los pueblos de Camaná, Ocoña, Caravelí, Chuquibamba y Valle de Majes. Murieron 70 personas en Camaná y Ocoña, 60 en Chuquibamba y 32 en Caravelí. El movimiento principal se sintió con gran intensidad en Lima. (Silgado, 1978)

El 13 agosto 1868, a las 16:45, un terremoto alcanzó una intensidad de XI, acompañado de un “Tsunamis”. El historiador Polo, se refiere a este terremoto como uno de los mayores ocurridos en el Perú desde su conquista. Se le percibió hasta unos 1,400 km. al Noroeste y a la misma distancia hacia el sur. En Bolivia se le sintió hasta 224 km. al Este de la Paz en dirección a Cochabamba, causando muchos estragos a lo largo de la Costa. Hubo fuerte destrucción en Arica, Tacna, Moquegua, Ilo e Iquique, arruinándose la ciudad de Arequipa. En Moquegua murieron 150 personas, en Arequipa 10 y en Tacna 3. La primera ola alcanzo una altura de 12 metros que arrasó completamente el Puerto de Arica, esto ocurrió a las 17:37. a las 18:30. el mar irrumpió nuevamente con olas de 16 metros de altura, a las 19:10. se produjo una tercera ola. Esta última ola varó algunas embarcaciones que fueron arrojadas a 300 metros de la playa tierra adentro. Las salidas del mar arrasaron gran parte del litoral peruano y chileno, muriendo 30 personas en Chala y en Arica unas 300. La agitación del Océano llegó hasta California, Hawai, Yokohama, Filipinas, Sidney y Nueva Zelandia. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 23 febrero 1907, a las 15:17, inicia un movimiento sentido en un área aproximadamente 106,000 km². Aunque no causó averías de consideración, se le percibió fuertemente en Matucana, Mala, Cañete, Chicha, Pisco, Ica, Huancavelica, Puquio (con una intensidad del grado V). (Silgado, 1978)

El 28 Julio 1913, a las 01:40, un movimiento sísmico afectó gran parte de las Costa Sur situada entre Chala y Mollendo, causando la rotura de tres cables submarinos frente a la costa, lo que se atribuyó un deslizamiento del talud submarino. La posición geográfica del epicentro fue de 17° Sur, 74° Oeste, y alcanzó una magnitud de 7,0. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 06 agosto 1913, a las 17:13, sucedió un terremoto que destruyó la ciudad de Caravelí. Este movimiento duró 4 segundos y produjo desplome de todos los

edificios de dicha ciudad, derrumbes de las laderas del valle; hubo 4 heridos. Además, afectó otras poblaciones como la de Chuquibamba. En Atico se destruyeron muchas edificaciones resultando un muerto y varios heridos. En el pueblo de Ocoña causó daños apreciables en los edificios públicos y viviendas. En la ciudad de Arequipa ocasionó daños en algunos edificios. El movimiento llegó a sentirse en Iquique (Chile) y la Paz (Bolivia). El epicentro se lo ubica en el Océano Pacífico frente al litoral, siendo su posición geográfica de 17° lat. S. y 74° long. W y alcanzando una magnitud de 7,7. (Silgado, 1978)

El 11 setiembre 1914, a las 06:48, se repitió otro movimiento que volvió a dejar en escombros la ciudad de Caravelí. Ocurrieron fuertes derrumbes en los cerros circundantes. En Nasca, el temblor desplomó la iglesia de reciente construcción y causó varias víctimas. Este mismo sismo se sintió fuertemente en Ica y Atico. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 11 octubre 1922, a las 09:50, inició un terremoto ubicado a 16° de lat. S. y 72,5° long. W, magnitud 7,4. Profundidad 50 km. En Caravelí cayeron muchas casas. En la ciudad de Arequipa causó daños considerables, lo mismo que en el puerto de Mollendo. Fue sentido fuertemente en Chala, Acarí, Puquio, Palpa, Ica y Cañete. (Silgado, 1978)

El 24 agosto 1942, a las 17:51, sucedió un terremoto en la región limítrofe de los Departamentos de Ica y Arequipa, situada entre los 14° a 16° latitud Sur. Alcanzó una intensidad del grado IX en la Escala Modificada de Mercalli. Sentido en un área de unos 18,000 km², donde ocurrió gran destrucción. Murieron 30 personas por los desplomes de las casas y 25 heridos por diversas causas. Posición geográfica aproximada 15° lat. S. y 76° long. W., y magnitud 8. Se estimó que el 30% de las viviendas de la ciudad de Nazca sufrió ruina total, quedaron en escombros las poblaciones vecinas de Acarí y Jaqui, los daños se extendieron a Quicacha, Atiquipa y Palpa. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 20 Julio 1948, inicia un sismo ligeramente destructor en las poblaciones de Caravelí y Chuquibamba. La intensidad fue de VI - VII en la Escala Modificada de Mercalli. Este sismo fue sentido en Lima (grado II), en Arequipa y Moquegua

(grado III). Posición geográfica: 16.6° S y 73.6° W, profundidad superior a la normal, magnitud 7.1. (Silgado, 1978)

El 21 Julio 1955, sucedió un movimiento sísmico regional sentido a lo largo de la costa, entre los paralelos 11° y 18° lat. S. En la ciudad de Caravelí alcanzó una intensidad del grado VI en la Escala Modificada de Mercalli. Produjo gran alarma en las ciudades de Ica y Arequipa. La posición geográfica fue de 15.4° latitud Sur y 74° longitud Oeste, profundidad focal 60 km. y alcanzó un magnitud de 6.7. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 15 de enero 1958, a las 14 horas 14 minutos 29 segundos, sucedió un terremoto en Arequipa que causó 28 muertos y 133 heridos. Intensidad de grado VII - VIII de la Escala Modificada de Mercalli. Todas las casas antiguas de la ciudad, construidas a base de sillar sufrieron averías de diversa magnitud, resistiendo sólo los inmuebles construidos a partir de 1940 y los edificios modernos. (Silgado, 1978)

Se considera los poblados más afectados por este sismo a Tiabaya, Sabandia, Cerrillos, incluyendo las viviendas construidas a base de adobe en el sector de La Pampilla, de igual manera sufrieron daños los domicilios situados a las orillas de la torrentera de San Lázaro; en Sachaca: la iglesia, el cementerio y la gran mayoría de casas fueron cuarteadas; la calle Mercaderes, es una de las zonas que sufrió fuertes daños, en la cual la mayoría de paredes se vinieron al suelo. El pueblo de Yura fue sacudido fuertemente. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

Por efectos del sismo, se desprendieron enormes bloques de rocas tanto del Volcán Misti, como de los cerros circunvecinos. Los derrumbes dañaron en varios tramos la línea de ferrocarril a Puno, la carretera panamericana en el sector comprendido entre Chala y Arequipa, quedó cubierta en varios trechos por deslizamientos de magnitud variable, siendo la zona más afectada fue entre Camaná y Atico. El movimiento sísmico también se sintió en las localidades de Chuquibamba y Aplao. Fue sentido de Chíncha a Tarapacá en Chile; por el Este en Cusco, Puno y otras localidades del Altiplano. (Silgado, 1978)

“El epicentro fue ubicado a 25 km. al Noreste de Santa Rita de Sigüas, departamento de Arequipa, sus coordenadas geográficas 16.50° Latitud Sur y

72.00° Longitud Oeste, con una profundidad de 60 Km. y una Magnitud 7.0 Ms” (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018).

El 13 de enero 1960, a las 10 horas 40 minutos 34 segundos, inició un terremoto en la ciudad de Arequipa, dejó un saldo de 63 muertos y quedaron centenares de heridos, de los cuales 30 murieron en Chuquibamba, población que quedó casi en escombros. Fue igualmente destructor en Caravelí, Cotahuasi, Omate, Puquina, Moquegua y en la ciudad de Arequipa. En ésta última ciudad los edificios antiguos de sillar dañados por el terremoto de 1958, y otros con defectos arquitectónicos, sufrieron destrucción, donde sólo resistieron las viviendas antisísmicas construidas por las clases necesitadas por el Servicio Cooperativo Interamericano después de 1958. (Silgado, 1978)

Como consecuencia del movimiento una inmensa nube de polvo cubrió gran parte de la ciudad, gigantescos derrumbes de las faldas del volcán Misti, la ciudad se miraba ruinas; fuera de Arequipa, Miraflores no mostraba mayores daños. Tiabaya, Tingo, Huaranguillo, Tingo Grande, Sachaca, Alata, Arancota, Pampa de Camarones, Chullo y la urbanización de Hunter el 90% de sus viviendas destruidas o ha medio destruir. De igual manera presentaba La Pampilla, Paucarpata, Characato, Socabaya, Mollebaya y los distritos aledaños a éstos. A consecuencia del movimiento telúrico se produjo en Charcani un derrumbe que cortó el suministro de fluido eléctrico. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

Este fuerte movimiento duró aproximadamente unos 20 segundos, alcanzando el grado IX de la Escala Modificada de Mercalli en el área epicentral. El radio medio de perceptibilidad fue de 750 km. Sentido en toda la extensión de los Departamentos de Cuzco, Apurímac y Ayacucho, con intensidad variable. Percibido en la ciudad de Lima con el grado III de la Escala Modificada de Mercalli. En la Paz (Bolivia) III - IV. En Punta Angamos, cerca al puerto de Antofagasta con el grado II de esa misma escala. Su epicentro fue ubicado en la provincia de Chuquibamba, con sus coordenadas geográficas 16.145° Latitud Sur y 72.144° Longitud Oeste, con una profundidad de 82 km. y una magnitud de 7.5. (Silgado, 1978)

El 09 marzo 1960, a las 18:54, este sismo fue una violenta réplica del terremoto del 13 de enero, fuertemente sentida en la ciudad de Arequipa cayeron cornisas ya removidas por ese gran sismo. Fue sentido en Puno, en los puertos de Matarani, Mollendo y Mejía. Epicentro 16° lat. S. y 72° long. W., y la magnitud de 6.0. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 16 de febrero 1979, a las 05 horas 08 minutos 53 segundos, ocurre un violento sismo sacudió la ciudad de Arequipa y el Sur del Perú, alcanzando el grado VI en la Escala Modificada de Mercalli, habiendo afectado seriamente algunas viviendas de sillar. Además, ocasionó graves daños en edificios relativamente modernos como el Hospital Regional N° 2 (Ex-empleado) Programa académico de Arquitectura y el pabellón Nicholson, ubicados estos 2 últimos en los Campus de la Universidad de San Agustín. Su epicentro fue localizado a 26 km. al Nor Noreste de la ciudad de Camaná. A consecuencia del sismo fallecieron 12 personas y se registraron 159 heridos. Su epicentro se ubicó entre las coordenadas geográficas 16.39° Latitud Sur y 72.66° Longitud Oeste, con una profundidad de 54 km., y una magnitud de 6.3 en la Escala de Richter. Este sismo produjo severos daños en las localidades de Chuquibamba y pueblos del valle de Majes. (Silgado, 1978)

El 23 de Julio de 1991, a las 14 horas 44 minutos 50 segundos, un violento movimiento sísmico alcanzó grado V en la Escala Modificada de Mercalli, fue percibido en varios pueblos del Valle del Colca, siendo el más afectado el pueblo de Maca donde fallecieron 12 personas, 70 heridos, 800 damnificados, 323 viviendas derrumbadas y 5 locales Públicos destruidos. Su epicentro se ubicó entre las coordenadas geográficas 15.679° Latitud Sur y 71.574° longitud Oeste, con una profundidad de 5 km. y una magnitud de 5.0 en la Escala de Richter. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

El 12 de noviembre de 1996, un terremoto del día martes a las 11 horas 59 minutos 44 segundos, ocurrió un fuerte movimiento sísmico, en la ciudad de Nazca fue devastada después de 54 años, el epicentro del sismo, fue localizado a 135 km. al Sur Oeste de la ciudad de Nazca. Su epicentro se ubicó entre las coordenadas geográficas 14.993° Latitud Sur y 75.675° Longitud Oeste, con una profundidad de 33 km., magnitud de 6.5 en la Escala de Richter y tuvo una duración de 1 minuto 58 segundos (es probable que hayamos sufrido tres sismos

concadenados y no uno) con Intensidades en Nasca VIII, Marcona VII, Ica y Palpa VI, Arequipa y Camaná IV, Lima y Tacna III, Pucallpa y Huancayo II en la Escala Modificada de Mercalli, trajo como consecuencia la muerte de 16 personas, alrededor de 624 heridos, 4,000 viviendas destruidas, 11,000 viviendas afectadas, unos 90 colegios y 100 centros de salud afectados, contándose con un total de 73,000 damnificados. (Silgado, 1978)

EL 23 de junio de 2001 en Arequipa, un sábado a las 15 horas 33 minutos 48.5, ocurrió un fuerte Terremoto, que afectó toda la región del Sur del Perú incluyendo las ciudades de Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia, el epicentro fue localizado a 82 km. al Nor Oeste de la localidad de Ocoña, entre las localidades de Chala y Ocoña. Su epicentro se ubicó entre las coordenadas geográficas 16.20 Latitud Sur y 73.75 Longitud Oeste, con una profundidad de 29 km., Magnitud de 6.9 Mb, en la Escala de Richter, 7.9 Ms y 8.2 Mw y con Intensidades máximas se presentaron en las localidades San Francisco en Moquegua, Punta de Bombón, Catas (Valle de Tambo) y Camaná (VIII en MM), seguidas en la ciudad de Arequipa y sus distritos y las localidades de Atico, Aplao, Corire, la ciudad de Moquegua y sus distritos, Torata, Ilo y Locumba (VII en MM), las localidades de Chala, Caraveli, Cotahuasi, Pampacolca, Chivay, Toquepala, Candarave, Omate y la ciudad de Tacna y sus distritos, la intensidad fue de (VI en MM); en las localidades de Nazca, Lomas, Coracora, Puquio, Pausa, Antabamba, Espinar, Crucero Alto, Juliaca y Puno y Arica en Chile fue de (V en MM); en las localidades de Ica, Palpa, Huancapi, Abancay, Acomayo, Sicuani, Azangaro e Iquique en Chile (IV en MM); en las localidades de Pisco, Huancavelica, Quillabamba, Paucartambo y Sandia (III en MM). (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

“Defensa Civil informo que el terremoto del 23 de junio, produjo la muerte de 83 personas, 2,812 heridos, 66 desaparecidos, 219,420 damnificados, en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Ayacucho” (Silgado, 1978).

El 15 de agosto de 2007 en Pisco, miércoles 15 de agosto de 2007, a horas 18 con 45 minutos de la tarde, la región central del Perú experimentó nuevamente la furia con que la naturaleza actúa, en esta oportunidad mediante la ocurrencia de un terremoto de los más grandes producidos en los últimos 290 años. El terremoto, hoy conocido como de “Pisco”, tuvo una magnitud de 7.0 en la escala

de Richter (ML) y de 7.9 en la escala de magnitud momento (M_w), y produjo muerte y destrucción en las ciudades de Pisco y Chíncha en donde se llegó a evaluar intensidades de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). El radio de acción del terremoto de Pisco fue del orden de 250 km. A la fecha, el Instituto de Defensa Civil (INDECI) y el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) han informado que el sismo deja en la región 32,000 personas afectadas; 595 muertos, daños severos en 12 localidades con más de 230,000 viviendas dañadas; y 52,150 totalmente destruidas por problemas estructurales (viviendas de adobe muy antiguas y/o de concreto mal diseñadas) en Ica, Pisco y Chíncha, y por licuación de suelos principalmente en Chíncha (Tambo de Mora) y localidades aledañas. (Colegio de Ingenieros del Perú, 2018)

Este terremoto, a diferencia de otros ocurridos en Perú en los últimos 100 años, se caracterizó por presentar al menos dos frentes de liberación de energía con la propagación unilateral de la ruptura en dirección SE a una velocidad del orden de 2.4 km/seg. Asimismo, se ha registrado aproximadamente 4,500 réplicas cuyos epicentros se distribuyen sobre un área de 170×140 km² paralela a la línea de costa. En la tabla 3, podemos observar los sismos más importantes ocurridos desde 1582 al 2007. (Silgado, 1978)

Tabla 3

Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde al año 1500, según Silgado y Dorbath et al. Modificado por (Víctor Aguilar).

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad (Km)	Magnitud (Mw)
22/01/1582	16.6	71.6		7.5
10/07/1586	12.1	72.0		8.1
24/11/1604	17.0	70.9		8.4-8.7
14/02/1619	7.9	79.0		7.8-8.0
12/05/1664	14.1	75.8		7.5
16/06/1678	12.3	77.8		8.0
20/10/1687	13.2	76.5		8.2-8.4
21/10/1687	16.4	71.6		8.0
23/08/1715	17.3	70.8		7.5
07/01/1725	9.2	79.3		7.5
29/10/1746	11.9	77.1		8.5-8.6
13/05/1784	16.5	72.0		8.0
18/09/1833	18.2	71.0		7.7
13/08/1868	18.2	70.5	25	9.0
24/05/1940	11.2	77.7	50	8.1-8.2
24/08/1942	15.5	74.7	33	8.2
17/10/1966	10.3	78.6	37	7.7-8.1
31/05/1970	9.2	78.8	42	7.9
03/10/1974	12.2	77.5	21	7.9-8.1
12/11/1996	15.3	76.4	18	7.7
23/06/2001	16.2	73.7	29	8.3
15/08/2007	13.4	76.5	40	7.9

Nota: Dorbath et al, (1990).

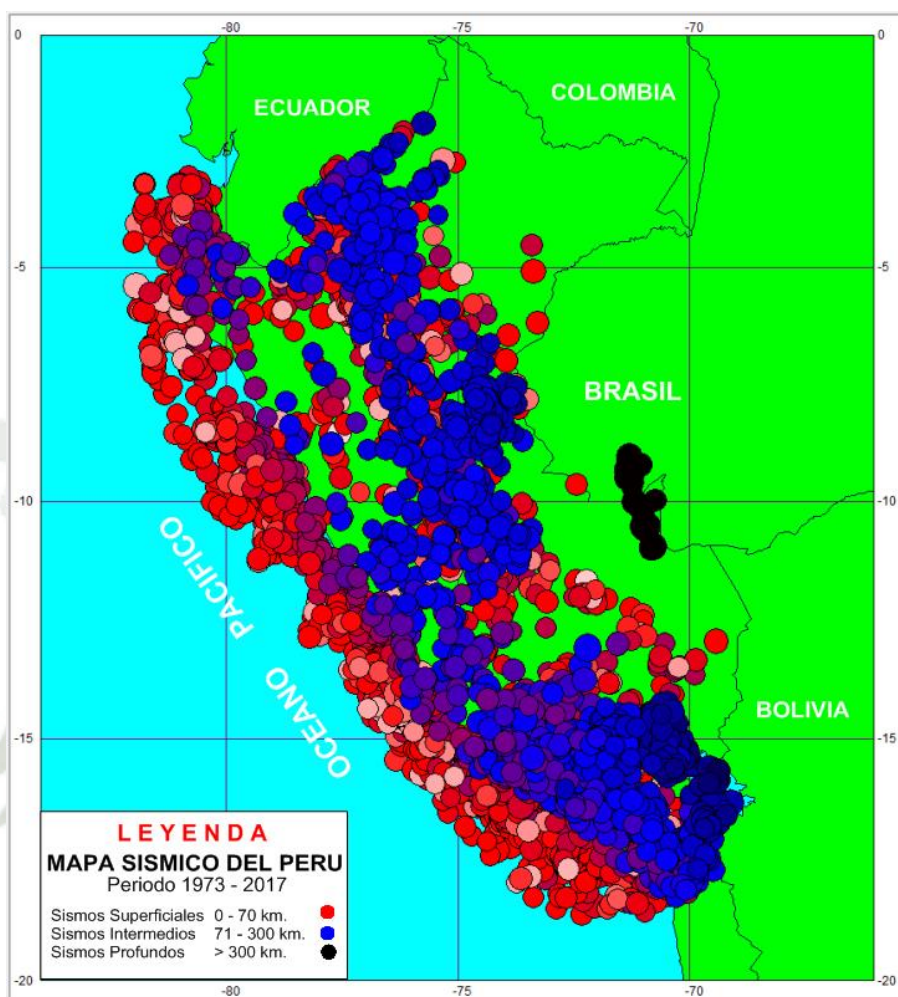
1.2. Sismicidad Instrumental del Perú

Mapa elaborado con datos del (NEIC), periodo de 1973 a 2020, con magnitudes ≥ 4.5 , para su mejor análisis se ha dividido según su profundidad: sismos superficiales, intermedios y profundos; tomando como una referencia la profundidad de sus focos. Figura 6. (Silgado, 1978)

La sismicidad con foco o profundidad superficial se localiza en la zona oceánica en dirección paralela a la línea de costa (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976). La sismicidad con foco o profundidad intermedia, se distribuye de manera irregular, pudiendo definirse tres zonas: la primera se distribuye paralela a la línea de costa por debajo de 9° Sur, un segundo grupo de sismos se localiza en el interior del continente a lo largo de la Cordillera Oriental y Zona Subandina. Para el tercer grupo, la actividad sísmica más profunda se localiza en la región Centro y Sur del Llano Amazónico. (Dorbath et al, 1990)

Figura 6

Mapa Sísmico del Perú, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020.



