

EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ

por Cat Consultant

Fecha de entrega: 06-mar-2024 05:20p.m. (UTC+0200)

Identificador de la entrega: 2313299621

Nombre del archivo: MIGUEL_ANGEL_RIVERA_ROJAS.pdf (24.99M)

Total de palabras: 14599

Total de caracteres: 66952

11

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO
RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL
PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS,
PERÚ**

3

Autor: Bach. Miguel Angel Rivera Rojas

Asesor: Ing. Daniel Villa Abanto

Registro: _____

CHACHAPOYAS - PERÚ

2024

Dedicatoria

¹
*A mis padres y hermanos
por su amor infinito y apoyo incondicional.*

Agradecimiento

La presente investigación, como no podría ser de otra manera, ha sido el trabajo más retador al que he tenido que enfrentarme, y al que he dedicado mucho esfuerzo y constancia para poder concluirlo, esto aunado al apoyo y colaboración de personas e instituciones que a continuación paso a detallar, a todo ellos muchas gracias:

- A mi familia, en especial a mi mamá S. Esperanza, por su amor infinito y por motivarme cada día ha seguir esforzándome.
- A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza y particularmente a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, por brindarme un sólida formación académica e inculcarme valores y vocación de servicio.
- A mi asesor el Ing. Daniel Villa Abanto por su guía durante la realización de esta investigación, gracias por sus sugerencias y en especial por el tiempo brindado.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimiento	II
Índice	IV
Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
I. Introducción	1
II. Materiales y Métodos	3
2.1. Región de interés	3
2.2. Catálogo sísmico	5
2.3. Identificación de fuentes sísmicas	9
2.4. Determinación de los parámetros de sismicidad	16
2.5. Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo	19
2.5.1. Ecuación de Youngs et al. (1997)	19
2.5.2. Ecuación de Sadigh et al. (1997)	20
2.6. Construcción de las curvas de peligro sísmico	20
2.7. Determinación del peligro sísmico en el programa CRISIS	21
III. Resultados	22
3.1. Curvas de peligro sísmico	22
3.2. Espectro de peligro uniforme	23
3.3. Mapas de peligro sísmico	24
IV. Discusión	27
V. Conclusiones	29
VI. Recomendaciones	31
VII. Referencias bibliográficas	34

Anexos

Anexo A: Mapa de ubicación del proyecto	35
Anexo B: Fuentes sismogénicas	37
Anexo C: Eventos sísmicos magnitud de momento (Mw)	39
Anexo D: Curvas de probabilidad anual de excedencia	41
Anexo E: Espectros de peligro uniforme	49
Anexo F: Mapas de isoaceleraciones espectrales	57
Anexo F.1: Isoaceleraciones espectrales Tr = 100 años	57
Anexo F.2: Isoaceleraciones espectrales Tr = 145 años	61
Anexo F.3: Isoaceleraciones espectrales Tr = 475 años	65
Anexo F.4: Isoaceleraciones espectrales Tr = 975 años	69
Anexo F.5: Isoaceleraciones espectrales Tr = 2475 años	73

Índice de tablas

1.	Año de inicio de integridad por rangos de magnitud	6
2.	Información geográfica de las fuentes de interfase, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	9
3.	Información geográfica de las fuentes de intraplaca, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	10
4.	Información geográfica de las fuentes continentales, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	12
5.	Parámetros sísmicos necesarios para la evaluación del peligro, indicados para cada una de las fuentes	18
6.	Resumen de aceleraciones obtenidas del análisis probabilístico del peligro sísmico para los siete puntos de control	24
7.	Comparación de los valores de PGA para cada punto de control obtenidos en el presente estudio, y los obtenidos en otras investigaciones	28

Índice de figuras

1.	Región de interés para el presente estudio	4
2.	Algunos sismos fuertes que afectaron la región de interés en los últimos 30 años	4
3.	Distribución espacial de los sismos del catálogo	7
4.	Distribución temporal de los sismos del catálogo	8
5.	Análisis de integridad del catálogo	8
6.	Fuentes sísmicas de tipo área para el proceso de subducción	14
7.	Fuentes sísmicas de tipo área continentales	15
8.	Distribución Magnitud-Frecuencia para la fuente F-2, el punto de inflexión viene a ser la M_{min}	17
9.	Distribución del número de sismos encontrados en la fuente F-2 por magnitud	17
10.	Recta de ajuste por máxima verosimilitud para la fuente F-2	18
11.	Curva de peligro sísmico expresado en probabilidad de excedencia anual vs. aceleración espectral	22
12.	Determinación del espectro de peligro uniforme para Chachapoyas, a partir de la curva de peligro sísmico de la máxima aceleración del suelo en un periodo de retorno de 475 años	23
13.	Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 475 años	25
14.	Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 2475 años	26

Resumen

La siguiente investigación muestra los resultados de la evaluación probabilística del peligro sísmico para la región Amazonas considerando 7 puntos de control: Chachapoyas, Bagua, Jumbilla, Santa María de Nieva, Lámud, San Nicolás y Bagua Grande.