Nota: Elaboración propia.

Sismos con magnitudes mayores a 4.5, círculos rojos sismos superficiales, círculos azules sismos intermedios y círculos negros sismos profundos.

1.2.1. Fuentes Sismogénicas de Chile

Son fuentes de generación de terremotos que se han descrito, se distinguen zonas en las que se puede identificar características comunes y por ello se les asocia a una única estructura geológica. A estas zonas se les denomina fuentes sismogénicas, distinguiéndose: Outer-rise, Interplaca, Intraplaca de Profundidad Intermedia y Cortical. Figura 7. (Santibáñez Matamala, 2013)

1.3. Sismos Interplaca (40 - 60 km de profundidad)

En Chile se producen cuando el esfuerzo compresivo horizontal neto en la zona de contacto, también llamada zona de acoplamiento, entre la placa de Nazca y la Sudamericana supera al acoplamiento mecánico que traba el movimiento de éstas, produciéndose el movimiento relativo de las placas. También se conocen como terremotos de subducción. Corresponden a sismos compresionales con mecanismos de falla inversa y su magnitud es proporcional al desplazamiento y al área de la zona de desplazamiento. (Centro Sismológico de Nacional, 2016)

La profundidad de los terremotos en zona de acoplamiento se limita a una zona de profundidad máxima de 60 km. Cuando ocurren eventos de este tipo de gran magnitud y hay desplazamiento vertical del fondo oceánico, hay altas probabilidades de ocurrencia de tsunamis. Ejemplos de este tipo de sismos son el terremoto de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$) y el terremoto del Maule del 2010 ($M_w=8.8$). (Santibáñez Matamala, 2013)

1.4. Sismos Intraplaca de profundidad intermedia (50 – 250 km de profundidad)

Ocurren al interior de la placa oceánica a profundidades superiores a los 50 km hasta profundidades a las cuales se cree la placa pierde su comportamiento frágil (~700 km); sin embargo, en Chile las profundidades de estos sismos van entre los 50 km y los 250 km. Se ha observado que el potencial de daños de estos sismos es menor que el de los sismos interplaca de similar magnitud. Ejemplos de estos sismos son los terremotos de Chillán en 1939 ($M_s=8.0$) y Punitaqui en 1997 ($M_w = 7.1$). (Centro Sismológico de Nacional, 2016)

1.5. Sismos Superficiales o Corticales (< 60 km de profundidad)

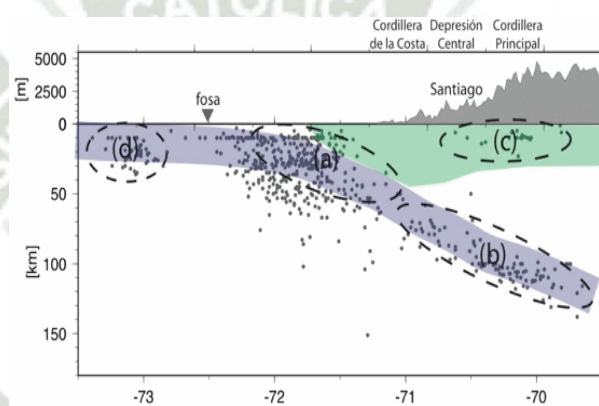
Ocurren dentro de la placa continental en la corteza a profundidades inferiores a los 60 km. Se deben principalmente a las deformaciones generadas por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa continental. Estas deformaciones son las que dieron origen al alzamiento de la Cordillera de los Andes y en general, son máximas en torno a ésta, tanto en Chile como en Argentina. Ejemplos de este tipo de sismos son los terremotos de Curicó (M_w 6.6, 2004), las Melosas (M_s 6.9, 1958) y Chusmiza (M_w 6.3, 2001). (Centro Sismológico de Nacional, 2016)

1.6. Sismos Outer-Rise (< 30 km de profundidad)

Ocurre en la costa afuera de la fosa oceánica. Esta deformación es causada por la deformación de la placa de Nazca y a los esfuerzos de flexión que están sobre ella, ubicándose en la zona de outer-rise o de máxima curvatura. Estos sismos son de baja profundidad y por lo general poseen magnitudes menores a 7.0, por lo general no hay tsunamis. Un ejemplo de este tipo de sismos es el terremoto del 2001 ($M_w=6.7$), frente a las costas de Valparaíso. (Centro Sismológico de Nacional, 2016)

Figura 7

Perfil esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC, registrada entre 1973 y 2007



Nota: Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, (2010)

Zona en la latitud $33,5^{\circ}\text{S}$ (considerando $0,5^{\circ}$ en dirección norte y sur), cada punto representa un sismo, independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia. El color azulado representa la posición esquemática de la placa de Nazca y verde, la placa Sudamericana. Las líneas punteadas indican la posición de las principales fuentes sismogénicas (ver detalles en el texto): (a) interplaca tipo thrust; (b) intraplaca de profundidad intermedia; (c) corticales y (d) outer-rise. Andean Geology. (Leyton et al., 2010)

1.7. Sismicidad Histórica de Chile

Los terremotos han sido una constante en toda la historia de Chile, siendo una de las regiones más sísmicas del planeta. Probablemente, muchos chilenos pueden acordarse dónde se encontraban durante los terremotos ocurridos en 1960 y 1985, incluso los de más edad recordaran el de Chillán de 1939. Con el pasar del tiempo, los terremotos han pasado a formar parte de la identidad colectiva de los chilenos, quedando registrados en la cultura popular a través de la tradición oral. (Ramos Chura, 2017)

En mayo de 1647 ocurrió el mayor terremoto registrado en las crónicas coloniales, el que redujo a escombros la ciudad de Santiago y provocó una aguda crisis económica en un país que, además, había sufrido devastadoras sequías. Similar impacto tuvo el gran sismo de 1730 en Valparaíso y 1751 en Concepción, que incluso provocó el cambio de ubicación de la ciudad. Durante el siglo XIX, dos fueron los terremotos más renombrados: el de 1822 en la zona central y el de 1835 en Concepción y Talcahuano. A ellos puede sumarse el terremoto y maremoto de Arica de 1868. En terremoto de 1906, ocurrió uno de los terremotos más desastrosos de la era republicana, Valparaíso principal puerto y centro financiero y comercial del país, fue destruido casi completamente. (Santibáñez Matamala, 2013)

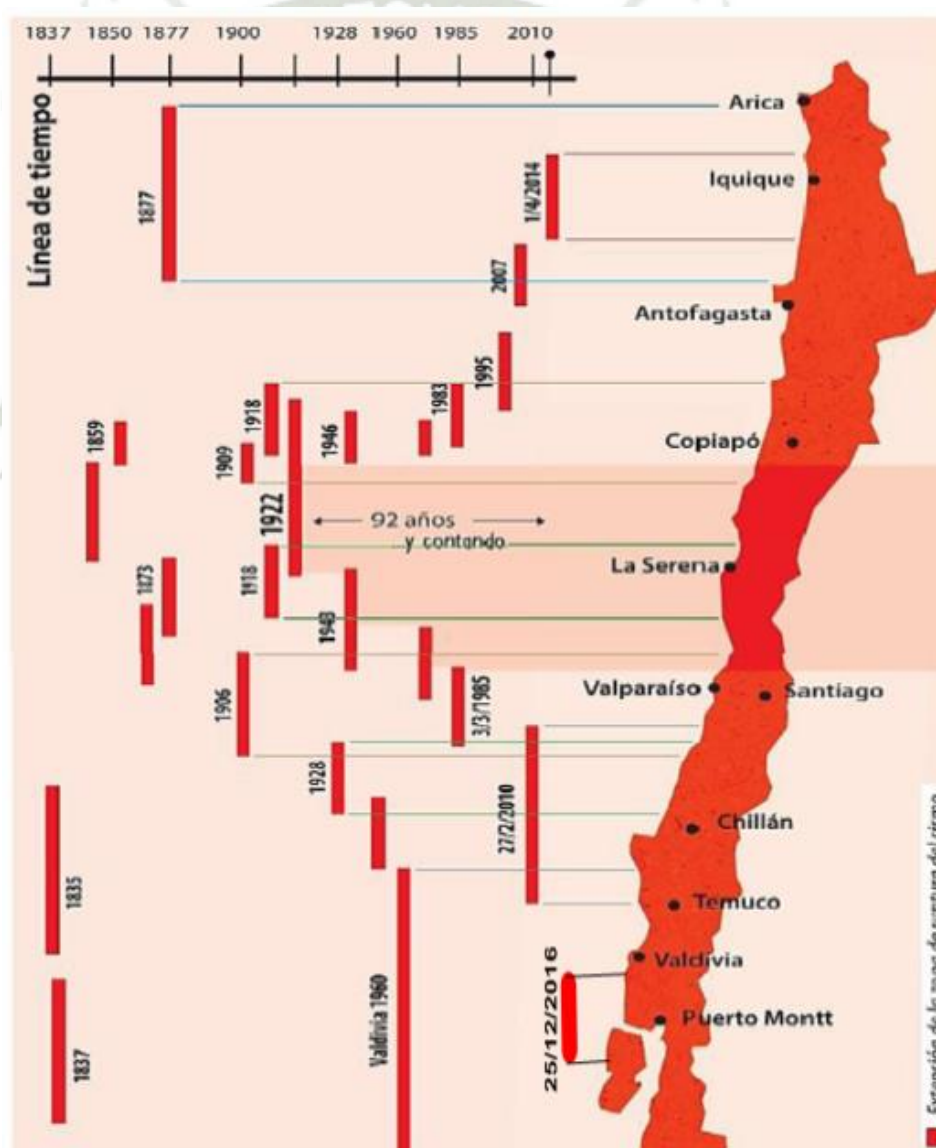
En 1960, el más fuerte movimiento registrado en el mundo 9.5 Mw devastó las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno, Llanquihue y Chiloé, al situarse su epicentro en el mar, en las cercanías de Valdivia. El sismo fue acompañado por un tsunami que provocó una sucesión de enormes olas que arrasaron con las ciudades costeras. Asimismo, el terremoto hundió algunas zonas que quedaron sumergidas bajo el mar, desatando un derrumbe en el río San Pedro que, de no haber sido solucionado rápidamente, habría arrasado con lo que quedaba de Valdivia. (Ramos Chura, 2017)

Cinco años más tarde, el 28 de marzo de 1965 a las 12:33, la ciudad de La Ligua sería sacudida por un fuerte sismo de 7,4 grados. El movimiento, cuyo epicentro estuvo situado en las cercanías de La Ligua, fue percibido desde Copiapó hasta Osorno. En la década siguiente, la zona norte y central, fueron afectadas por un terremoto grado 7,7 en la escala de Richter. El movimiento, registrado el 8 de julio de 1971, afectó desde Antofagasta a Valdivia, con mayor intensidad en Illapel, Los Vilos, Combarbalá y La Ligua. (Santibáñez Matamala, 2013)

En 1985 un nuevo sismo sacudió la zona central del país. El terremoto puso al descubierto la precariedad de las viviendas de adobe que abundaban en las ciudades y pueblos afectados. En 2007 se produjeron los terremotos de Aysén y de Tocopilla, pese a no dejar un gran número de víctimas, causaron enormes pérdidas materiales. Finalmente, en febrero del 2010 se produjo un terremoto de 8.8 Mw, siendo el segundo más destructivo en la historia chilena. Figura 8. (Ramos Chura, 2017)

Figura 8

Distribución de sismos importantes desde 1800 al presente de Chile con relación al lugar y al tiempo.



Nota: Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, (2020).

1.8. Sismos Importantes de Chile

Se define como terremotos importantes en el país de Chile cuya magnitud es igual o mayor a 7.0 Ms, estos eventos fueron medidos a partir de cómo fueron percibidos y por los daños que causaron en la población, siendo importantes ya que muestran información de las zonas sismogénicas de los siglos pasados. Los antecedentes históricos de la actividad sísmica en Chile son muy abundantes, por lo tanto, aquí se presentarán algunos de los terremotos que han afectado Chile del siglo XVI hasta la actualidad. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto de Concepción, 8 de febrero de 1570, los historiadores cuentan que a eso de las 9 de la mañana, en la ciudad de Concepción un fuerte terremoto derrumbó la mayor parte de la ciudad, a solo veinte años de su fundación. Además de ello indican que la tierra se habría abierto en varios lugares manando de su interior un agua negra con olor azufre y un violento maremoto destruyó, algunos momentos después, lo poco que quedaba en pie. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Valdivia, 16 de diciembre de 1575, las crónicas relatan que aproximadamente una hora y media antes del anochecer comenzó a temblar la tierra con gran fuerza y aumentando su intensidad sin dejar de hacer daño derribando tejados, techumbres y paredes. Además, señala que, tal cataclismo desplomó un cerro vecino a la salida del lago Riñihue, afluente del río Valdivia, lo que provocó la acumulación de una inmensa cantidad de agua. Después de cuatro meses, esta represa accidental cedió causando un desastre de grandes proporciones. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto de Santiago, 13 de mayo de 1647, a las 22:30, se escuchó un fuerte estrépito y luego se produjo un movimiento de la tierra tan violento, que los muros de los edificios comenzaron a agrietarse desde su base y a ceder las amarras de los techos. El terremoto de Valparaíso, 8 de Julio de 1730, hubo un movimiento sísmico ocurrido a las 04:45 (hora local) un terremoto de 8.7 de magnitud, con epicentro en Valparaíso. Fue percibido desde Iquique hasta Osorno, y dañó la infraestructura de las ciudades de Valparaíso, Santiago, La Serena y Concepción, las cuatro más pobladas del país de ese entonces y actualmente. Debido a su gran magnitud no provocó tantas muertes, quizás porque un terremoto previo puso en

alerta a los habitantes sobre posibles tsunamis, por lo que fueron evacuados a zonas más altas para el momento que este terremoto ocurrió. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 19 de noviembre de 1822, pasadas las 22:00, la fuerza de la tierra se abatió sobre Chile entre Illapel y Chiloé. Ya dos semanas antes un fuerte sismo había alertado a la población de Copiapó. Pero esta vez fue más intenso, cobrando más de doscientas víctimas y otros tantos heridos. Duró tres minutos y medio, que registró unas 170 réplicas a los días subsiguientes. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto de Concepción, 20 de febrero de 1835, a las 11:30 horas del día 20 de febrero de 1835, un terremoto asoló la zona de Concepción, la misma que un siglo más tarde se vería de nuevo en ruinas por un desastre similar. El terremoto arruinó una ancha faja de 1670 kilómetros, entre los ríos Cachapoal y Valdivia. Concepción y Chillán quedaron en el suelo. Primero se oyó un gran estrépito, seguido de sucesivas sacudidas en el sur y norte, en forma de olas que impedían a los pobladores mantenerse en pie. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Arica, 13 de agosto de 1868, un terremoto que fue sentido entre Guayaquil y Valparaíso asoló el norte de Chile. Arica, alrededor de las cinco de la tarde, donde el territorio peruano, recibió el mayor impacto, por el tsunami que se originó tras el sismo, afectó toda la costa sudamericana del Pacífico y parte de Oceanía. 300 muertos y cuantiosos daños materiales. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto de Valparaíso, 16 de agosto de 1906, todavía resonaban en la prensa los ecos de la catástrofe de San Francisco (EE.UU.) y de su incendio, ocurridos hacía cuatro meses. Poco antes de las 8 de la noche, se produjo la primera sacudida de la tierra que duró, según muchos testimonios, cuatro minutos. Posteriormente se calculó el número de muertos en más de 3000. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Antofagasta, 10 de noviembre de 1922, sucedió un sismo IX a X grados en la escala de Mercalli, a las 23:53 horas, con una magnitud de 8.5 Richter. Afectó entre Antofagasta y Santiago (norte a sur) y desde las Islas San Félix y San Ambrosio, hasta más allá de la cordillera de Los Andes. La ciudad más afectada fue Vallenar. Hubo 880 muertos, además de un número no precisado de heridos y damnificados. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 1 de diciembre de 1928, se produjo un sismo grado X a XI en la escala de Mercalli, a las 00:06 horas, con una magnitud de 8.3 Richter. Afectó desde Antofagasta hasta Puerto Montt, principalmente a la zona central del país y en particular, a las ciudades de Talca y Constitución. Resultaron muertas 300 personas y centenares de heridas y damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Chillán, 24 de enero de 1939, hubo un sismo de XI grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 23:30 horas aproximadamente, la tierra se sacudió afectando a las provincias de Maule, Linares, Ñuble y Concepción, llevándose consigo 5.648 vidas, según el informe oficial, y más de 30.000, según estimaciones de la prensa. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 6 de abril de 1943, ocurrió un sismo de X grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 12:07 horas, con una magnitud de 8.3 Richter. Afectó a Combarbalá, Illapel, Coquimbo y Aconcagua. Resultaron muertas 12 personas; 49 heridas y 23.550 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Copiapó, 2 de agosto de 1946, hubo un sismo de IX a X grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 15:19 horas, con una magnitud de 7.9 Richter. Afectó a Copiapó. Resultaron muertas 8 personas; 35 heridas, y 1.375 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto de Angol, 19 de abril de 1949, ocurrió un sismo de IX a X grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 23:39 horas, con una magnitud de 7.5 Richter. Afectó a Angol. Resultaron muertas 35 personas; 155 heridas y 2.065 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Punta Arenas, 17 de diciembre de 1949, con una intensidad de VII a VIII grados Mercalli. Se sintieron dos sismos uno a las 02:53 horas con una magnitud de 7.2 Richter, y el segundo, a las 11:07 horas, con una magnitud de 7.8 Richter. Afectando a Punta Arenas y como resultado hubo 6 muertos; 18 heridos y 225 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 6 de mayo de 1953, sucedió un sismo de IX a X grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 13:16 horas, con una magnitud de 7.6 Richter. Afectó a Ñuble, Concepción, Bío Bío y Arauco. Resultaron 12 personas muertas; 40 heridas y 11.750 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 6 de diciembre de 1953, este sismo tuvo una intensidad de IX a X grados en escala de Mercalli, a las 22:05 horas, con una magnitud de 7.4 Richter, que afectó a Calama. Como resultado hubo 3 personas muertas; 15 heridas y 1850 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 4 de setiembre de 1958, hubo un sismo de IX grados de intensidad en la escala de Mercalli a las 17:51 horas, con una magnitud de 6.9 Richter. Este sismo afectó a Las Melosas, El Volcán, San Alfonso, San Gabriel y Los Queltehues. Este sismo tuvo como resultado 4 personas muertas, 35 heridas y 175 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Valdivia, 22 de mayo de 1960, este terremoto ocurrió a las 15:11 horas, pero fue precedido por un terremoto de magnitud = 7,2 Ms el día 21 de mayo, y sus réplicas se mantuvieron hasta el día 6 de junio. Udías (1998) señaló que el terremoto estuvo acompañado de actividad volcánica y un importante maremoto. Fue reconocido como el mayor terremoto (medido por instrumentos) del mundo que afectó a gran parte del centro y sur de Chile, principalmente a la ciudad de Valdivia. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

La primera magnitud calculada fue de = 8,5 Ms en la escala de Richter, pero posteriormente fue recalculada usando la magnitud de momento sísmico quedando en 9,5 Mw. Los daños fueron enormes y el número de muertos se ha estimado en más de 5000. Madariaga 1998 indico, que este sismo produjo un tsunami que destruyó prácticamente todas las áreas costeras desde la península de Arauco hasta la isla de Chiloé. Hubo tres derrumbes de tierra que bloquearon el desagüe natural del Lago Riñihue hacia el Río San Pedro produciendo que se asolaran los pueblos ribereños y la parte baja de Valdivia. También se habla que en la zona cerca de Valdivia, se modificó marcadamente. La zona de rotura fue estimada en cerca de 100 kilómetros, Este terremoto ocasiono 1.600 muertos, 4.350 heridas y 50.000 damnificados. Tuvo una intensidad de 9.5 Richter, una de las mayores con registro histórico en el mundo y una intensidad de X a XI grados de intensidad. Hay que mencionar que después de este fuerte sismos algunos volcanes comenzaron a presentar actividad como es el caso del Complejo Volcánico Cordón Caulle. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 28 de marzo de 1965, fue un sismo de X grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 12:33 horas, con una magnitud de 7.4 Richter. Afectó a

Aconcagua, Valparaíso y Santiago. Esto ocasiono 280 personas muertas, 460 heridas y 101.500 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 28 de diciembre de 1966, fue un Sismo de VII grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 04:18 horas, con una magnitud de 7.8 Richter. Afectó a Taltal, Catalina y El Salvador. Resultaron 6 muertas personas; 30 heridas, y 975 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 20 de diciembre de 1967, hubo un Sismo de VII a VIII grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 18:52 horas, con una magnitud de 7.0 Richter. Afectó a Tocopilla y Calama. Resultaron 10 muertas personas; 40 heridas, y 1.150 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 8 de julio de 1971, fue un sismo de X grados de intensidad Mercalli, a las 23:03 horas, con una magnitud de 7.5 Richter. Afectó a Coquimbo, Salamanca, La Ligua, Llayllay, Tiltil y Santiago. Resultaron 85 muertas personas; 245 heridas y 284.000 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 10 de mayo de 1975, fue un sismo de VII grados de intensidad Mercalli, a las 10:27 horas, con una magnitud de 7.7 Richter. Afectó a las Regiones Octava y Novena. No hubo muertos ni heridos, sin embargo, los damnificados fueron 3.453 personas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 3 de marzo de 1985, a las 19:47 horas fue sentido en toda la zona comprendida entre Copiapó por el Norte y Valdivia por el Sur, una extensión de cerca de 2000 km (Lüders et al. 1988). Se considera importante porque es el primer sismo que se tiene registro detallado en la zona central de Chile. Tuvo una intensidad máxima de VIII en la escala modificada de Mercalli. (Villavicencio, 2005)

De acuerdo a Lüders et al la magnitud de este sismo fue de $= 7,8 M_s$ y tuvo una profundidad de 16 km, longitud de falla de 120 km, ancho de falla de 60 km, con un desplazamiento de 2 m. Afectó a las Regiones Quinta, Metropolitana, Sexta y Séptima. Resultaron 177 muertas personas; 2575 heridas y 979.792 damnificadas. (Lüders et al, 1988)

El terremoto del 8 de agosto de 1987, fue un sismo de VII a VIII grados de intensidad en la escala de Mercalli a las 11:48 horas con una magnitud de 7.1 Richter. Afectó a la Primera Región. Resultaron 3 muertos; 44 heridas, y 923 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 30 de julio de 1995, hubo un sismo de VII grados de intensidad en la escala de Mercalli, a las 01:11 horas, con una magnitud de 7.3 Richter. Afectó desde la Región de Antofagasta hasta la Región de Coquimbo. Resultaron 3 muertos; 9 heridos y 9.115 damnificadas. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 15 de octubre de 1997, fue un sismo de VII grados de intensidad Mercalli, a las 22:03 horas, con una magnitud de 6.8 Richter. Afectó desde la Segunda hasta la Novena Regiones. Resultaron 8 muertos; 360 heridas y 59.913 damnificadas. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 23 de junio de 2001, fue un sismo de VII grados de intensidad Mercalli a las 16:34 horas con una magnitud de 8.2 Richter. Su epicentro fue a 190 Km al sur del Perú, percibiéndose en Arica, Iquique, Calma, Chuquicamata y Tocopilla. El movimiento telúrico afectó el casco antiguo de la ciudad de Arica, dejando 56 damnificados, 1.300 afectados, 256 viviendas destruidas, 673 viviendas dañadas, hubo corte de suministro eléctrico y telefónico, daños menores. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 18 de abril de 2002, fue un sismo grado VII en la escala de Mercalli a las 12:08 horas con una magnitud de 6.3 Richter. Su epicentro se ubicó 30 Km al Este-Sur-Este de Copiapó, abarcando 1.500 Km de extensión (Regiones de Antofagasta al Maule). Resultaron 2.424 damnificados, 34 viviendas destruidas, 575 viviendas dañadas, 12 caminos cortados y daños no estructurales en edificios. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 13 de junio de 2005, a las 18:44 horas del 13 de junio de 2005, un terremoto de magnitud igual a 7,8 Ms afectó a la I Región de nuestro país. A pesar de su magnitud, los daños fueron pocos, pues la zona más afectada es poco poblada. La intensidad máxima fue de VII en la escala de Mercalli, cerca de Iquique. Esta vez las víctimas fueron sólo 11, preliminarmente, y alrededor de 130 los heridos. Por lo menos 1.400 viviendas, casi todas de adobe, sufrieron daño estructural grave y 180 fueron completamente destruidas. Los damnificados ascendieron a 6.018. (Villavicencio, 2005)

El terremoto del 14 de noviembre de 2007, fue un sismo que fluctuó entre los II y VIII grados en la escala de Mercalli afectó a las 12:43 horas entre las regiones de Antofagasta y Valparaíso. El epicentro se localizó 35 Km al este de Tocopilla (Región

de Antofagasta) con una magnitud de 7.7 Richter. Las intensidades mayores en Mercalli se percibieron en Tocopilla (VIII grados) María Elena, Mejillones, Calama y Antofagasta (VII grados). Resultaron dos personas fallecidas. En la comuna de Tocopilla se consignaron 3.700 familias con sus viviendas destruidas y 3.200 con sus inmuebles con distinto tipo de daños. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 27 febrero de 2010, terremoto de magnitud 8.8, percibido desde la Región de Antofagasta hasta la Región de Los Lagos, con intensidades de Mercalli que fluctuaron entre los II y IX grados. El epicentro se localizó a 63 km al SW de Cauquenes y a una profundidad de 47.4 km. El terremoto causó un tsunami que afectó fuertemente a las localidades del borde costero emplazadas en la Región del Maule y del Bío Bío. (Villavicencio, 2005)

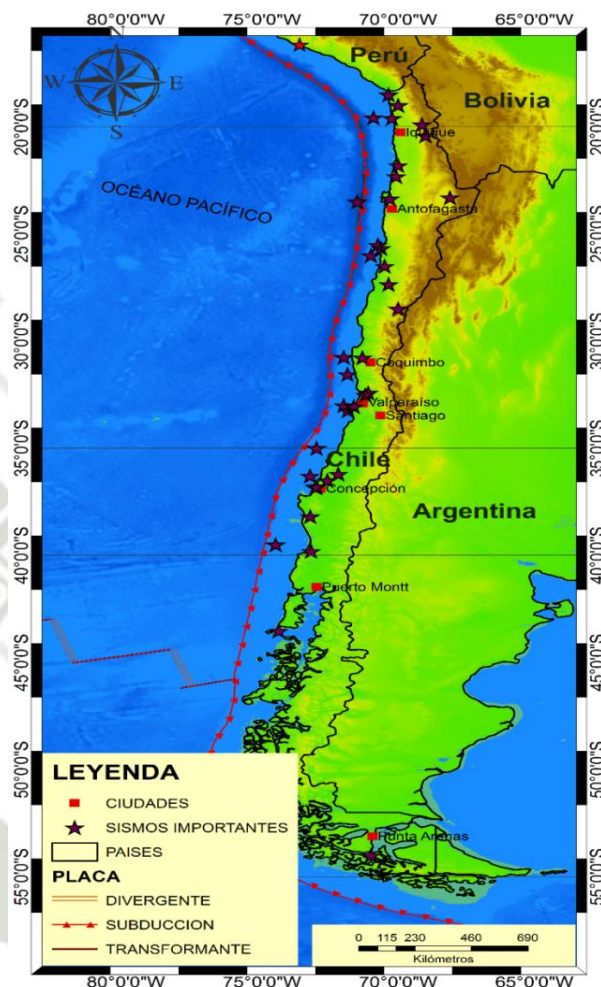
El terremoto del 1 de abril del 2014, se ubicó a unos 10 kilómetros de profundidad a 99 km al noroeste de Iquique y a 449 km al suroeste de la Paz, Bolivia. El sismo produjo 6 muertos y 972.000 personas son evacuadas. Este terremoto tuvo una magnitud de 8.2 que afectó las regiones norteñas de Arica, Parinacota y Tarapacá. Produciendo tsunamis desde 1.80 m hasta 2.13 m. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

El terremoto del 16 de septiembre del 2015, tuvo una magnitud 8,4 en el centro y norte del país que causó tres víctimas mortales, según un balance provisional, y serios daños materiales, Las autoridades decretan alerta de tsunami y obligan a evacuar todas las ciudades y pueblos costeros del país. (Villavicencio, 2005)

El terremoto de Chiloé del 25 de diciembre del 2016 fue un sismo de magnitud 7,6 Mw ocurrido a las 11:22:26 hora local. El epicentro se ubicó en el mar, a 42 kilómetros al suroeste de la ciudad de Quellón, región de los Lagos. El movimiento sísmico tuvo una profundidad de 35,2 kilómetros y alcanzó una intensidad de grado VIII Mercalli en Quellón. Figura 9. (Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile, 2020)

Figura 9

Sismos importantes de Chile desde el año 1570 hasta el presente



Nota: Elaboración propia.

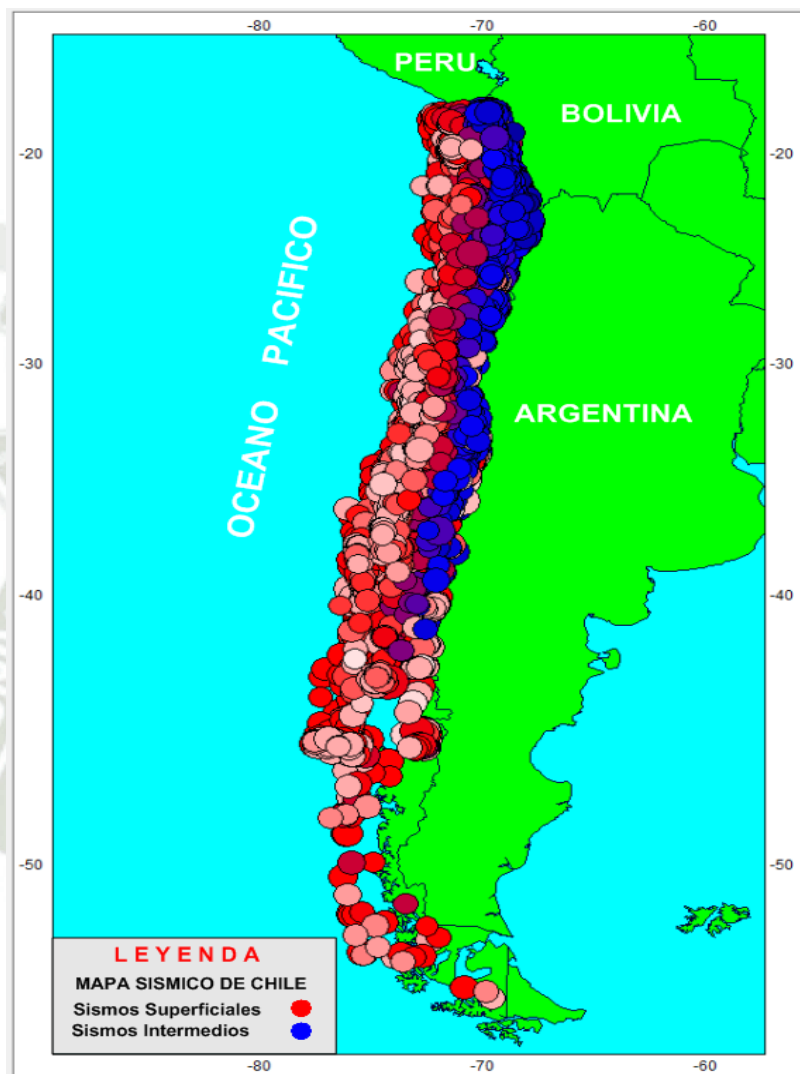
1.9. Sismicidad Instrumental de Chile

“Los sismos fueron utilizados del catálogo de la National Earthquake Information Center (NEIC), el cual permitirá determinar el mapa de la distribución espacial de la sismicidad, desde los 18.5 ° a 50° Latitud Sur, magnitudes ≥ 4.5 . Figura 10” (Villavicencio, 2005).

La sismicidad del país es diferente a lo largo de sus distintas regiones. Los sismos superficiales se distribuyen a lo largo de la zona costera o cerca de ella en todo el país. La sismicidad intermedia se encuentra presente dentro del continente desde los 18° hasta los 40° S, la sismicidad superficial se observa más entre la fosa y la línea de costa, en el Norte y centro es mayor y en Sur se puede apreciar muy poco o casi nula presencia de la sismicidad. (Ramos Chura, 2017)

Figura 10

Mapa Sísmico de Chile, fue elaborado con datos de National Earthquake Information Center (NEIC), periodo de 1973 – 2020



Nota: Elaboración propia.

Sismos con magnitudes mayores a 4.5 Magnitud, círculos rojos sismos superficiales y círculos azules sismos intermedios.

1.9.1. Distribución Espacial de las Áreas de Ruptura y Lagunas Sísmicas en el borde Occidental de Sudamérica

La continua ocurrencia de sismos de gran magnitud frente al borde Occidental de Sudamérica ha permitido a través de la historia evaluar el gran potencial que presenta esta principal fuente sismogénica. Desafortunadamente, los diferentes catálogos sísmicos que existen no son homogéneos, ni están completos, pero desde el punto de vista observacional es posible identificar diversas áreas en las cuales existiría la probabilidad de que ocurra un sismo en el futuro, siendo las áreas conocidas como lagunas sísmicas. (Ramos Chura, 2017)

Estas áreas están rodeadas de otras en las cuales ya ocurrieron sismos importantes, lo cual permite afirmar que la energía liberada por estos sismos se habría acumulado en dichas áreas. Resulta sencillo identificar en el tiempo las lagunas sísmicas en función de la distribución de las áreas de ruptura asociados a sismos de gran magnitud. (Villavicencio, 2005)

“En la tabla 4 se presentan los parámetros hipocentrales y valores de magnitud de los sismos más importantes (magnitudes ≥ 8) ocurridos en el borde occidental de Sudamérica desde el año 1500 a la fecha” (Ramos Chura, 2017).

Tabla 4

Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el Borde Oeste de Sudamérica desde el año 1500 ($M_w \geq 8$)

Año	Latitud	Longitud	Prof.	Mag. (M_w)	Long. de rupt. (Km)	País
08/02/1570	-36.800	-73.000	-	8.3	170	Chile
16/12/1575	-39.800	-73.200	-	8.5	430	Perú
10/07/1586	-12.200	-72.000	-	8.1	175	Perú
24/11/1604	-17.000	-70.900	30	8.7	450	Perú
16/09/1615	-18.500	-70.500	-	8.8	180	Chile
13/05/1647	-35.000	-72.000	-	8.5	360	Chile
15/03/1657	-36.830	-73.030	-	8.0	140	Chile
20/10/1687	-13.200	-76.500	-	8.4	300	Perú
08/07/1730	-33.050	-71.630	-	8.7	500	Chile
25/05/1751	-36.830	-73.030	-	8.5	320	Chile
29/10/1746	-11.900	-77.100	-	8.6	500	Perú
13/05/1784	-16.500	-72.000	-	8.0	300	Perú
11/04/1819	-27.350	-70.350	-	8.3	320	Chile
19/11/1822	-33.050	-71.630	-	8.5	200	Chile
20/02/1835	-36.830	-73.030	-	8.5	190	Chile
07/11/1837	-39.800	-73.200	-	8.0	280	Chile
13/08/1868	-18.200	-70.800	25	9.0	500	Perú
09/05/1877	-21.000	-70.300	-	9.0	500	Chile
31/01/1906	-0.955	-79.369	20	8.8	500	Ecuador
16/08/1906	-32.400	-71.400	35	8.2	250	Chile
10/11/1922	-28.293	-69.852	25	8.5	340	Chile
01/12/1928	-35.000	-72.000	-	8.3	230	Chile
24/01/1939	-36.120	-72.120	60	8.3	200	Chile
24/05/1940	-11.094	-77.487	50	8.2	180	Perú
24/08/1942	-14.819	-74.708	33	8.2	200	Perú
06/04/1943	-30.750	-72.000	55	8.2	320	Chile
22/05/1960	-39.500	-74.500	25	9.5	800	Chile
17/10/1966	-10.665	-78.228	37	8.1	100	Perú
03/10/1974	-12.200	-77.500	21	8.1	140	Perú
12/12/1979	1.620	-79.420	24	8.2	205	Ecuador

03/03/1985	-33.135	-71.871	33	8.0	120	Chile
30/07/1995	-23.340	-70.294	46	8.0	180	Chile
23/06/2001	-16.265	-73.641	29	8.2	350	Perú
15/08/2007	-13.386	-76.603	39	8.0	160	Perú
27/02/2010	-36.122	-72.898	30	8.8	450	Chile
01/04/2014	-19.610	-70.769	39	8.2	150	Chile
16/09/2015	-31.573	-71.674	22	8.2	225	Chile
16/04/2016	0.382	-79.922	20	7.8	160	Ecuador
25/12/2016	-45.517	-74.391	30	7.6	100	Chile

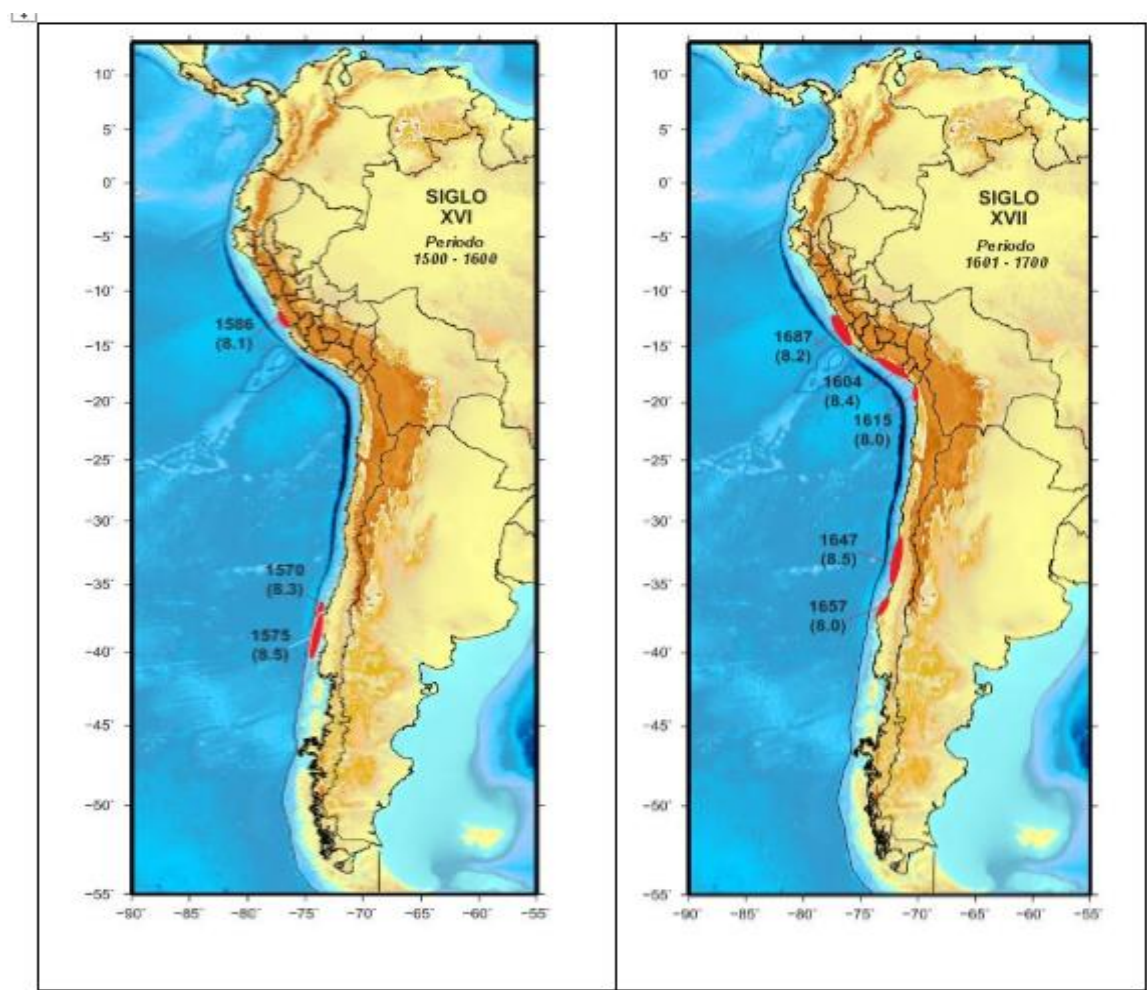
Nota: Silgado, (1978); Dorbath & al, (1990); Comte & Pardo, (1991).