La data sísmica utilizada, correspondiente tanto a eventos históricos como instrumentales, ha sido extraída del Instituto Geofísico del Perú, del Servicio Geológico de los Estados Unidos y del Instituto Geofísico del Ecuador, actualizada hasta diciembre de 2022. Además, la información sísmica se ha homogenizado a la magnitud de momento (M_w) y se ha depurado para eliminar las réplicas y los eventos antecesores.

Se han considerado las fuentes sísmicas de área propuestas por Aguilar *et al.* (2017) para el presente estudio: 3 fuentes de subducción de interfase, 8 fuentes de subducción de intraplaca y 6 corticales.

La evaluación del peligro sísmico se ha realizado mediante el programa CRISIS, para lo cual se ha utilizado las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo de Youngs *et al.* (1997) para los sismos de subducción de interfase e intraplaca, y la ecuación propuesta por Sadigh *et al.* (1997) para los sismos corticales.

Finalmente, los resultados se presentan en forma de curvas de probabilidad anual de excedencia vs. aceleración espectral, espectros de peligro uniforme y mapas de isoaceleraciones para cada uno de los 7 puntos de control.

Palabras Clave: Peligro Sísmico, Evaluación Probabilística del Peligro Sísmico

Abstract

The following investigation shows the results of the probabilistic analysis of the seismic hazard for the Amazonas region considering 7 control points: Chachapoyas, Bagua, Jumbilla, Santa María de Nieva, Lámud, San Nicolás and Bagua Grande.

The seismic data used corresponding to both historical and instrumental events, has been extracted from the Geophysical Institute of Peru, the United States Geological Survey and the Geophysical Institute of Ecuador, updated until December 2022. In addition, the seismic information has been homogenized to the moment magnitude (M_w) and has been declustered to eliminate aftershocks and predecessor events.

The area seismic sources proposed by Aguilar et al. (2017) have been considered for the present study: 3 interface subduction sources, 8 intra-slab and 6 cortical sources.

The evaluation of the seismic hazard has been carried out through the R-CRISIS program, for which the ground motion prediction equations of Youngs et al. (1997) have been used for interface and intra-slab subduction earthquakes, and the equation proposed by Sadigh et al. (1997) for crustal earthquakes.

Finally, the results are presented in the form of curves of annual probability of exceedance vs. spectral acceleration, uniform hazard spectrum and hazard maps for each of the 7 control points.

Keywords: Seismic Hazard, Probabilistic Seismic Hazard Analysis

I. Introducción

Para definir el peligro sísmico es necesario hacer una diferenciación general y específica del término. Por un lado, el peligro sísmico se usa de forma general para hacer referencia a los fenómenos como los deslizamientos de tierra, la licuefacción, los movimientos del suelo o incluso los tsunamis, que son generados por los sismos y que son potencialmente dañinos para la población. Por otro lado, de manera específica, el peligro sísmico significa la probabilidad de exceder la intensidad de cualquier fenómeno dañino, a causa de un sismo, en una región en un determinado periodo de tiempo (Thenhaus & Campbell, 2003). El estudio presentado en este trabajo gira en torno a esta última definición.