Para el mejor análisis de la información se decide proyectar las áreas de ruptura de los sismos por siglos, iniciando en el siglo XVI hasta el siglo XXI. En las Figuras 12, 13 y 14, se presenta seis periodos de tiempo en los cuales se han producido importantes sismos. (Ramos Chura, 2017)

Siglos XVI, XVII. En la figura 11 se muestra la distribución espacial de las áreas de ruptura para los siglos XVI y XVII, la primera imagen corresponde al Siglo XVI, periodo de 1500 a 1600. Durante este tiempo solo se produjeron 3 sismos; uno frente a la costa central del Perú en el año 1586 (Lima) con una longitud de ruptura de 175 km, y 2 frente a la costa Sur de Chile, un sismo en el año 1570 con una magnitud de 8.3 Mw y una longitud de ruptura de 170 km, el otro sismo se dio en el año 1575 con una magnitud de 8.5 Mw y una longitud de ruptura de 430 km aproximadamente. En el siglo XVII, periodo comprendido entre los años 1601 a 1700, se produjeron hasta 5 sismos, 2 de ellos en la parte Sur del Perú en el año 1604 (Arequipa) con una magnitud de 8.4 Mw y una longitud de ruptura de 450 km, otro sismo en el año 1687 con una magnitud de 8.2 Mw, con una longitud de ruptura de 300 km. Los otros 3 sismos se produjeron en Chile, uno en el Norte en el año 1615 con una magnitud de 8.0 Mw y una longitud de ruptura de 180 km, los otros 2 sismos ocurrieron en la parte Central de Chile uno en el año 1647 con una magnitud de 8.5 Mw y una longitud de ruptura de 360 km, el otro sismo ocurrió en el año 1657 con una magnitud de 8.0 Mw y una longitud de ruptura de 140 km aproximadamente. Se puede observar que la mayoría de estos sismos produjeron en las zonas conocidas como lagunas sísmicas. (Comte & Pardo, 1991)

Figura 11

Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XVI y XVII



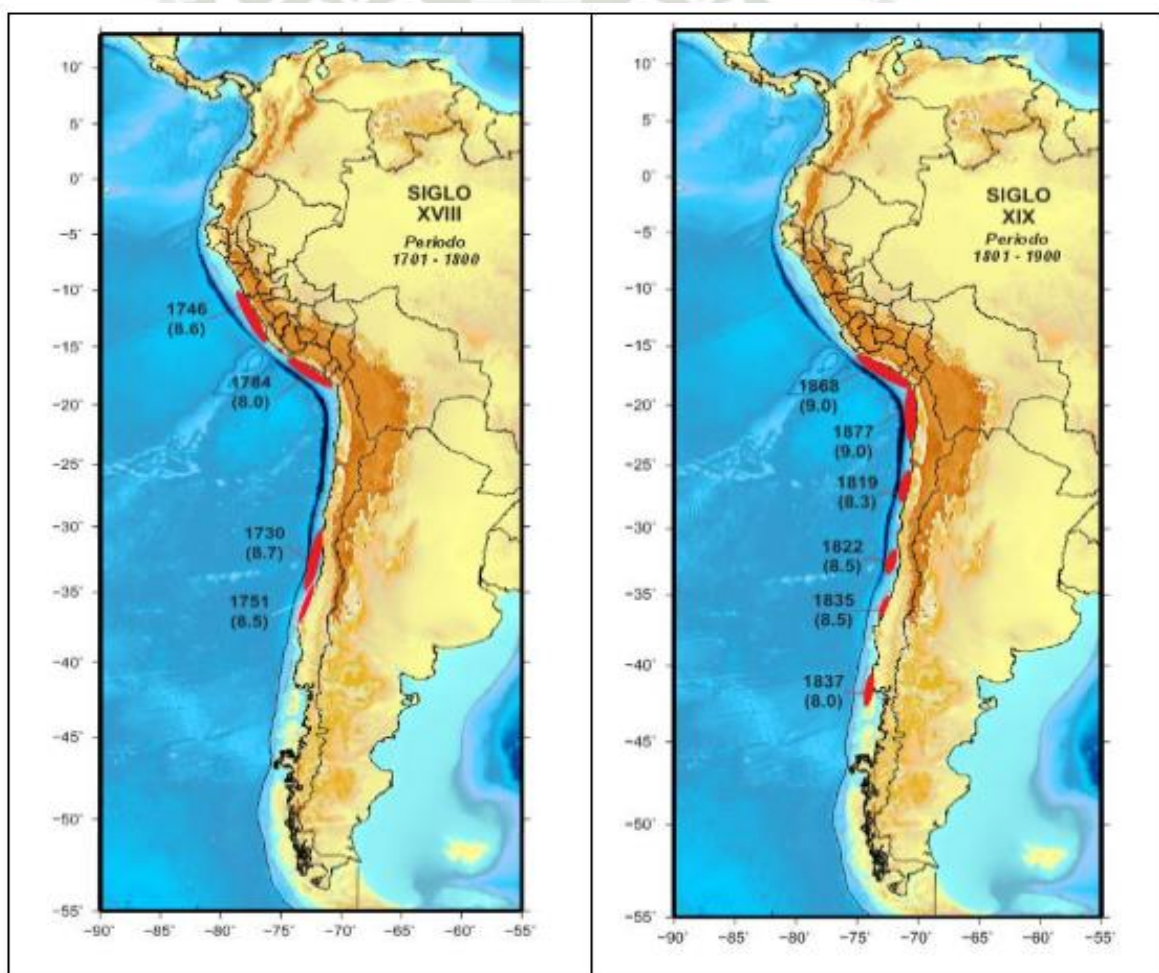
Nota: Ramos Chura, (2017).

Siglos XVIII, XIX. En la figura 12 se muestra la distribución espacial de las áreas de ruptura para los siglos XVIII y XIX. La primera imagen corresponde al Siglo XVIII, en este periodo, de 1701 a 1800, se puede observar la ocurrencia de 4 sismos casi en las mismas zonas en donde se produjeron los sismos anteriores, con la diferencia que estos últimos sismos produjeron áreas de ruptura entre los 300 a 500 km. Durante este periodo se produjeron 2 de los más grandes sismos conocidos en el Perú, el de Lima en 1746 de 8.6 Mw y una longitud de ruptura de 500 km y el de Arequipa en 1784 de 8.0 Mw con una longitud de ruptura de 300 km, ambos produjeron tsunamis con olas que alcanzaron los 17 metros de altura. (Comte & Pardo, 1991)

En el periodo de 1801 a 1900, se produjeron 6 sismos, de los cuales los de mayor magnitud ocurrieron, uno de ellos en la región Sur del Perú con el sismo del 13 de agosto de 1868 con una magnitud de 9.0 Mw y una longitud de ruptura de 500 km, y otro en la región Norte de Chile con el sismo del 05 de octubre de 1877 de magnitud 9.0 Mw y con una longitud de ruptura de 500 km. Hacia el Norte del área de ruptura del terremoto de 1868, se puede observar la ausencia total de estos sismos de gran magnitud incluyendo los países de Ecuador y Colombia. (Ramos Chura, 2017)

Figura 12

Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XVIII y XIX



Nota: Ramos Chura, (2017).

Siglos XX, XXI. En la figura 13 se muestra los sismos en los siglos XX y XXI, el primer sismo fue en el año 1906 en la zona de Ecuador límite con Colombia de magnitud 8.8 Mw con una longitud de ruptura de 500 km, el cual fue percibido en ambos países. (Comte & Pardo, 1991)

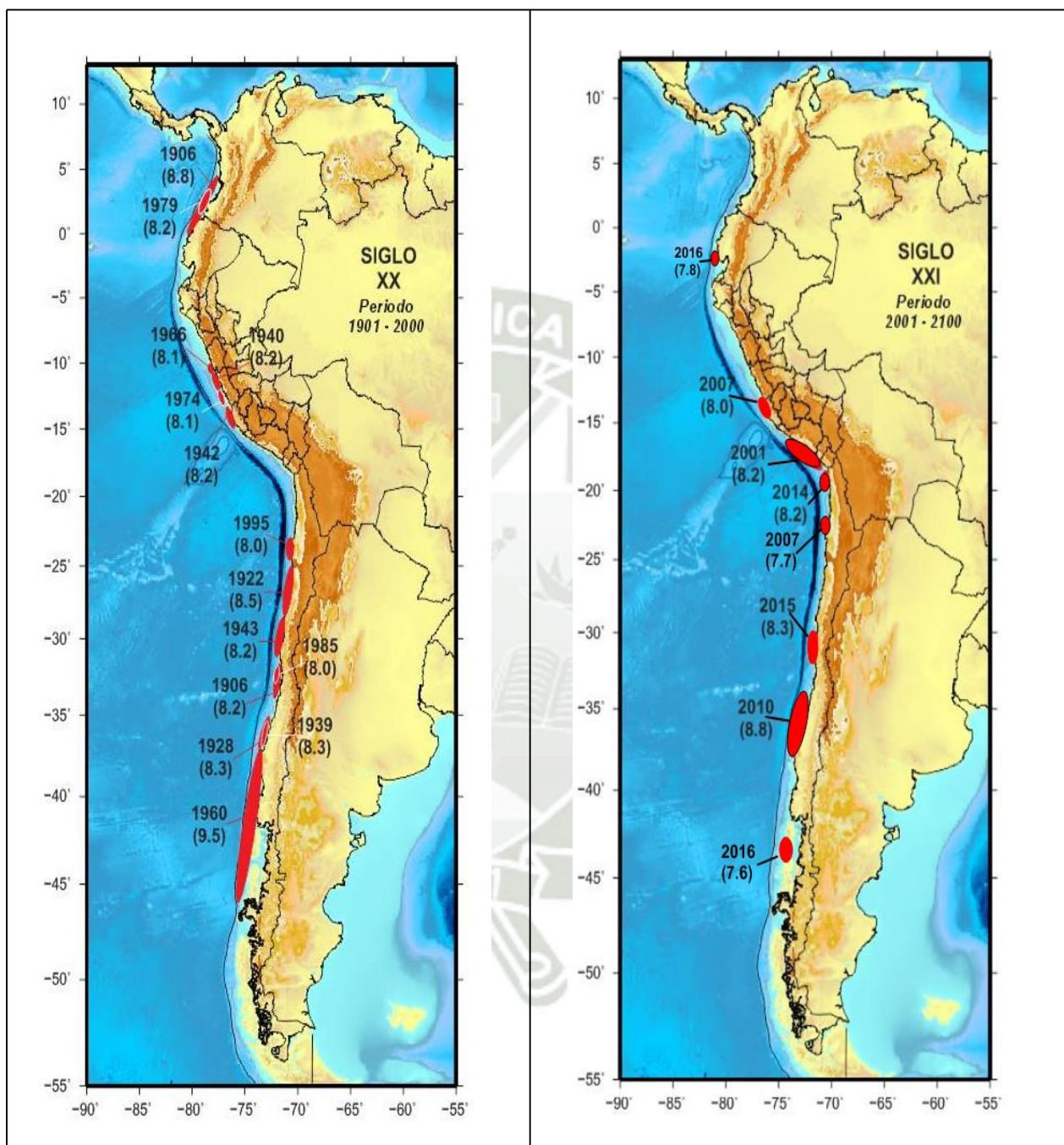
“Otro gran terremoto se presentó en Chile en 1960, el más grande de la historia, el cual se haya tenido información sísmica instrumental, de una magnitud de 9.5 Mw y una longitud de ruptura de 850 km” (Ramos Chura, 2017).

Se observa de manera muy clara la presencia de lagunas sísmicas, en la región Norte del Perú, así como en la región Sur del Perú y Norte de Chile respectivamente, en donde se presentaron los sismos en los años de 1868 y 1877. (Comte & Pardo, 1991)

En el presente siglo XXI se han producido 7 sismos: el primero se presentó en Ecuador de 7.8 Mw en abril 2016, con longitud de ruptura de 160 km; 2 en el Perú y fueron ubicaron al Sur del país, en el año 2001 en la ciudad de Arequipa con una magnitud de 8.2 Mw y una longitud de ruptura de 350 km (Tavera et al. 2002) y otro sismo el 2007 en la localidad de Pisco con una magnitud de 8.0 Mw y una longitud de ruptura de 160 km., y finalmente 4 sismos ocurrieron en Chile, uno de ellos en el extremo Norte en el año 2014 con una magnitud de 8.2 Mw y una longitud de ruptura de 150 km, los otros 2 sismos ocurrieron en la zona central de Chile, el de mayor magnitud fue el 2010 de 8.8 Mw con una longitud de ruptura de 450 km, el otro sismo ocurrió el 2015 con una magnitud de 8.3 Mw, con una longitud de ruptura de 225 km., el último fue al sur de Chile, el 25 de diciembre del 2016, con una área de ruptura de 100km. (Ramos Chura, 2017)

Figura 13

Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XX y XXI.



Nota: Ramos Chura, (2017).

1.10. Análisis de antecedentes investigativos

En este estudio de Heras, se realizó un análisis de la distribución espacial de la sismicidad (0°S - 20°S) asociada al proceso de interacción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso de subducción presente en Perú ($h < 60\text{km}$), con la finalidad de identificar las aéreas más probables para la ocurrencia de futuros terremotos de magnitud $M_s > 7.2$. Estas aéreas se presentan asociadas como gaps sísmicos también conocidos en términos de ruptura sísmica como Aspereza. Para tal objetivo, se hace uso de la hipótesis de que los valores anómalos de $b < 0.6$ obtenido probabilísticamente a partir de la distribución frecuencia magnitud definida por Gutenberg y Richter 1944, 1954, permite identificar asperezas. El valor de b , es obtenido aplicando la metodología desarrollada por Wiemer y Wyss 1997. La base de datos utilizada considera 1200 sismos ocurridos entre 1964-1999 con un umbral mínimo de magnitud de 3.5 M_s . Estos datos corresponden a la extraída de los catálogos del Instituto Geofísico del Perú, NEIC y Engdahl. Los resultados obtenidos en este estudio han permitido identificar, para la zona de subducción de Perú, la presencia de siete asperezas de diferentes dimensiones y se ubican en la región Norte: en el límite de Perú y Ecuador (2.5° - 3.0°S), frente a la costa Sur de Piura (6.5° - 7°S), costa de Ancash (10° - 11°S) y costa norte de Lima (12° - 13°S). En la región Central, las asperezas se encuentran en el límite de Lima e Ica (13.5° - 14°S), a lo largo de la costa de Ica (15° - 18°S). Para estas asperezas, los terremotos presentan periodos de retorno de 50 años aproximadamente. Las asperezas con periodos de retorno del orden de 100 a 150 años se ubican frente a la costa de La Libertad (8°S), costa central de Lima (13°S) y en el extremo norte de la costa de Arequipa (17°). En este estudio se ha identificado la presencia de 7 asperezas o aéreas probables de producir o ser afectado por un terremoto en el futuro. De estas aéreas, tres han sido definidas como las de mayor o alta probabilidad, las mismas que fueron ubicadas frente a la costa de Ancash, costa Norte de Lima y costa norte de Lima constituyéndose como las zonas de mayor peligro sísmico. La metodología, simplemente identifica las aéreas que presentan la mayor probabilidad de ser afectados por un terremoto y no se le puede considerar como una regla en la predicción. (Heras, 2002)

En la investigación de Aguilar, la actividad sísmica de Perú tiene su origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, presente de Norte a Sur en su borde Occidental, con una velocidad promedio del orden 7-8 cm/año. Este proceso es responsable de la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud que se hayan producido frente a la línea de costa, todos asociados al contacto sismogénico interplaca. La acumulación de sismos en dichas áreas puede ser explicada con el modelo de Asperezas, el mismo que está basado en la idea de los gaps o lagunas sísmicas presentes en las zonas de subducción y fue desarrollado por Kanamori. En estas zonas, los terremotos grandes tienden a repetirse en el mismo lugar después de un determinado período de tiempo. Los esfuerzos iniciales no son homogéneos, debido al hecho de que ha habido terremotos antes del sismo actual y los esfuerzos han sido liberados. El nuevo terremoto comienza donde no habido terremotos con anterioridad y en donde hay fuerte acumulación de esfuerzos. El objetivo de este estudio consiste en identificar la presencia de asperezas y/o agrupamientos de sismos a partir de la distribución espacio tiempo de sismicidad superficial ocurrido en el Sur del Perú entre las coordenadas 13° - 19° Sur y 69° - 78° Oeste. El análisis de la distribución espacial de la sismicidad superficial ha permitido identificar la presencia de asperezas con diferentes dimensiones y longitudes, todas ellas ubicadas entre los sismos ocurridos en los años 2001 y 1996. En estas áreas ocurrieron sismos en el pasado; por lo tanto, ellos ocurrirán en el futuro y posiblemente tengan las mismas características en cuanto a la ubicación hipocentral y tamaño (magnitud). La historia sísmica indica que en la región Sur del Perú los sismos de magnitud elevada que produjeron longitudes de ruptura del orden de 300–500 Km. (Aguilar et al, 2004)