Los estudios de peligro sísmico son beneficiosos en muchos aspectos. Por ejemplo, determinar la probabilidad de experimentar una intensidad de movimiento del suelo es de suma importancia en el ámbito de la ingeniería civil, ya que esto va a definir el nivel de confiabilidad estructural de los diseños. Esto último, además, con la finalidad de orientar respuestas adecuadas para la mitigación de riesgos. Para realizar la evaluación del peligro sísmico de un sitio de interés existen dos métodos: el determinista y el probabilístico. Se puede decir que hasta antes del desarrollo del método probabilístico, todas las evaluaciones del peligro sísmico se hacían en base al método determinista. La esencia del método determinista está en el cálculo de la probabilidad de que cierto parámetro sísmico, como la máxima aceleración del suelo (PGA), sea superado luego de combinar las incertidumbres relacionadas con la magnitud y la distancia de un solo sismo en particular para el sitio de interés. Sin embargo, el considerar un solo evento sísmico da una imagen poco realista del peligro. Frente a este inconveniente, Cornell (1968) fue el primero en describir un procedimiento para realizar una evaluación del peligro sísmico usando un método probabilístico. En el método probabilístico, a diferencia del determinista, se consideran los sismos de varias fuentes y, del mismo modo, se tienen en cuenta las incertidumbres como la magnitud y la distancia de la fuente al sitio, para calcular la tasa anual de superación de los diferentes niveles de los parámetros de movimiento del suelo seleccionados (Jia, 2017). Actualmente los estudios de peligro sísmico basados en un enfoque probabilístico se llevan a cabo en varias partes del mundo.

En el Perú se han llevado a cabo varios estudios para evaluar la peligrosidad sísmica a nivel del territorio nacional, los cuales se diferencian principalmente por los catálogos sísmicos disponibles a la fecha de realizados los estudios y las ecuaciones de atenuación usadas. Uno de los primeros estudios fue el realizado por Castillo & Alva (1993) en su tesis: Peligro Sísmico en el Perú, el resultado que obtuvieron fue una curva de peligro sísmico, donde se relaciona la aceleración y su probabilidad anual de excedencia. Posteriormente, Alva & Escalaya (2005) realizaron una actualización a la investigación planteada por Castillo & Alva (1993), sus resultados se presentaron en forma de curvas

de peligro sísmico. Tavera et al. (2014) realizaron un estudio del peligro sísmico para el Perú, como resultado obtuvieron los mapas de aceleración máxima (PGA) esperada para una cierta probabilidad en un determinado periodo de vida. Otro estudio, relativamente actual, de la peligrosidad sísmica del país fue realizado por Aguilar *et al.* (2017), los resultados derivados de este estudio fueron mapas de peligrosidad sísmica para el Perú de la máxima aceleración del suelo (PGA) y la respuesta espectral para periodos de 0.2 y 1 segundos con 2% y 10% de ser excedidos en 50 años.

Los esfuerzos por caracterizar el peligro sísmico anteriormente mencionados, se centran en mostrar resultados para áreas con fallas específicas y con información de catálogos sísmicos obsoletos; por el contrario, este estudio plantea evaluar el peligro sísmico de la región Amazonas considerando todos los eventos sísmicos que se han registrado en la zona, y no solo los que están relacionados con fallas específicas, recopilado en un catálogo actualizado y completo de la región de interés.

Bajo el enfoque de la metodología de Cornell-McGuire, la evaluación del peligro sísmico de la región Amazonas se realizó primero considerando las fuentes sísmicas alrededor de la región de interés, para luego calcular los parámetros sísmicos de cada una de estas, llámese: M_{min} , M_{max} , beta y la tasa media anual de excedencia. Se eligió las ecuaciones de predicción de Youngs *et al.* (1997) y Sadigh *et al.* (1997) para modelar el movimiento del suelo de cada fuente, y con ayuda del programa CRISIS (Ordaz *et al.*, 2007) se determinó el peligro sísmico probabilístico. Los resultados de esta investigación se presentan para cada una de las siete capitales de provincia de la región Amazonas (Chachapoyas, Bagua, Jumbilla, Santa María de Nieva, Lámud, San Nicolás y Bagua Grande) en forma de curvas de probabilidad anual de excedencia, espectros de peligro uniforme y mapas de isoaceleraciones.

II. Materiales y Métodos

2.1. Región de interés

La región de interés para la cual se presentarán los resultados de este estudio está delimitada entre las longitudes 79.5° O y 76.5° O y las latitudes 2.9° S y 7° S. Abarca todo el territorio de la región Amazonas, así como parte de las regiones colindantes de Cajamarca, San Martín y Loreto, y parte del Ecuador sumando un área efectiva de 333 km × 456 km (Figura 1).