Por otro lado, Tavera y Bernal, indican que la información contenida en el catálogo sísmico del Perú ha sido utilizada para analizar y evaluar la distribución espacial de las áreas d ruptura producida por sismos de gran magnitud ocurridos en el borde Oeste del Perú. La distribución temporal de las áreas de ruptura ha permitido visualizar, desde el año de 1500 la presencia de diversas lagunas sísmicas de diferentes dimensiones que han dado origen a sismos de gran magnitud en el pasado. Las características espacio-tiempo de las áreas propensas a ser afectadas por un sismo. En la actualidad, en el borde oeste del Perú se ha identificado la presencia de 3 lagunas sísmicas que en el futuro darían origen a igual número de sismos. Estas lagunas se ubican entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996 (150

km. de longitud); 2001 y 1996 (90 km. De longitud); y al Sur del área de ruptura del sismo de 2001 (150 km. de longitud). Esta última puede involucrar a la gran laguna sísmica presente en la región Norte de Chile (500 km. de longitud). El análisis y evaluación de las áreas de ruptura de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste del Perú, ha permitido aceptar que dicho borde de convergencia de placas, es uno de los mayores en cuanto a su potencial sísmico se refiere. Sin embargo, a la pregunta ¿Dónde y cuándo se producirá el próximo sismo? Aún no es posible dar respuesta debido a que los métodos hasta hoy desarrollados para la predicción de sismos requieren conocer en detalle todo el proceso que antecede a la ocurrencia de los mismos, conocimiento aun que se sigue buscando. En la actualidad, se sigue en la investigación desarrollo y aplicación de diversos métodos geofísicos a fin de poder contar con la mayor cantidad de información sobre las propiedades físicas, geológicas y tectónicas de las regiones propensas a ser afectadas por un sismo. En este estudio, se puede llegar a la conclusión de que se conoce la ubicación de las áreas potencialmente sísmicas; además, su historia sísmica permite estimar el tamaño de los futuros sismos que en ella pudiera ocurrir, sin embargo, solo la fecha en que se produciría el sismo no puede ser determinada con exactitud. En general, los grandes sismos pueden tener periodos de recurrencia de muchos años y su tamaño suele ser proporcional al periodo de acumulación de energía y a las dimensiones del área comprometida en la futura ruptura. (Tavera & Bernal, 2005)

El presente estudio de Condori y Tavera, evalúan la presencia de zonas de acoplamiento en la zona de contacto interplacas que definen áreas con niveles significativos de asperezas en el borde occidental de Perú. Estas zonas son propensas a generar sismos de gran magnitud, como consecuencia del proceso de subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Se aplica la metodología propuesta por Wiemer y Wyss para evaluar la variación espacio-tiempo del parámetro “b” haciendo uso del catálogo sísmico del IGP para el periodo de 1970 a 2010, considerando sismos con magnitudes $M_s = 3.8$. Los resultados permiten inferir la presencia de 5 asperezas ubicadas entre los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, a saber: una zona de fricción al Norte del departamento de Arequipa; dos áreas de asperezas frente a la costa de Lima y Ancash; y otra zona entre los departamentos de Piura y Lambayeque. Los potenciales sismos asociados a

estas asperezas presentan periodos de ocurrencia de entre 40 a 70 años, considerando sismos con magnitudes iguales o mayores a 7Ms. (Condori & Tavera, 2012)

La aplicación de la metodología propuesta por Wiemer y Wyss 1997, en el borde occidental del Perú, permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Primero, los valores del parámetro “b” a lo largo del borde occidental del Perú varían entre 0.5 a 1.1 y los periodos de recurrencia para sismos con magnitud mayor a 7.0Ms, oscilan entre 50 y 70 años. Estos valores sugieren que la región de estudio es, por demás, compleja y heterogénea en su proceso de deformación y acumulación de energía.
- Y segundo, la distribución espacial de los valores del parámetro “b”, han permitido identificar la ubicación geográfica de 5 zonas de acoplamiento asociado con altos niveles de asperezas, probables de generar sismos con magnitudes mayores a 7.0Ms. Estas áreas han sido identificadas como:
 - Asperiza ubicada en la región sur del Perú, frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte Sur del departamento de Arequipa, (16.436 ° a 19.129 ° S).
 - Asperiza ubicada al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad de Yauca, (15.564° a 16.147° S). (Condori & Tavera, 2012)
 - Asperiza ubicada en la región centro del Perú, frente a la costa del departamento de Lima (12.130° a 13.367° S).
 - Asperiza ubicada frente a las costas de los departamentos de Ancash y parte norte del departamento de Lima (9.417° a 11.914° S).
 - Asperiza ubicada en la parte norte del Perú, exactamente frente a las costas de los departamentos de Piura y Lambayeque (5.397° a 7.132°S). (Wiemer & Wyss, 1997)

Las probables áreas de ruptura asociadas a los grandes sismos ocurridos en el periodo histórico (1619, 1746, 1868, 1913), coinciden con la distribución de las áreas asociadas a valores bajos del parámetro “b”; es decir, con mayores niveles de recurrencia sísmica, las mismas zonas que presentan geometrías y ubicaciones geográficas similares a los propuestos por otros autores basados en datos de GPS. (Condori & Tavera, 2012)

“Las asperezas con mayor probabilidad a generar un sismo de gran magnitud se encuentran frente a los departamentos de Lima, Ancash y frente a los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna” (Wiemer & Wyss, 1997).

Colombia es uno de los países de Suramérica con alta actividad sísmica, debida a la complejidad tectónica que se presenta por la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y Suramérica. La principal actividad sísmica en el país está asociada al proceso de subducción de las placas Nazca y Sudamérica, dando origen a sismos con focos superficiales, intermedios y profundos. Particularmente, cerca de la zona de subducción en el suroccidente de Colombia, se han presentado sismos destructivos de profundidad intermedia. (González & Mora, 2015)

En el presente trabajo de Salcedo y Pérez se realiza el análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en función de la profundidad para sismos de foco intermedio, con el objetivo de contribuir al estudio de la sismicidad de la región del Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. Para este fin, se emplearon eventos que fueron extraídos del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), con magnitud de completitud mayor a 2.3 M_L para el periodo comprendido entre 1993 y 2013. Los resultados muestran que el valor de b oscila entre 0.6 y 1.3 con clara disminución en función de la profundidad. Esta variación se relaciona con los cambios de las propiedades físicas (por ejemplo, heterogeneidad y deformación interna) de la placa Nazca dentro de la región de estudio, a causa del incremento de los esfuerzos a medida que ésta subduce. Este proceso genera un aumento en la ocurrencia de sismos con magnitudes $M=6.5M_L$, para los cuales se estimaron periodos de retorno local de 20 a 40 años. Los valores de variación de b para la región del Valle del Cauca, oscilan entre 0.6 y 1.3. Los periodos de retorno para sismos locales con $M=6.5M_L$, se encuentran entre 20 y 40 años. En este caso es importante hacer la salvedad de que los periodos de recurrencia tienden a ser mayores que el tiempo del catálogo sísmico usado. Por ello se recomienda hacer un próximo trabajo usando un catálogo más robusto para mejorar este tipo de análisis. Hacia el norte y sur (de acuerdo a los perfiles AA' y BB'), los valores bajos de b (0.6-0.8) distribuidos en la parte inferior de la placa Nazca (~80 km), podrían estar relacionados con la presencia de asperezas o zonas probables de ocurrencia de sismos grandes. Dichos valores comienzan a presentarse desde los 90 km de profundidad en el norte, y a partir de los 60 km de profundidad en el sur, salvo los valores picos de 1.2, a 80 y

130 km de profundidad, que se presentan en el norte y sur, respectivamente. Esta variación en ambos lugares puede relacionarse con los cambios en las propiedades físicas dentro de la placa Nazca. Por ejemplo, en el norte esta variación de b con la profundidad, puede estar asociada con una alta heterogeneidad y baja resistencia de la corteza. Ello haría posible un fracturamiento alto de la placa, mayor ocurrencia de sismos y la generación de volcanismo debido a posibilidad de que el magma ascienda fácilmente desde el manto hacia la superficie por el medio fracturado. Por el contrario, la variación de b con la profundidad en el sur, posiblemente se relacione con menor deformación y menor fracturamiento, por lo tanto, habría menor ocurrencia de sismos y menor vulcanismo. Otro aspecto que podría pensarse de acuerdo a la variación del valor b con la profundidad para la parte norte y sur, es el nivel de acoplamiento de la placa Nazca con respecto a la placa Suramérica en estas zonas. Esta idea se apoya en la hipótesis formulada en recientes trabajos donde se relacionan los valores bajos de b con el alto acoplamiento de las placas en zonas de subducción, así como a las condiciones térmicas y de edad de la placa. En este sentido, posiblemente en el norte el acoplamiento de la placa Nazca sea menor que en el sur, lo cual estaría relacionado con la actividad sísmica de la región. Por ejemplo, en la zona sur, la poca ocurrencia de sismicidad puede ser debido a la intensa resistencia (fricción) entre las placas, lo que conlleva a la acumulación lenta de esfuerzos y que, una vez se supere dicho nivel de resistencia, se generen sismos de gran magnitud como los ocurridos en septiembre 30 de 2012 con magnitud 7.1Mw y febrero 9 de 2013 con magnitud 6.9Mw, ambos localizados al sur de la región del valle del Cauca a profundidades intermedias. Como se puede apreciar, el estudio de la variación del valor de b con la profundidad en zonas de subducción, muestra que las causas principales de su perturbación pueden ser: el grado de heterogeneidad de los materiales, la deshidratación de la placa, cambios en los niveles de esfuerzos, la alta resistencia reológica, la edad y la temperatura de las placas. Por tanto, el análisis del valor de b ha permitido caracterizar fuentes sismogénicas en varias partes del mundo y su utilidad en esta investigación ha contribuido al entendimiento de la actividad sísmica en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia. (Salcedo & Pérez, 2017)



CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

1. Metodología

1.1. Modelos de Ruptura, Relación Frecuencia – Magnitud de Wiemer y Wyss

1.1.1. Modelos de Rupturas

1.1.1.1. Modelo de Barreras

El modelo de barreras como se muestra en la figura 14a, toma como base un terremoto se inicia en un medio sobre el cual hay una serie de fallas, una a lado de la otra, separado por zonas que no se rompen o llegan a romperse después de un cierto tiempo. Durante el sismo, la ruptura se propaga de manera simple y se detiene cuando encuentra la zona irrompible que puede estar asociado a un contacto entre dos tipos de Roca o un salto lateral de una falla. Sin embargo, si hay suficiente acumulación de esfuerzos a lo largo de la falla, esta puede saltar la barrera y continuar con la ruptura. (Wiemer & Wyss, 1997)

El modelo de Barreras puede ser mejor explicado a partir del estado de esfuerzos antes y después de ocurrir un sismo, así como el deslizamiento que producen. De acuerdo a la figura 14a, las zonas que se han roto durante el sismo son dos, representadas por las áreas de color blanco. En los perfiles adyacentes, se puede observar que los esfuerzos antes del sismo son uniformes y si hay variación, esta es muy pequeña y relativamente importante. Durante el sismo la ruptura se produce en las áreas sin sombrear y en ellas los esfuerzos se reflejan y caen hasta llegar a un valor cero, produciéndose una transferencia de esfuerzos hacia los bordes y las uniones entre fallas, en donde aumenta la tensión para impedir que la falla se deslice. Estas zonas son llamadas Barreras o zonas de alta resistencia. En el caso de deslizamiento, este solo se produce en las dos áreas sin sombrear sobre la falla, esto debido a que las Barreras reducen enormemente el movimiento de sus compartimientos. (Kanamori, 1981)

“De manera general el modelo de barreras, describe mejor los términos asociados a deformaciones corticales (fallas), donde se producen eventos sísmicos con magnitud $M_s > 6.0$ ” (Wiemer & Wyss, 1997).

1.1.2. Modelo de Asperezas

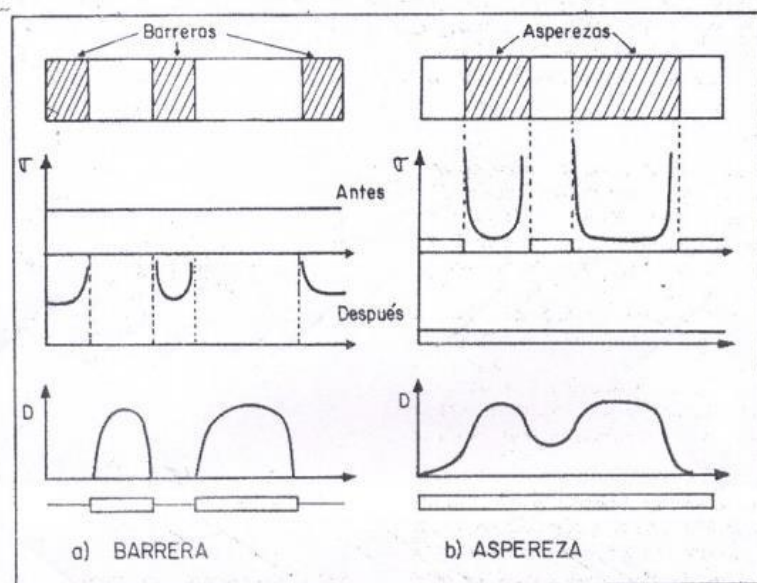
El modelo de Asperezas figura 14b, está basado en la idea de los gap sísmicos presentes en las zonas de subducción y fue desarrollado por Kanamori. En estas zonas los Sismos grandes tienden a repetirse en el mismo lugar después de un determinado periodo de tiempo. En este modelo, se supone la existencia de una gran falla en donde hay zonas rotas y otras no (superficie de contacto entre placas). Los esfuerzos iniciales no son homogéneos, debido al hecho de que ha habido Sismos antes del sismo actual y los esfuerzos ya han sido liberados. El nuevo Sismo comienza donde no ha habido terremotos con anterioridad y en donde hay una fuerte acumulación de esfuerzos. Para una mejor comprensión de este modelo, se analizará el estado de esfuerzos antes y después de ocurrido un Sismo, así como el deslizamiento que se ha producido durante el sismo. (Tavera H. , 1992; Madariaga, 1976)

Se observa que la situación inicial es la existencia de una gran falla, que caracteriza al contacto de placas en zonas de subducción, que ha sufrido una serie de Sismos, pero en su interior aún queda una serie de áreas que no se han roto, las mismas que son representadas por las zonas sombreadas. Esta situación muestra que se ha liberado energía con los terremotos precedentes, quedando solo dos áreas que no se han roto. (Wiemer & Wyss, 1997)

El nuevo sismo se iniciará en alguna de estas dos áreas o en cadena, en términos de esfuerzos, la situación inicial es muy diferente al anterior modelo, es decir, casi el total de la falla libero energía y los esfuerzos se encuentran en las áreas sombreadas. Durante los próximos sismos, la energía se libera totalmente y la situación final para los esfuerzos será uniforme. El deslizamiento producido en este modelo es similar al de Barreras; sin embargo, en puntos de caída de esfuerzos apenas si hay deslizamiento, el mismo que se asemeja a una especie de montañas consecutivas. (Tavera H. , 1992; Madariaga, 1976)

Figura 14

Modelos de ruptura sísmica a) barreras y b) asperezas.



Nota: Kanamori, (1981)

“Estos modelos están basados en la idea de los gaps sísmicos presentes en las zonas de subducción” (Kanamori, 1981).

1.2. Relación Frecuencia - Magnitud

La distribución de los sismos con respecto a sus magnitudes, muestra una auto-semejanza, esto parece ser el resultado de un proceso auto-similar y obedece a una ley potencial o a una escala fractal. Esto implica la ausencia de características asociadas al tamaño del evento (límites teóricos sobre el máximo o mínimo tamaño del evento). Por consiguiente, la frecuencia de los terremotos frente a su tamaño (N), tiende a tener una forma lineal fija. (Condori & Tavera, 2012)

“Las siguientes fórmulas empíricas son conocidas en el Asia como la relación Ishimoto-Iida y en Occidente como la relación de Gutenberg-Richter y está definida como” (Kulhanek, 2005; Gutenberg & Richter, 1942).

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

$$N = 10^{a - bM} \quad (2)$$

Dónde:

- N es el número de sismos con una magnitud igual o mayor que M sobre un periodo de observación.
- A y B son constantes reales positivas

La ecuación (1) define la distribución de los eventos con respecto a la magnitud, para una cierta región y un intervalo de tiempo. La ecuación (2) también usualmente es referida como la relación magnitud-frecuencia (RMF), y representa una relación lineal entre $\log N$ y M. (Kulhanek, 2005)

1.3. Distribución de Magnitudes

“La ley de Gutenberg y Richter, es adoptada generalmente para definir la recurrencia de sismos en una determinada región y para su correcta estimación, se necesita disponer de información sísmica para un intervalo de tiempo bastante grande” (Gutenberg & Richter, 1942).

Kulhanek indica que las desviaciones lineales en la distribución frecuencia magnitud debe considerar lo siguiente: Para magnitudes pequeñas, los datos contenidos en los catálogos son incompletos; sin embargo, el decremento del parámetro “b” (bajo el umbral de magnitud), puede no ser sólo un efecto artificial de un catálogo incompleto, sino a que los sismos de magnitudes pequeñas probablemente no son tan numerosos. (Kulhanek, 2005)

1.4. Parámetros “a” y “b”

El Parámetro “a” es una medida del nivel de sismicidad regional o productividad sísmica. Esto está determinado por la tasa de sismicidad, que para una cierta región, depende del volumen y la ventana de tiempo considerada. Matemáticamente, expresa el logaritmo del número de sismos con magnitudes mayor a cero; es decir, el total esperado de eventos en la región si se extrapola la relación hasta las magnitudes más pequeñas, el parámetro “a” puede ser calculado a partir de la siguiente relación. (Kossobokov & Keilis-Borok, 2000)

$$a = \log \sum N - \text{Log}(\sum 10^{-bM})$$

El parámetro “b” (Figura 16), el valor de este parámetro se obtiene a partir del cálculo de la pendiente de la recta resultante del ajuste lineal entre el logaritmo de N y la magnitud de los sismos (M). El valor del parámetro “b” se relaciona con las características físicas de cada región sísmica de forma tal, que valores altos de “b” implica el predominio de terremotos de magnitud pequeña y por tanto, la región presenta poca resistencia a deformarse figura 15a. (Kanamori, 1981)

“En cuanto a valores bajos de “b” predominan los terremotos de magnitud mayor, indicando una mayor resistencia del material a la ruptura figura 15b. Además, esta constante varía de región en región” (Kossobokov & Keilis-Borok, 2000).

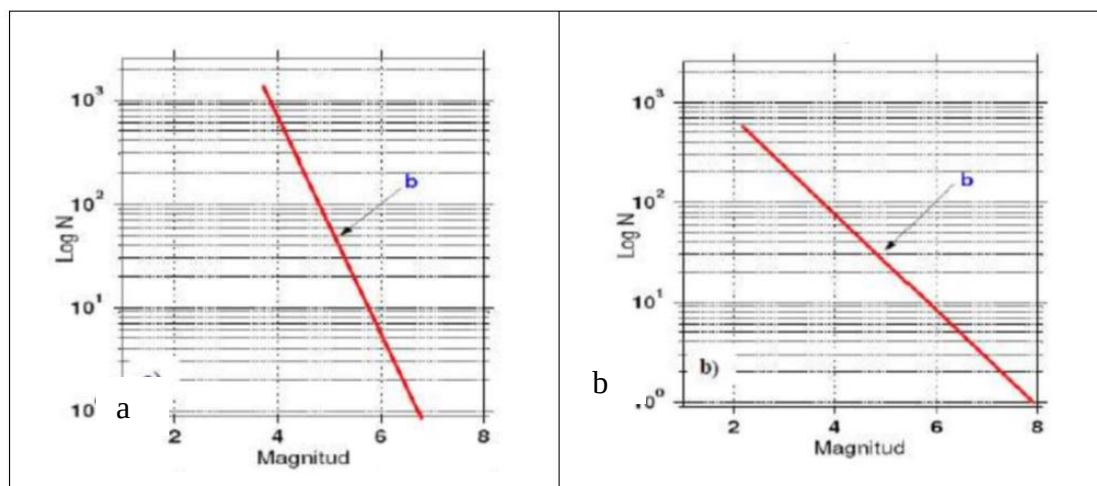
Es considerada como una medida del esfuerzo promedio en la misma. El valor del parámetro “b” tiene una fuerte relación con el esfuerzo en el volumen a considerar,

en razón a que existe una relación inversa entre el valor “b” y el nivel de esfuerzo acumulado. (Kanamori, 1981)

Por ejemplo, para una determinada región, menor valor de “b” implica una menor pendiente en la relación Gutenberg-Richter, que a su vez estaría relacionado con un número mayor de eventos de magnitudes elevados con relación a la cantidad de eventos menores, esto implica una mayor concentración de esfuerzos en la zona. De la misma forma, valores grandes de “b” implican una concentración de esfuerzos menores. Por consiguiente, algunos autores como Bullen y Bolt, afirman que este parámetro puede ser utilizado como predictor de terremotos grandes para una determinada región sísmica, el valor del parámetro “b” varía con el tiempo. (Bullen & Bolt, 1985)

Figura 15

Representación de la Frecuencia Magnitud de los sismos en función del parámetro “b



Nota: Condori & Tavera, (2012).