Esta región presenta una sismicidad que va de leve a moderada, relacionada principalmente con la zona de fallas de Shitari. Este sistema de fallas, llamada también de Moyobamba, se extiende en el límite de la Cordillera Oriental y la Zona Subandina en la región San Martín (Machare *et al.*, 1997). Estudios, como los de Tavera *et al.* (2001), sugieren la presencia de fallas inversas en esta zona, con planos de falla paralelos a la Cordillera Andina buzando hacia el Oeste, así como buzamientos en dirección Oeste y Sureste menores a 35°. Los terremotos de 1990 y 1991 que azotaron esta región tuvieron su origen en las fallas de Shitari. El primero ocurrió el 30 de mayo de 1990 con epicentro a 27 km al Oeste de la ciudad de Moyobamba. La magnitud, M_b 6.1, del sismo produjo aceleraciones en el suelo que se sintieron en un radio de 300 km. Las localidades más afectadas fueron Soritor, Rioja y Moyobamba en la región San Martín, y Rodríguez de Mendoza en la región Amazonas, con un saldo total de 135 muertos y más de 800 heridos. Cerca de un año después, el 4 de abril de 1991, se produjo otro terremoto de magnitud M_b 6.0 esta vez a 22 km al Oeste de la misma ciudad. Transcurridas tan solo 13 horas, el 5 de abril, ocurrió un tercer terremoto de magnitud aún mayor que los anteriores, M_b 6.5, y cuyo epicentro se ubicó a 18 km al Oeste de Moyobamba. Producto de este último terremoto murieron 53 personas, 252 resultaron heridas y hubo cerca de 8000 viviendas afectadas. La fuerte magnitud de este terremoto hizo que se sintiera en un radio de ≈ 300 km.

El emplazamiento de esta región hace que, además de presentar sismos relacionados con fallas, tenga también sismos que se generan como consecuencia del proceso de deformación que sufre la placa de Nazca al deslizarse por debajo de la Cordillera de los Andes a profundidades de ≈ 120 km. Tal es el caso del sismo suscitado el 25 de setiembre de 2005 a 90 km hacia el Noreste de Moyobamba (M_w 7.5), que dejó 2500 damnificados y 5 personas fallecidas por el derrumbe de viviendas en Lamas, Pampa Hermosa y Yurimaguas, localidades cercanas al epicentro. Más recientemente, el 28 de noviembre de 2021, ocurrió un sismo de magnitud M_w 7.5 a 98 km hacia el Este de Santa María de Nieva que causó el derrumbe de viviendas de adobe y el bloqueo de carreteras por el deslizamiento de tierra en las regiones de Amazonas y San Martín. Debido a esto es que se requiere una mejor apreciación de los estudios de peligro sísmico para la región de interés (Figura 2).

Figura 1
Región de interés para el presente estudio

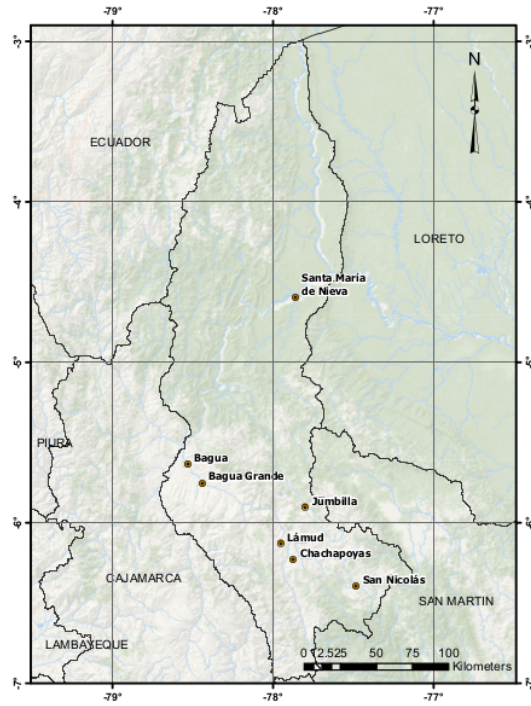
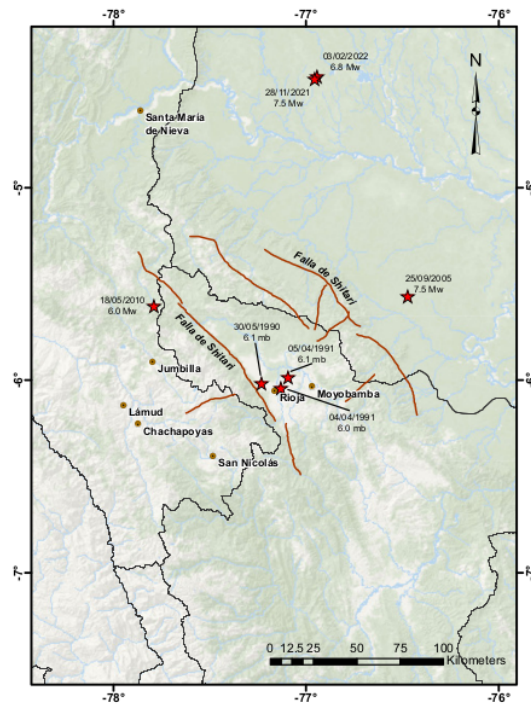