“a) Valor alto del parámetro y b que implica alto predominio de sismos de magnitud pequeña. b) Valor bajo del parámetro “b” que implica alto predominio de sismos de magnitud grande” (Condori & Tavera, 2012).

1.5. Variaciones del Parámetro “b”

En general el valor del parámetro “b” oscila entre 0.5 y 1.5, siendo su valor mayor más cercano a la unidad. Los valores mayores a 1, caracterizan a los dorsales meso oceánicas, y valores menores, a los “rifts” continentales y regiones de sismos profundos. (Udias, et al., 1986)

El parámetro “b” puede utilizarse como una forma de cuantificar el “tamaño” promedio de las rupturas debido a que corresponde a ley de potencias para las magnitudes y por lo tanto, para el área de ruptura promedio (Zúñiga y Wyss 2001). Entonces el valor del parámetro “b” comúnmente es cercano a la unidad y varía aproximadamente en un intervalo entre 0.3 y 2.0. (Condori & Tavera, 2012)

A pesar de que no existe acuerdo, sobre si el parámetro “b” aumenta o disminuye antes de un terremoto fuerte, para muchos autores, a quienes les ha llamado la atención la variación temporal de este parámetro, es claro que éste tiene comportamientos particulares para cada región y que actúa como un premonitor de terremotos. (Suyehiro, 1966)

En la tabla 5, se presenta los resultados del cálculo del parámetro de “b” para diferentes regiones tectónicas (zonas de subducción, sistemas de fallas activas, volcanes activos). Según estos resultados los valores del parámetro “b” para el caso de estudio de zonas de subducción varían entre 0.4 a 1.6, los cuales indicarían la concentración de los niveles de esfuerzos altos y bajos en las zonas de contacto de placas tectónicas. Asimismo, los valores de “b”, para el caso de los sistemas de fallas activas, oscilan en el rango de 0.5 a 2, y en este caso, los valores mínimos indicarían la presencia de anomalías estructurales asociados a valores con altos niveles de esfuerzos (Asperezas). (Udias, et al., 1986)

Investigaciones recientes revelan que los eventos sísmicos con origen en fallas inversas están asociados con valores bajos de “b” en comparación con las de fallas normales. Para el caso de los volcanes activos, los valores oscilan en el rango de 0.8 a 2.2, estando los valores altos de “b” relacionados a zonas con alto valor del gradiente térmico, y zonas con presencia de material heterogéneo. (Suyehiro, 1966)

Tabla 5

**Resultados del cálculo del parámetro de “b” para diferentes regiones tectónicas
(zonas de subducción, sistemas de fallas activas, volcanes activos).**

	Región	“b”	Referencia
Zona de Subducción	Zona de Subducción (México)	0.5-1.5	Zuñiga y Wyss (2001)
	Zona de Subducción (Perú)	0.6-1.2	Heras ty Tavera (2002)
	América Central	0.6-1.6	Monterroso y Kulhanet (2003)
	Zona de Subducción (Perú)	0.5-1.1	En el estudio (2011)
	Zona de Subducción (Nueva Zelanda)	0.8-1.4	Wiemer y Benoit (1996)
	Placa del Pacifico	0.4-1.0	Katsumata (2006)
Fallas	Falla Boconó (Venezuela)	0.6-2.0	Bendito et al., (2000)
	Falla San Jacinto- Elsonare	0.5-1.5	Wyss et al. (2000)
	Falla San Andrés	0.5-1.1	Wiemer y Wyss (1997)
	Falla Calaveras	0.6-1.1	Wiemer y Wyss (1997)
Volcanes	Yake-Dake, Montaña Hida	0.8-1.5-1.7	Enescu y Ito (2002)
	Monte St. Helena (Washington)	1-2.2	Wiemer y McNuutt (1997)
	Monte Redoubt (Alaska)	1-2.2	Wiemer y McNuutt (1997)
	Montaña Mammoth (California)	1-1.8	Wiemer et al. (1998)
	Monte Etna (Italia)	1.3-3	Murru et al. (1999)
	Kilauea (Hawaii)	.5-1.5	Wyss y Nagamine (2001)

Nota: Condori & Tavera, (2011)

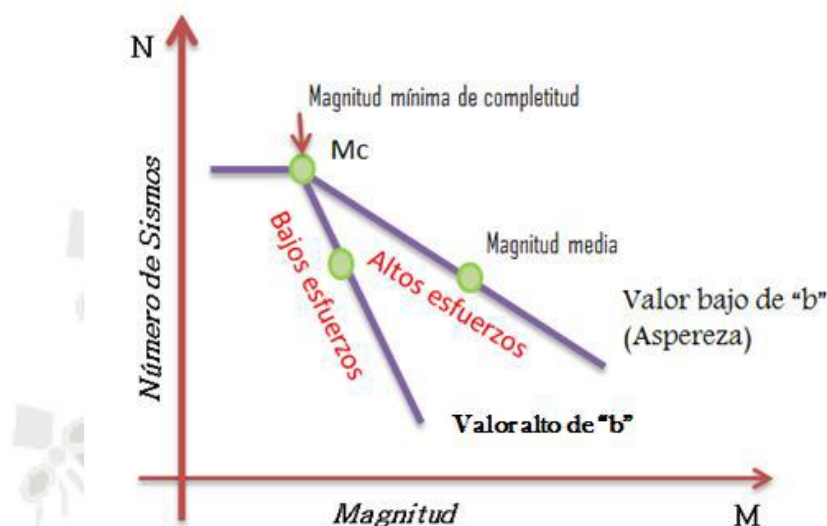
1.6. Método de Wiemer y Wyss (Z-MAP)

Este método consiste en calcular los parámetros “a” y “b” utilizando la distribución frecuencia magnitud de Gutenberg Richter utilizando el programa ZMAP desarrollado por Wiemer Y Wyss, 1994. Debido a que el área en estudio se trata de una zona de subducción y se asocia al estado de esfuerzo aplicado en el contacto o fricción de dos placas Tectónicas, en este caso las placas de Nazca y Sudamericana. (Gutenberg & Richter, 1942)

La figura se muestra el comportamiento de los valores de “b” según la relación de Frecuencia-Magnitud, en donde los valores bajos de “b” están asociados a la presencia de asperezas sísmicas en donde se presentan los mayores esfuerzos y acumulación de energía. Los valores altos de “b” indican áreas con presencia de bajos esfuerzos y en donde no hay presencia de acumulación de energía. Figura 16. (Condori & Tavera, 2011)

Figura 16

Gráfica de la distribución de frecuencia - magnitud representando los valores del parámetro "b"



Nota: Condori & Tavera, (2012)

“Valores asociados a regiones con altos esfuerzos concentrados (Asperezas). Valores bajos asociados a regiones con bajos esfuerzos” (Condori & Tavera, 2012).

1.7. Periodo de Recurrencia

El periodo de recurrencia es el calculado a partir de los parámetros “a” y “b” obtenidos de la distribución Frecuencia – Magnitud, obtenido de la ecuación:

$$Pr = T_L(M_{max}) = \Delta T / 10^{(a-bM_{max})}$$

Donde ΔT es el periodo de datos considerando en la base de datos y M , la magnitud máxima del sismo cuyo periodo de recurrencia se daría a conocer como la tasa de sismicidad “a” el cual haría en función del espacio. El parámetro “b” varía también fuertemente sobre distancia de pocos kilómetros, entonces $T_L (Max)$ también es una función del espacio. La probabilidad local anual por kilómetro cuadrado $PL (Max)$ para un sismo de magnitud elevada se evalúa como la inversa de la ecuación del periodo de Recurrencia $PL(M)$. (Condori & Tavera, 2011)

$$PL(MMax) = 1/(TL(MMax)A)$$

1.8. Análisis y Selección de la base de datos

Para realizar un estudio sísmico se debe contar con un buen catalogo sísmico, los resultados dependerán de la base de datos utilizados; por lo tanto, se debe contar en su totalidad con todos los parámetros que caracterizan a un sismo, tales como fecha, hora, latitud, longitud, magnitud, intensidad y profundidad, todos calculados en las mismas condiciones a fin de constituir una base homogénea. (Zúñiga & Wyss, 1995)

“Cuanto más precisos sean los datos, mayor es la confiabilidad en los resultados obtenidos; caso contrario ellos pueden llevar a errores para identificar, por ejemplo, patrones de sismicidad y/o estimar el nivel de peligro sísmico en una determinada región” (Condori & Tavera, 2011).

Es generalmente aceptado, que el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos contenidos en un catálogo sísmico mejorará con el tiempo, ya que las técnicas de registro y la cobertura de las redes sísmicas son mejores. Además, los catálogos contienen progresivamente mayor número de eventos pequeños y la magnitud de completitud tiende a disminuir. (Zúñiga & Wyss, 1995)

1.9. Catálogo base de datos del NEIC

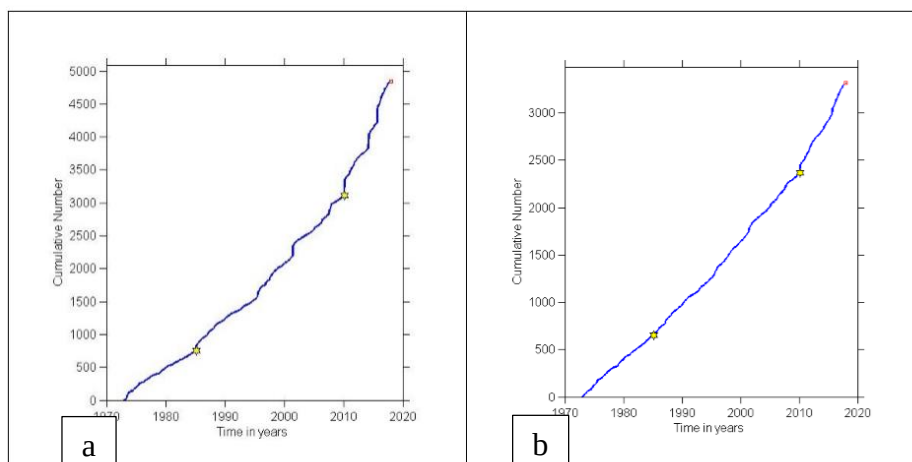
Los datos fueron utilizados del catálogo sísmico National Earthquake Interior Center (NEIC) periodo 1973 – 2020, con magnitudes mayores de 4.5 Ms, sismos que serán utilizados para realizar el estudio del parámetro “b”.

1.10. Análisis Estadístico y Homogenización del Catálogo

La estadística generada a partir del análisis de resultados del catálogo sísmico del NEIC. Se presenta una curva acumulativa de forma lineal sobre los datos, cual define la homogeneidad de la base de datos a utilizar en el presente estudio. El análisis estadístico de la base de datos debe reflejar en sus resultados una buena correlación de los datos, como se muestra el histograma de correlación de sismos mostrando principalmente el número de sismos ocurridos durante el periodo de tiempo de análisis. Se muestra principalmente los años donde ocurrieron sismos muy importantes y sus réplicas más relevantes. Figuras 17, 18 y 19. (Zúñiga & Wyss, 1995)

Figura 17

Resultados del análisis de datos del catálogo sísmico del NEIC

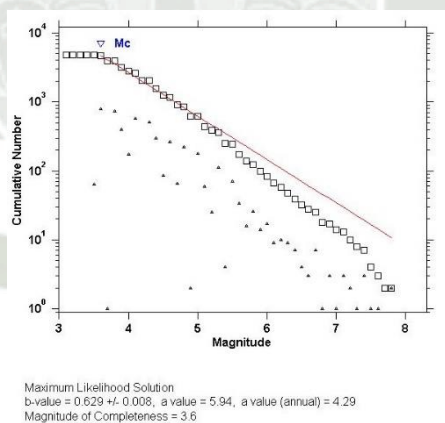


Nota: Elaboración propia.

Curva acumulativa de sismos, figura a, curva con réplicas y figura b, curva sin réplicas, la estrella en la curva nos muestra sismos importantes.

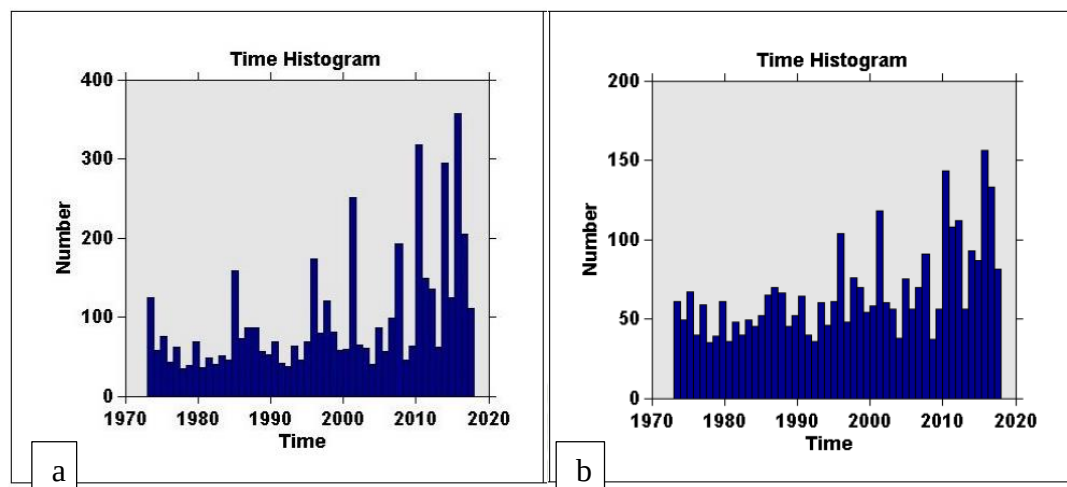
Figura 18

Curva de magnitud de Completitud (Mc)



Nota: Elaboración propia.

Figura 19
Histogramas de sismos acumulativos período (1973-2020)



Nota: Elaboración propia.

Figura a, histograma con réplicas y figura b, histograma sin réplicas.

1.11. Procedimiento para Analizar la zona de Estudio

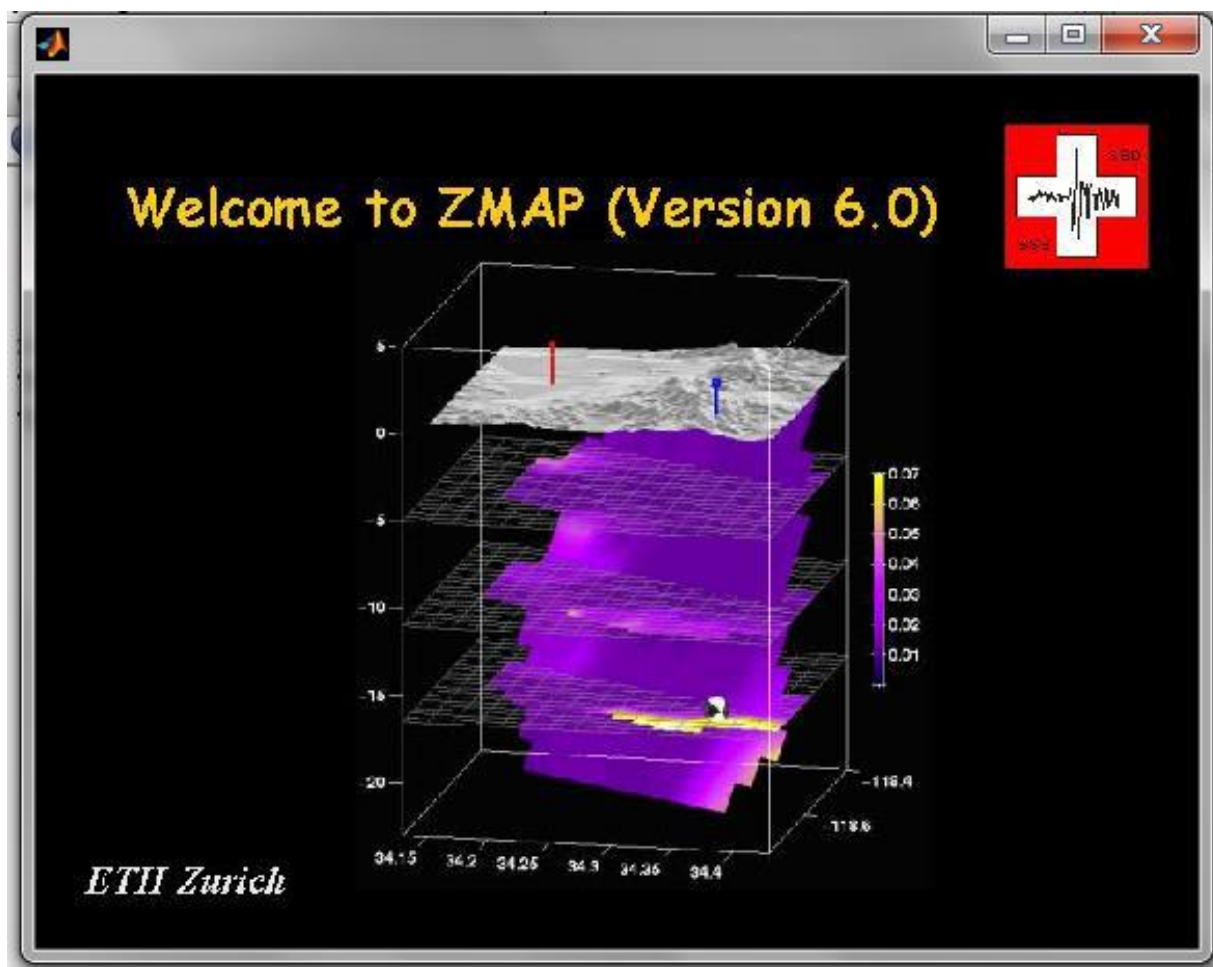
El procedimiento para hallar el parámetro “b” por el método de Wiener y Wyss es:

- La selección de una base de datos sísmicos completa para un periodo de tiempo considerable.
- Eliminación de las réplicas que corresponden a los eventos principales ocurridos dentro del área de estudio y durante el periodo de tiempo elegido.
- A partir del programa ZMAP se genera un reticulado (Malla) que abarque toda el área de estudio, encerrando así los eventos sísmicos del catálogo sísmico ya procesado.
- La distancia entre los puntos o intercesiones del reticulado se definen a partir de la distribución espacial y la densidad de los sismos con que se dispone en el área de estudio.
- Es también determinado a partir de la longitud de ruptura de grandes terremotos ocurridos en la zona de estudio.
- Finalmente se ingresan los parámetros para generar el reticulado: Los espaciamentos de dx y dy considerados para este estudio son de 0.1 grados que equivale aproximadamente a 11 Km de distancia.