Figura 2
Algunos sismos fuertes que afectaron la región de interés en los últimos 30 años



2.2. Catálogo sísmico ⁷⁵

Para realizar la evaluación del peligro sísmico del área de interés, lo primero que se necesita es un catálogo sísmico que proporcione información de los sismos como su magnitud, su profundidad focal y las coordenadas epicentrales (Latitud y Longitud). Dicha información se la puede sacar de las bases de datos de instituciones tanto nacionales como internacionales y de la bibliografía existente. Al catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) se le complementó con información sacada del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y del Instituto Geofísico del Ecuador (IGPN). Los tres catálogos anteriores se combinaron para formar uno solo mediante el software ZMAP desarrollado por Wiemer (2001). Al final se obtuvo un catálogo unificado consistente en 17454 registros sísmicos con magnitudes mayores o iguales a 4.0 distribuidos como se muestra en la Figura 3. Se eligió una cuadrícula mucho más amplia con la finalidad de evaluar la contribución al peligro de todos los eventos sísmicos alrededor del área de estudio.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la homogeneidad de magnitudes de los eventos sísmicos del catálogo. Por lo general, la magnitud de momento (M_w) es la escala que más se usa en el análisis probabilístico del peligro sísmico. Sin embargo, la información recopilada para preparar el catálogo sísmico de la región de interés contiene eventos en escala de magnitud local (M_l), de duración (M_d), onda corporal (m_b) y onda superficial (M_s), siendo necesario usar algunas relaciones empíricas para convertirlas a la magnitud de momento. En este caso se usó las relaciones propuestas por Kadirioglu *et al.* (2016) y Scordilis (2006).

$$M_w = 0.8095M_l + 1.3003, \quad 3.3 \leq M_l \leq 6.6 \quad (1)$$

$$M_w = 0.7947M_d + 1.3420, \quad 3.5 \leq M_d \leq 7.4 \quad (2)$$

$$M_w = 0.85m_b + 1.03, \quad 3.5 \leq m_b \leq 6.2 \quad (3)$$

$$M_w = 0.67M_s + 2.07, \quad 3.0 \leq M_s \leq 6.1 \quad (4)$$

$$M_w = 0.99M_s + 0.08, \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \quad (5)$$

De esta manera se logró preparar un catálogo sísmico completo y homogéneo para el área de estudio que comprende todos los eventos sísmicos con magnitud $M_w \geq 4.0$ registrados desde 1555 hasta diciembre del 2022 (Figura 4). Sin embargo, este catálogo en bruto se tuvo que filtrar para eliminar las réplicas y los eventos antecesores, debido a que el

análisis probabilístico del peligro sísmico solo considera terremotos independientes a fin de evitar sobrestimar las tasas de terremotos (Mouloud & Badreddine, 2017). El filtrado del catálogo se realizó mediante el algoritmo de Gardner & Knopoff (1974) que viene implementado en el programa ZMAP. El proceso de filtrado eliminó 5313 eventos del catálogo sísmico dejando solo 12141 eventos independientes para el análisis del peligro sísmico del sitio de interés.