El mínimo número de eventos mayores a MC es igual a 50. La magnitud de completitud (M_c) fijada es 3.9 Ms esta magnitud define que el catálogo sísmico está completo. (Zúñiga & Wyss, 1995)

Pasos a seguir para que funcione el programa Zmap utilizado, figuras 20 a 28.

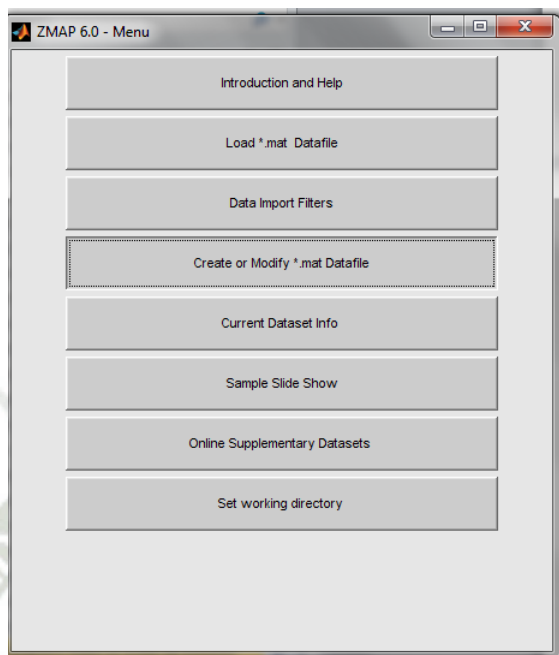
Figura 20
Programa Zmap



Nota: Elaboración propia.

Pantalla de inicio de ZMAP

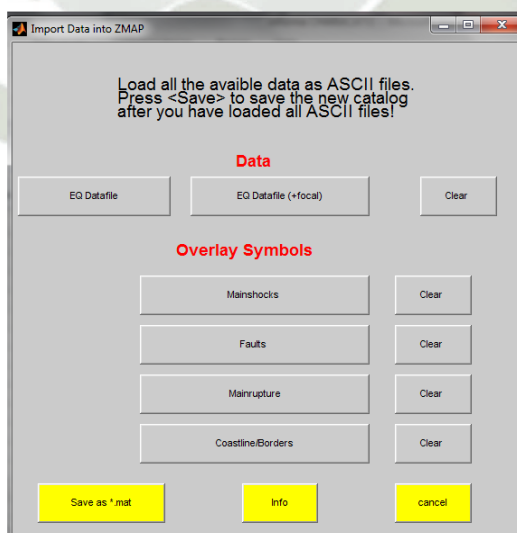
Figura 21
Cuadro de dialogo del programa



Nota: Elaboración propia.

Nos aparece esta ventana en la cual escogeremos la opción 4 Create or Modify

Figura 22
Cuadro de dialogo del programa donde nos muestra más opciones

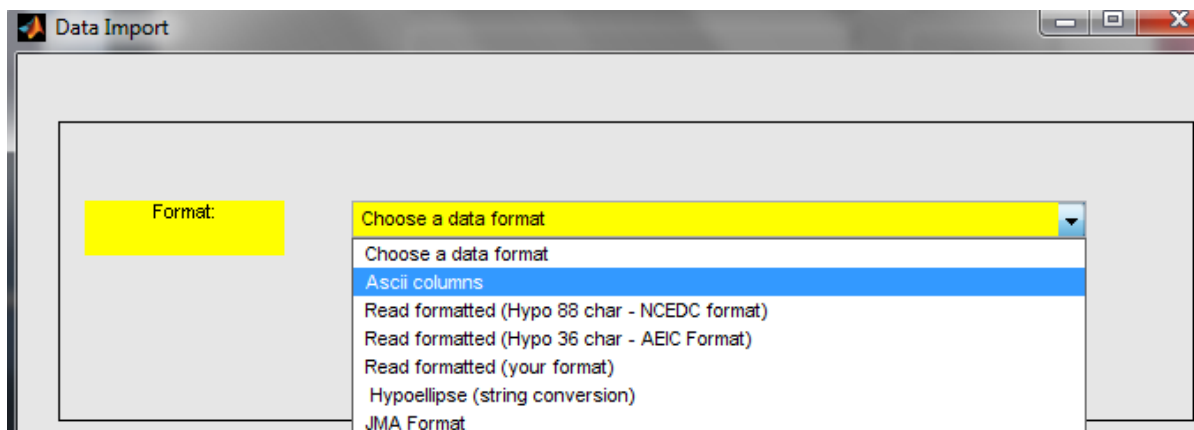


Nota: Elaboración propia.

La siguiente ventana nos muestra distintas opciones y para esto haremos clic en EQ Datafile

Figura 23

Nos muestra que formato debemos de elegir

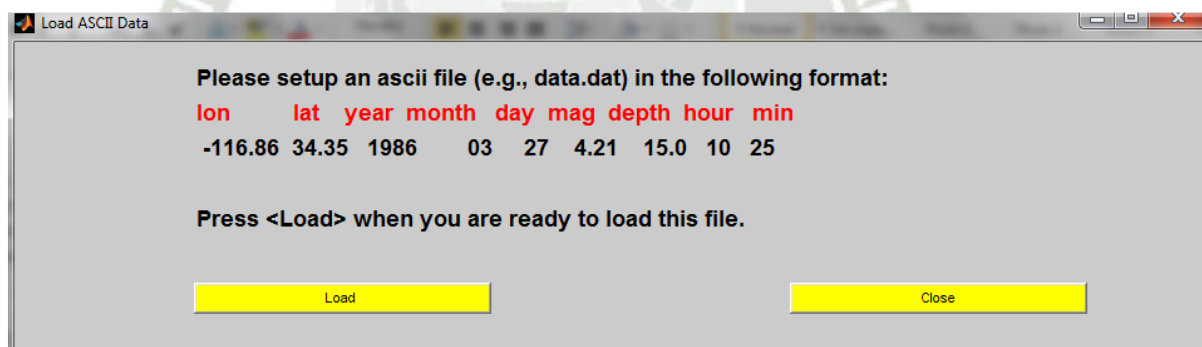


Nota: Elaboración propia.

Elegimos el formato Ascii Columns

Figura 24

El cuadro de dialogo nos muestra como es el formato de datos

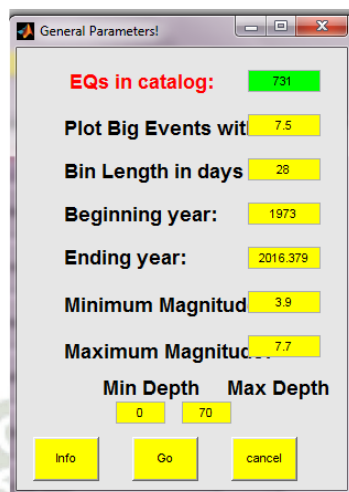


Nota: Elaboración propia.

Aquí nos muestra cómo deben estar ordenados los datos y presionamos Load para cargar los datos que ya están ordenados.

Figura 25

Nos muestra los diferentes parámetros que tiene el programa

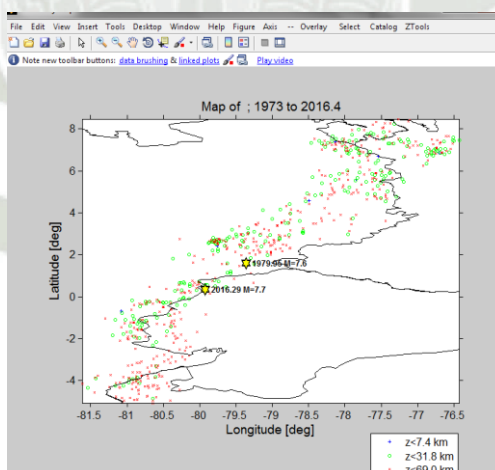


Nota: Elaboración propia.

Aquí nos mostrará unos datos acerca del archivo cargado anteriormente y seguidamente haremos clic en Go.

Figura 26

Mapa preliminar de los sismos que nos muestra para el estudio

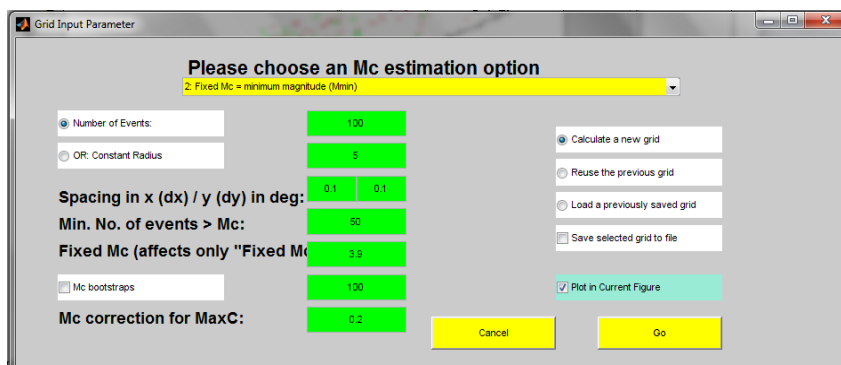


Nota: Elaboración propia.

Después de la operación anterior nos saldrá esta imagen donde nos sale los sismos plotados e iremos a Ztools de allí elegimos Mapping a- and b-values de allí la primera opción calculate a Mc, a- and b- value map.

Figura 27

Cuadro de dialogo donde nos muestra que constantes debemos de ingresar

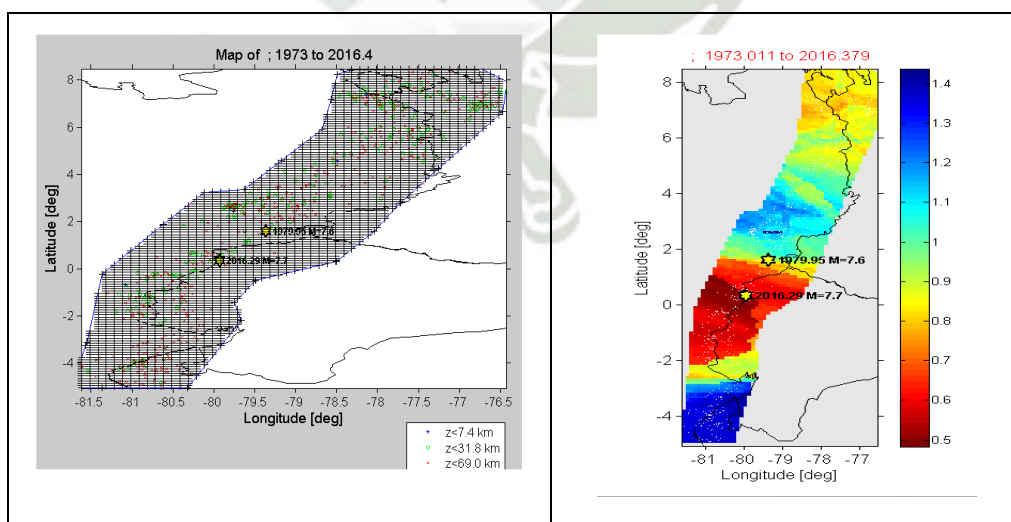


Nota: Elaboración propia.

La opción de Number of Events. Es adecuado para investigar solo el valor del Parámetro “b”. Mientras que el de Constant Radius se usa para evaluar tiempos de Recurrencia (basado en valores de a y b), porque no queda constante el valor de a. Para la estimación de Mc para el cálculo de a y b existen 9 métodos, bueno el método que se recomienda es el 6, pero tarda bastante. Según las recomendaciones personales del Dr. Wiemer es conveniente utilizar el 2 y el 5 como base de comparación, y en muchos casos el 5 es el adecuado.

Figura 28

Mapas que nos muestra cómo se va generando el parámetro b



Nota: Elaboración propia.

Después de llenar todos los parámetros entonces haremos la grilla con el mouse y cargará unos cuantos minutos y seguidamente se creará el mapa del parámetro “b”



CAPÍTULO III

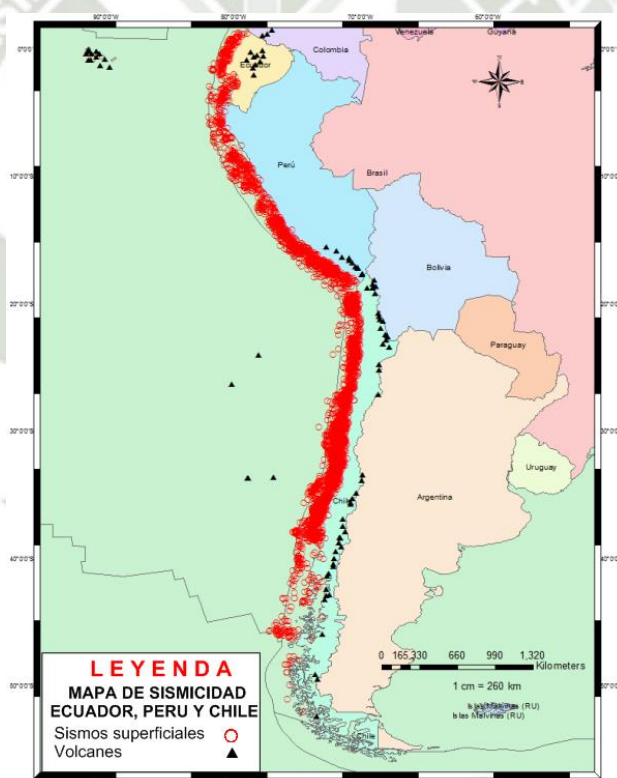
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Resultados y Discusión

Para el cálculo de resultados del parámetro “b” para las regiones de Ecuador, Perú y Chile los periodos de recurrencia para Sismos de grandes magnitudes, a partir de la metodología de Wiemer y Wyss se utilizó datos del NEIC, periodo de 1973-2020), todos estos eventos de profundidad superficial ($h < 70\text{Km}$). En la figura 29, se muestra el mapa de distribución espacial de sismos de foco superficial utilizados en el análisis del presente estudio, dicha profundidad se estimó como límite para definir las dimensiones de superficie de contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana. (Wiemer & Wyss, 1997)

Figura 29

Mapa de distribución espacial de sismos superficiales para el análisis del presente estudio, 1973-2020.



Nota: Elaboración propia.

Epicentros de sismos (círculos rojos) y volcanes (triángulo negro)

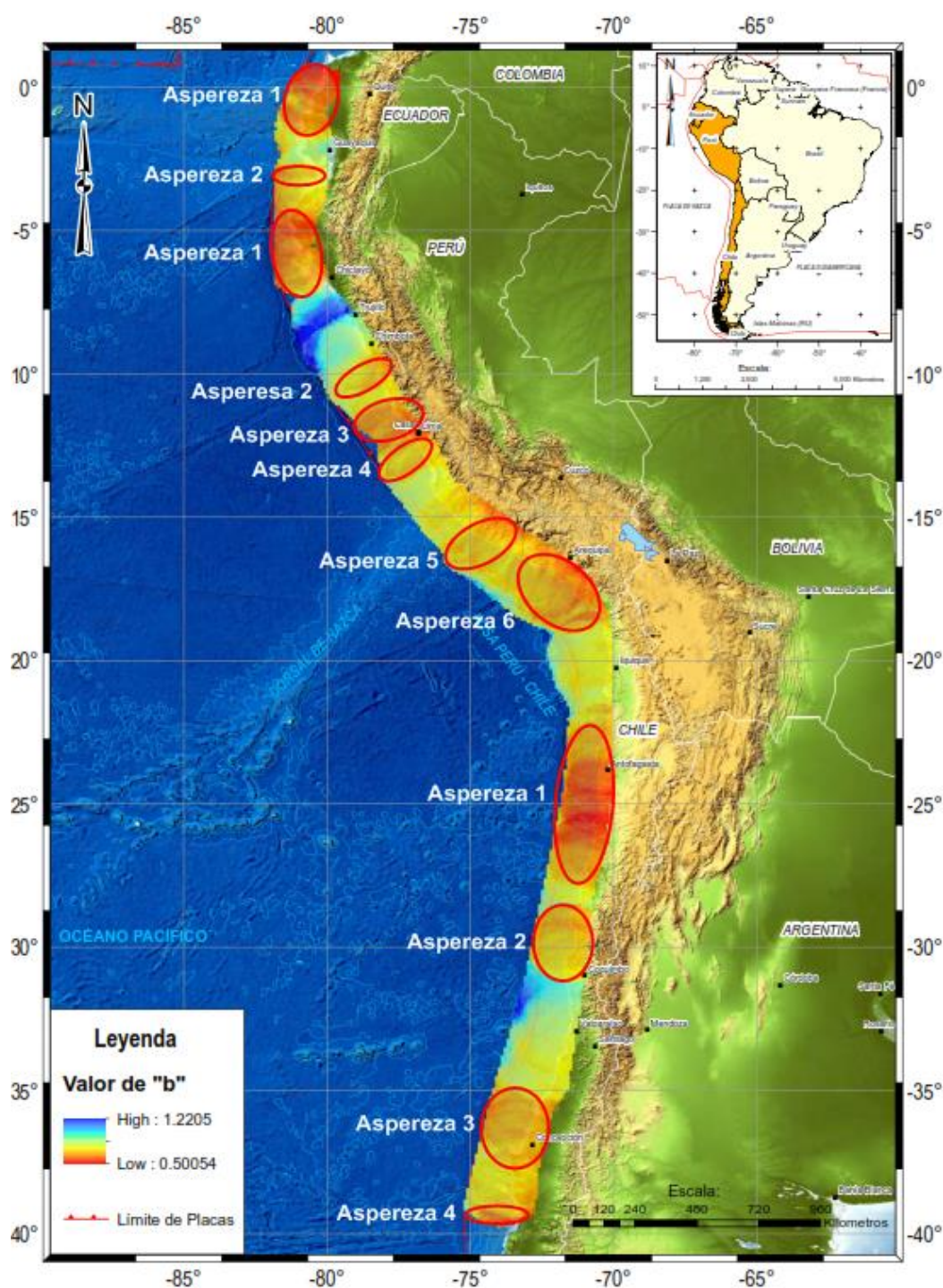
La magnitud de completitud del catálogo fue de 3.6 Ms, a partir de esta magnitud hacia adelante con magnitudes mayores, la base de datos sísmicos se considera completo, es decir los eventos sísmicos con magnitudes mayores a (M_c) magnitud de completitud del

catálogo son muy confiables para un análisis del estudio. Figura 18. Los resultados obtenidos en el presente estudio para el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, donde se presenta el mapa de distribución del parámetro “b”, y además se observa que los valores del parámetro “b” oscilan entre 0.5 a 1.2, siendo los valores menores a 0.6 considerados como anomalías donde se estaría acumulando la mayor cantidad de energía, siendo esta anomalía una zona de aspereza, y por lo tanto estas áreas tienen mayor probabilidad de generar un sismo de magnitud considerable en el futuro. Figuras 30 y 31. (Wiemer & Wyss, 1997)



Figura 30

Mapa de valores de “b” para el borde occidental de Ecuador, Perú y Chile, período 1973 - 2020

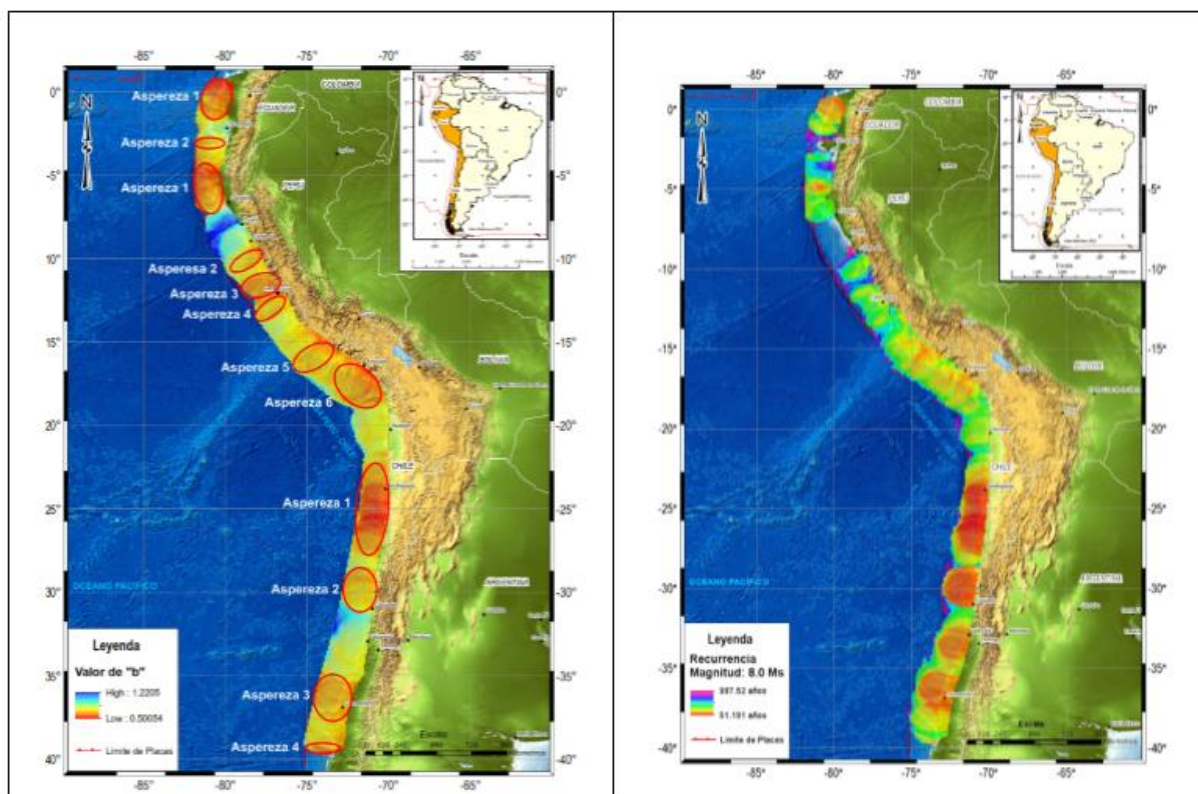


Nota: Elaboración propia.