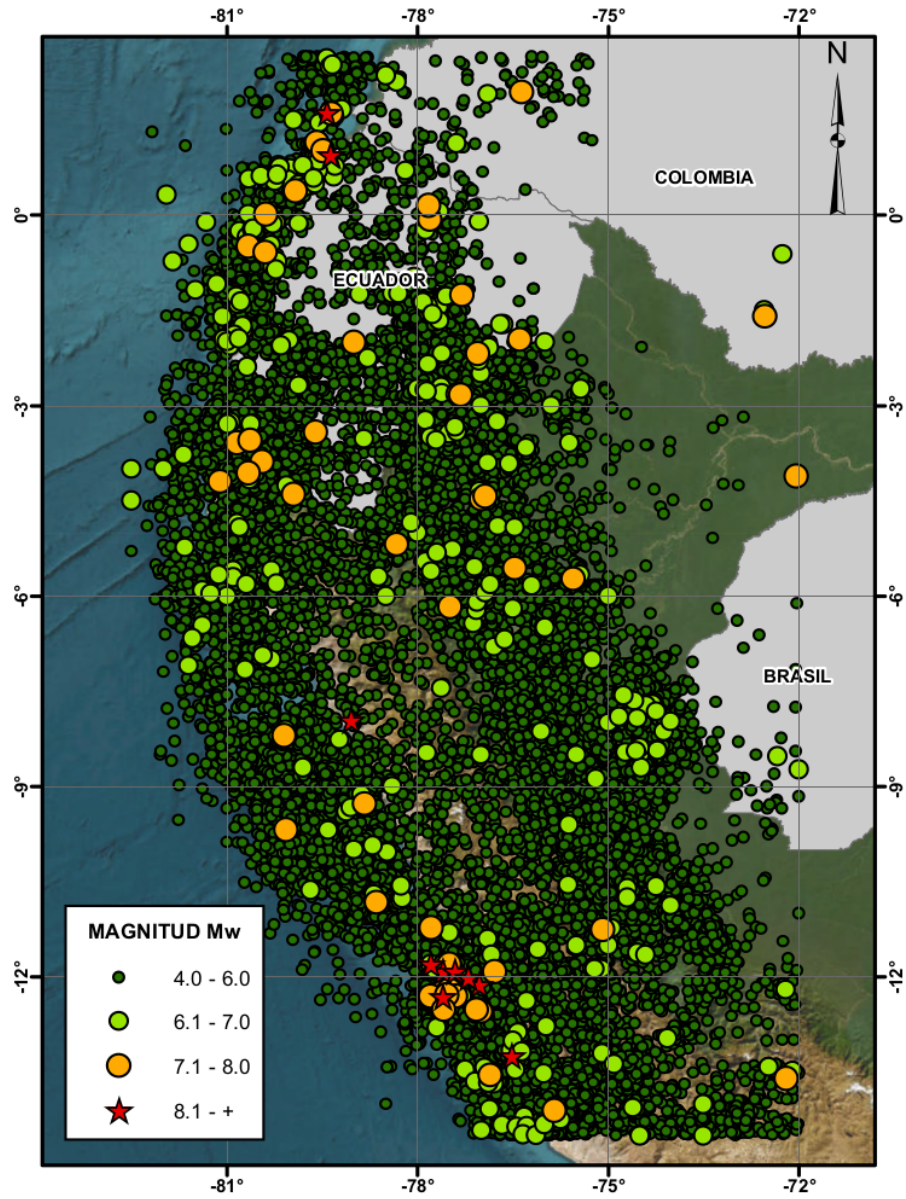
Después de realizar el filtrado de las réplicas y los eventos antecesores se realizó el análisis de integridad del catálogo. Esta característica se mide en términos del año de inicio de integridad del catálogo. El año de inicio de integridad es el punto en el tiempo en el que los registros sísmicos del catálogo, agrupados en rangos de magnitud, presentan una tasa de ocurrencia (Khoshnevis *et al.*, 2017).

Para localizar el año de inicio de integridad se usó el método propuesto por Stepp (1972). La Figura 5 representa un gráfico a escala logarítmica de la desviación estándar de la media estimada contra el tiempo. Para conocer el periodo de tiempo para el cual un determinado rango de magnitudes sísmicas se considera constante, se traza un segmento de recta con pendiente $T^{-1/2}$ que se ajuste a los datos de la desviación estándar. Esto se hace para cada uno de los rangos de magnitudes. Si los datos dispersos de la desviación estándar se ajustan a la recta hasta un punto en el tiempo en que se alejan demasiado de ella, significa que las observaciones sísmicas para ese rango de magnitud están completas para dicho periodo de tiempo. Esto quiere decir que para el rango $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ hay 43 años de observaciones homogéneas, 80 años para el rango $5.1 \leq M_w \leq 6.0$, 125 años para el rango $6.1 \leq M_w \leq 7.0$, 147 años para el rango $7.1 \leq M_w \leq 8.0$ y 467 años para el rango $M_w \geq 8.1$, que está completo para todo el periodo de observación del catálogo. La Tabla 1 muestra el año de inicio de integridad para cada rango de magnitud.

Tabla 1
Año de inicio de integridad por rangos de magnitud

Rango de magnitud	Año de inicio de integridad
$4.0 \leq M_w \leq 5.0$	1979
$5.1 \leq M_w \leq 6.0$	1942
$6.1 \leq M_w \leq 7.0$	1897
$7.1 \leq M_w \leq 8.0$	1875
$M_w \geq 8.1$	1555

Figura 3
Distribución espacial de los sismos del catálogo



12

Figura 4
Distribución temporal de los sismos del catálogo

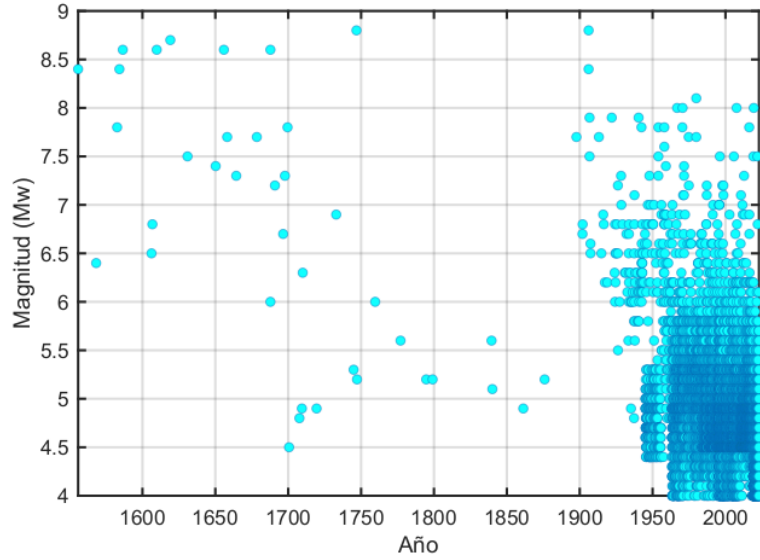
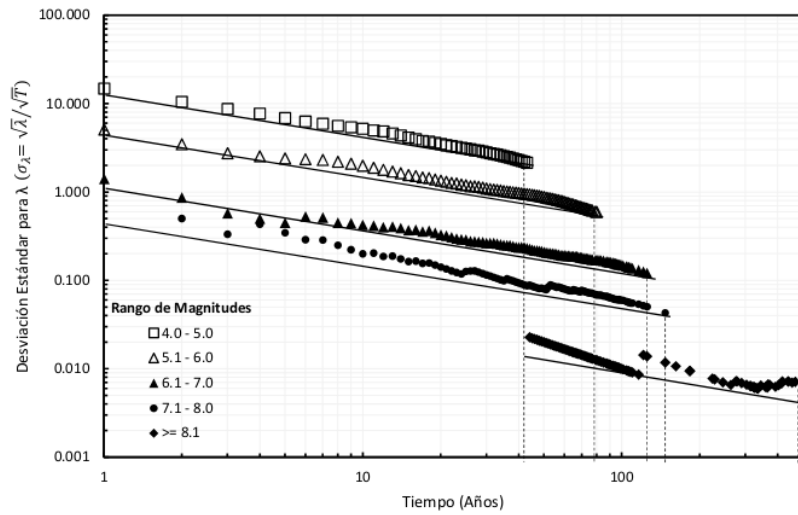


Figura 5
Análisis de integridad del catálogo



2.3. Identificación de fuentes sísmicas

Según Cornell (1968) la identificación de las fuentes sísmicas es un proceso esencial en el marco del análisis de peligro sísmico del área de estudio. Esta identificación se basa en las características tectónicas del área de interés y la distribución de epicentros.

Las fuentes sísmicas se pueden modelar como fuentes locales o fuentes de área. En este estudio se optó por las fuentes de área debido a que no se tienen registros sobre la actividad reciente de las fallas tectónicas en el sitio de interés como para relacionarlas a la ocurrencia de los sismos.

Debido al proceso de convergencia de la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana, los sismos en el Perú se agrupan en sismos de subducción y sismos continentales. Los sismos de subducción son más frecuentes en la costa, siendo llamados de interfase a los que se generan como consecuencia de la interacción de las dos placas. A medida que la placa de Nazca se va metiendo por debajo de la Sudamericana genera sismos de subducción de intraplaca que son característicos al interior del país. Por otro lado, los sismos continentales se originan debido al reajuste tectónico de la cordillera de Los Andes. Tomando como base el estudio de Aguilar *et al.* (2017), se identificó las fuentes sismogénicas en un radio de 500 km alrededor de la región de interés; de este modo, los datos del catálogo sísmico se agruparon en 3 fuentes sísmicas de interfase, 8 fuentes de intraplaca y 6 fuentes de sismos continentales. En las siguientes tablas y figuras se muestra información sobre la geometría de cada una de las fuentes y su representación gráfica, respectivamente.