Los elipsoides representan las zonas de Asperesas y acumulación de esfuerzos.

Figura 31

Mapa de periodos de recurrencia para un sismo de magnitud 8.0 Ms.



Nota: Elaboración propia.

Denotando asperezas con periodo de recurrencia de 30 Años. b) Mapa de densidad probabilística estimado para un sismo de magnitud 8.0 Ms, cuyas áreas denotadas coinciden con el mapa de periodo de recurrencia.

2. **Asperezas encontradas en el borde Occidental de Sudamérica**

“Estas anomalías se encuentran ubicadas en forma heterogénea a lo largo del borde occidental de Ecuador, Perú y Chile como se muestran en las tablas 6, 7 y 8” (Ramos Chura, 2017).

Tabla 6

Asperezas ubicadas en el borde occidental de Ecuador denotando valores mínimos de “b”

Ecuador		
Asperezas	Ubicación	Coordenadas
1	Aspereza localizada frente a las ciudades de Esmeraldas y Manabi.	1.41° Lat. Norte a -0.47 ° Lat. Sur
2	Aspereza localizada frente a la Isla Puna.	-2.27 ° a -3.24° Lat. Sur

Nota: Elaboración propia.

Tabla 7

Asperezas ubicadas en el borde occidental de Perú denotando valores mínimos de “b”

Perú		
Asperezas	Ubicación	Coordenadas
1	Aspereza localizada frente a las ciudades de Piura y Chiclayo	-4.26 ° a -6.74° Lat. Sur
2	Aspereza localizada frente a la ciudad de Ancash	-9.22 ° a -10.40° Lat. Sur
3	Aspereza localizada al norte de la ciudad de Lima.	-10.50 ° a -11.55° Lat. Sur
4	Aspereza localizada frente al Callao -Lima.	-11.60 ° a -13.90° Lat. Sur
5	Aspereza localizada frente a las localidades de Lomas, Atico – Arequipa.	-15.38 ° a -16.91° Lat. Sur
6	Aspereza localizada frente a las ciudades de Moquegua, Tacna y Arica - Chile.	-17.53 ° a -19.34° Lat. Sur

Nota: Elaboración propia.

Tabla 8

Asperezas ubicadas en el borde occidental de Chile denotando valores mínimos de “b”

Asperezas	Ubicación	Coordenadas
1	Aspereza localizada frente a las ciudades de Tocopilla, Mejillones, Antofagasta y Caldera.	-22.30 ° a -27.20° Lat. Sur
2	Aspereza localizada frente a las ciudades de Huasco, Serena, Coquimbo, Los Vilos y Valparaíso.	-28.50 ° a -33.00° Lat. Sur
3	Aspereza localizada frente a las ciudades de San Antonio, Constitución, Pehuehue, Concepción y Lebu.	-33.60 ° a -37.62° Lat. Sur
4	Aspereza localizada frente a las ciudades de Puerto Saavedra, Mepuín y Valdivia.	-38.78 ° a -39.82° Lat. Sur

Nota: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se ubicaron 12 áreas probables de futuros terremotos de gran magnitud en el borde Occidental de Ecuador, Perú y Chile, regiones eminentemente sísmicas debido al proceso de subducción, donde ha sido posible aplicar el método de Wiemer y Wyss para la estimación del parámetro “b”.
2. Los periodos de retorno en las zonas ubicadas son variables, dependiendo de los valores de “b”, que varían entre 0.5 a 1.2, a lo largo de la región del borde Occidental de Ecuador, Perú y Chile.
3. Se identificaron 12 posibles áreas, mientras el valor de “b” sea menor a (1) será la más cercana a ser afectada por un sismo de gran magnitud en el borde Occidental de Ecuador, Perú y Chile, Figura 30, siendo su descripción:

Ecuador

- Aspereza 1: Localizada frente a las ciudades de Esmeralda y Manabi. Entre 1.41 ° Lat. Norte -0.47 ° Lat. Sur.
- Aspereza 2: Localizada frente a la ciudad de Santa Elena. Entre -2.27° a -3.24° de Lat. Sur.

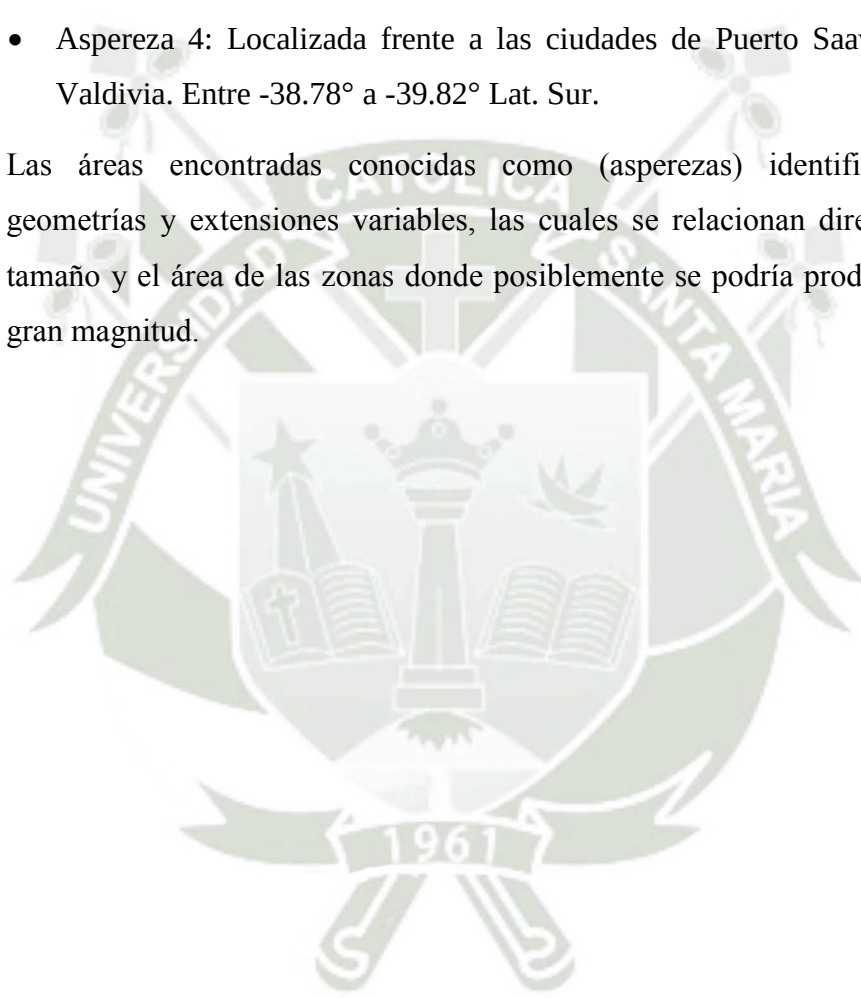
Perú

- Aspereza 1: Localizada frente a las ciudades de Piura y Chiclayo. Entre -4.26° a -6.74° Lat. Sur.
- Aspereza 2: Localizada frente a la ciudad de Ancash. Entre -9.22° a -10.40° Lat. Sur
- Aspereza 3: Localizada al norte de la ciudad de Lima. Entre -10.50° a -11.55° Lat. Sur
- Aspereza 4: Localizada frente al Callao – Lima. Entre -11.60° a -13.90° Lat. Sur
- Aspereza 5: Localizada frente a las localidades de Lomas, Atico – Arequipa. Entre -15.38° a -16.91° Lat. Sur.
- Aspereza 6: Localizada frente a las ciudades de Moquegua, Tacna y Arica Chile. Entre -17.53° a -19.34 Lat. Sur.

Chile

- Aspereza 1: Localizada frente a las ciudades de Tocopila, Mejillones, Antofagasta y Caldera. Entre -22.30° a -27.20° Lat. Sur
- Aspereza 2: Localizada frente a las ciudades de Huasco, Serena, Coquimbo, Los Vilos y Valparaíso. Entre -28.50° a -33.00° Lat. Sur
- Aspereza 3: Localizada frente a las ciudades de San Antonio, Concepción y Lebu. Entre -33.50° a -37.62° Lat. Sur
- Aspereza 4: Localizada frente a las ciudades de Puerto Saavedra, Mehuin y Valdivia. Entre -38.78° a -39.82° Lat. Sur.

Las áreas encontradas conocidas como (asperezas) identificadas presentan geometrías y extensiones variables, las cuales se relacionan directamente con el tamaño y el área de las zonas donde posiblemente se podría producir un sismo de gran magnitud.



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda estar preparados ante este fenómeno natural, porque pertenecemos al Cinturón de Fuego del Pacífico, no sabemos en qué momento se presentará, solo si estamos preparados evitaremos un desastre.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar et al. (2004). *Características Espacio – Tiempo de la sismicidad superficial en la región Sur del Perú durante el periodo de 1976 – 2003, Lima, Perú*. Lima: [Trabajo presentado en el XII Congreso Peruano de Geología].
- Aguilar, V. (2002). *Características espacio-tiempo del "cluster" de sismicidad ocurrido en la región sur de Perú entre el 2 y el 9 de agosto de 2000, Lima, Perú*. Lima: Sociedad Geológica del Perú. Retrieved from <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4452>
- Aguilar, V. (2006). *Características Espacio – Tiempo de la sismicidad superficial en la región Sur del Perú durante el periodo de 1976 – 2005, Lima, Perú*. Lima.
- Barazangi, M., y Isacks, B. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial distribution of earthquakes. *Geophysical Journal International*, 57(3), 537-555.
- Barrientos, S. (1980). *Regionalización Sísmica de Chile*. [Tesis para optar el grado academico de Maestro].
- Barriga, V. (1939). *Libro de los Cabildos de la ciudad de Arequipa*. Editorial La Colmena.
- Bernal. (2002). *Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: Características y evaluación de la energía sísmica liberada*. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geofísico].
- Bernal, I., & Tavera, H. (2002). *Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú*. Lima: Instituto Geofísico del Perú. Retrieved from <https://1library.co/document/1y9rk4vy-peligros-origen-natural-generados-procesos-interior-tierra.html>
- Bilek, S. (2009). Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics*, 1(2), 2-14.
- Bullen, K. E., & Bolt, B. A. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge university press.
- Buñay Guachizaca, L. G., & Tenelema Guaranga, F. A. (2014). *Obtención de mapas del índice de vulnerabilidad sísmica de las viviendas construidas en el barrio La Libertad de la Ciudad de Riobamba*. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Retrieved from <https://1library.co/document/zpnkn34y-obtencion-indice-vulnerabilidad-sismica-viviendas-construidas-libertad-riobamba.html>

- Caneva, A., Salcedo, E., Hissenhover, R., y Alfaro, A. (2004). Estudio de sismicidad regional para el análisis de la amenaza sísmica de Bogotá. *Ingeniería Y Universidad*, 8(1), 9-28.
- Centro Sismológico de Nacional. (2016). *Tipos de sismos en Chile*. Retrieved from <https://www.csn.uchile.cl/tipos-de-sismos-chile/>
- Centro Sismológico Nacional Universidad De Chile. (2014). *Informe Técnico-terremoto de Iquique*. Retrieved from https://www.sismo24.cl/20_PDF/P_InformeTecnicoAbril2014.pdf
- Colegio de Ingenieros del Perú. (2018). *Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo*. Retrieved from <https://grd-cip-lambayeque.blogspot.com/2018/01/>
- Comte, D., & Pardo, M. (1991). Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Perú seismic gaps. *Natural hazards*, 4, 23-44.
- Condori, C., & Tavera, H. (2011). Análisis y localización de probables áreas de ruptura por sismos, en el borde occidental del Perú: distribución de valores de “b”. *Congreso Peruano de Geología*(9), 1193-1195.
- Condori, C., & Tavera, H. (2012). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro "b". *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 106(x), 23-36.
- Condori, C., & Tavera, H. (2012). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro “b”. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 106, 23-36.
- Condori, C., y Pérez, J. (2015). Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia. *Geos*, 35(2), 1-16.
- Demets, C. R., Gordon, A., Aargus, & Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophys. J. Int*, 101, 425-478.
- Dorbath et al. (1990). Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-Andean zone of central Perú. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(½), 13-24.
- Egred, J. (1999). *Los terremotos y su incidencia en el Ecuador*. Instituto Geofísico EPN, Quito. Inédito.
- González, M. D., & Mora, R. D. (2015). Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización. *GEOS*, 35(2).

- Guardia Anampa, P. A. (2008). *Estimación del contacto sismogénico en el borde occidental del Perú*. Lima: Instituto Geofísico del Perú. Retrieved from <https://docplayer.es/24919061-Instituto-geofisico-del-peru.html>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1942). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological society of America*, 32(3), 163-191.
- Hasegawa, A., y Sacks, I. (1981). Subduction of the Nazca beneath Perú as determined from seismic observations. *Journal of Geophysical Research*, 86(B6), 4971-4980.
- Heras, H. (2002). *Análisis de la distribución del valor de "b" en la zona de subducción de Perú*. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geofísico].
- Instituto Geofísico del Perú. (2000). *Revista de trabajos de investigación realizados por estudiantes durante el año 1999 (Prácticas Pre-profesionales)*. Lima. Retrieved from <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/472/1999.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Instituto Nacional De Defensa Civil. (2006). *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2006*. Retrieved from <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/1083>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). *Programa de capacitación para la estimación del riesgo - PCER*.
- Kanamori, H. (1981). The nature of seismicity patterns before large earthquakes. *Earthquake prediction: An international review*, 4, 1-19.
- Kausel, E. (1986). Los terremotos de agosto de 1868 y mayo de 1877 que afectaron el sur del Perú y norte de Chile. *Boletín de la Academia Chilena de Ciencias*, 3(1), 8-13.
- Kelleher, J. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *Journal of Geophysical Research*, 77(11), 2087-2103.
- Kosaka Masuno, R., Arias Barahona, H. P., & Farfán Bazán, E. (2001). *EVALUACION DE PELIGROS*. Arequipa: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA.
- Kossobokov, V. G., & Keilis-Borok, V. I. (2000). Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. *Pure Appl. Geo-phys*, 157(11), 2323-2349.
- Kulhanek, O. (2005). Seminar on b-value. *Dept. of Geophysics, Charles University, Prague*, 10-19.

- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), 455-472.
- Lüders et al. (1988). *Lecciones del sismo del 3 de marzo de 1985*. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. Retrieved from <https://www.worldcat.org/es/title/lecciones-del-sismo-del-3-de-marzo-de-1985/oclc/20116635>
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3), 639-666.
- Marocco, R. (1980). *Geologie des Andes peruvienues: Un segment E-W de la chaine des Andes peruvienues, la deflexión d'Abancay. Etude geologique de la Cordillere Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud d'Perú*. Doc ORSTOM.
- Mccann, W. S., Nishenko, L., Sykes, & Krause, J. (1979). Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Pageoph*, 117, 1082-1147.
- Palacio Gonzales, J., Blum Gutiérrez, E., Maruri Díaz, R., Ayón, H., & Rodríguez, J. (1988). *Contribución al estudio del riesgo sísmico en el Ecuador*.
- Polo, T. (1898). Sinopsis de los temblores y volcanes del Perú. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 8, 321-416.
- Quispe, R., Tavera, H., y Bernal, I. (2003). Quispe, R., TaveGeometría de la placa de nazca y el borde Occidental de Sudamérica a partir de las tendencias medias de sismicidad. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 95(x), 93-110.
- Ramírez, J. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia (Ed. 2)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ramos Chura, S. E. (2017). *Análisis y evaluación de la distribución espacial de la sismicidad y lagunas sísmicas presentes en el borde occidental de sudamérica*. Arequipa: [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geofísico]. Retrieved from <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ff36c59a-6d01-442e-b503-a0e64b639ced/content>
- Salcedo, E. D., & Pérez, J. L. (2017). Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. *Revista Geológica de América Central*(57).

- Santibáñez Matamala, O. A. (2013). *Evaluación del peligro sísmico uniforme en la región de los ríos usando enfoques probabilista y determinista*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Sebrier M, J., F, M., Megard, & Labaucher, G. (1985). Quaternary fault and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics*, 4, 739-780. Retrieved from <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc320/doc320-contenido.pdf>
- Silgado, E. (1978). Terremotos destructivos en América del Sur, 1513-1974, proyecto SISRA. *CERESIS*, 10, 1-328.
- Sismo24.CL – Portal de Noticias Chile. (2020). *Sismos históricos de Chile 1906 - 2005*. Retrieved from <https://www.sismo24.cl/>
- Suyehiro, S. (1966). Difference between aftershocks and foreshocks in the relationship of magnitude to frequency of occurrence for the great Chilean earthquake of 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 56(1), 185-200.
- Tavera, & Agüero. (2001). *Catálogo Sísmico del Perú 1471 – 1982*. Instituto Geofísico del Perú. Retrieved from https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/789/cat_sis_1471_1982.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tavera, H. (1992). El proceso de ruptura sísmica: barrera o aspereza? *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 83(x), 69-73.
- Tavera, H., & Bernal, I. (2005). Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 6(x), 89-102.
- Tavera, H., & Bufo, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- Udias, A. F., Espinosa, A. F., Mezcu, J., Bufo, E., Vegas, R., Nishenko, S. P., & Lopez-Arroyo, A. (1986). *Seismicity and tectonics of the North African-Eurasian plate boundary (Azores-Iberia-Tunisia)*.
- Villavicencio, A. (2005). *Terremotos en Chile, Historia. Terremotos y otros desastres naturales*. Retrieved from <http://www.angelfire.com/nt/terremotos/chilehistoria.html>
- Villegas, J., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J. (2016). Active tectonics of Peru: heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical research*, 121(10), 7371-7394.

Wiemer, S., & Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? *Jour. Geophys. Res.*, 102, 15115-15128.

Zúñiga, F., & Wyss, M. (1995). Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: Their evaluation through b-value estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1858-1866.