Tabla 2

Información geográfica de las fuentes de interfase, tomado de Aguilar et al. (2017)

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-1	-79.928	-1.314	50
F-1	-79.697	-2.447	50
F-1	-81.742	-2.217	25
F-1	-81.670	-1.163	25
F-1	-80.380	2.110	25
F-1	-78.778	1.666	50
F-2	-81.851	-3.458	25
F-2	-82.054	-5.322	25

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-2	-80.991	-8.528	25
F-2	-79.267	-7.740	50
F-2	-80.368	-5.595	50
F-2	-79.699	-2.439	50
F-2	-81.236	-2.274	25
F-3	-80.991	-8.528	25
F-3	-80.022	-10.322	25
F-3	-77.184	-14.412	25
F-3	-75.856	-13.563	60
F-3	-77.824	-10.464	60
F-3	-79.267	-7.740	60

Tabla 3
Información geográfica de las fuentes de intraplaca, tomado de Aguilar et al. (2017)

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-7	-79.033	-2.129	125
F-7	-76.989	0.998	125
F-7	-79.222	1.809	50
F-7	-80.031	0.162	50
F-7	-80.600	-1.400	50
F-8	-81.334	-3.969	50
F-8	-80.840	-5.926	50
F-8	-79.881	-8.015	50
F-8	-77.474	-6.920	120
F-8	-78.667	-4.725	120
F-8	-77.716	-2.798	200
F-8	-80.017	-1.630	90

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-9	-78.423	-7.352	100
F-9	-79.881	-8.015	60
F-9	-78.003	-11.728	60
F-9	-76.381	-13.899	60
F-9	-74.775	-12.871	120
F-9	-76.441	-10.831	130
F-13	-77.716	-2.798	200
F-13	-78.667	-4.725	120
F-13	-76.472	-8.763	130
F-13	-75.489	-8.120	140
F-13	-74.558	-6.771	150
F-13	-76.164	-4.332	130
F-13	-75.255	-2.911	150
F-14	-76.441	-10.831	130
F-14	-74.775	-12.871	120
F-14	-73.794	-12.219	130
F-14	-76.472	-8.763	130
F-14	-77.474	-6.920	120
F-14	-78.423	-7.352	120
F-15	-75.116	-10.513	145
F-15	-73.794	-12.219	130
F-15	-72.577	-11.410	135
F-15	-73.319	-10.572	150
F-15	-74.417	-9.331	150
F-15	-75.489	-8.120	140
F-15	-76.472	-8.763	130
F-17	-77.716	-2.798	200

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-17	-76.245	-2.865	170
F-17	-75.638	-1.914	170
F-17	-77.119	-0.922	200
F-17	-78.400	-1.161	125
F-17	-79.033	-2.129	125
F-18	-75.489	-8.120	140
F-18	-74.417	-9.331	150
F-18	-73.051	-8.124	185
F-18	-74.558	-6.771	180

Tabla 4

Información geográfica de las fuentes continentales, tomado de Aguilar et al. (2017)

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-21	-79.173	-7.916	30
F-21	-77.365	-7.009	30
F-21	-78.581	-4.449	30
F-21	-80.368	-5.595	30
F-22	-79.173	-7.916	30
F-22	-77.824	-10.464	30
F-22	-76.318	-12.881	30
F-22	-75.677	-13.764	30
F-22	-74.411	-12.807	30
F-22	-75.315	-12.019	30
F-22	-76.798	-8.551	30
F-22	-77.365	-7.009	30
F-25	-79.367	-0.036	30
F-25	-79.083	-2.408	30

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°O)	Latitud (°S)	
F-25	-77.139	-1.595	30
F-25	-76.797	1.211	30
F-25	-77.897	1.730	30
F-26	-79.083	-2.408	30
F-26	-78.581	-4.449	30
F-26	-78.152	-5.348	30
F-26	-76.293	-4.598	30
F-26	-76.661	-3.088	30
F-26	-77.139	-1.595	30
F-27	-78.152	-5.348	30
F-27	-77.365	-7.009	30
F-27	-76.798	-8.551	30
F-27	-75.145	-7.359	30
F-27	-75.430	-6.292	30
F-27	-76.304	-4.610	30
F-28	-76.798	-8.551	30
F-28	-75.315	-12.019	30
F-28	-73.789	-13.349	30
F-28	-72.276	-11.656	30
F-28	-73.668	-10.523	30
F-28	-74.957	-8.744	30
F-28	-75.145	-7.359	30

Figura 6
Fuentes sísmicas de tipo área para el proceso de subducción

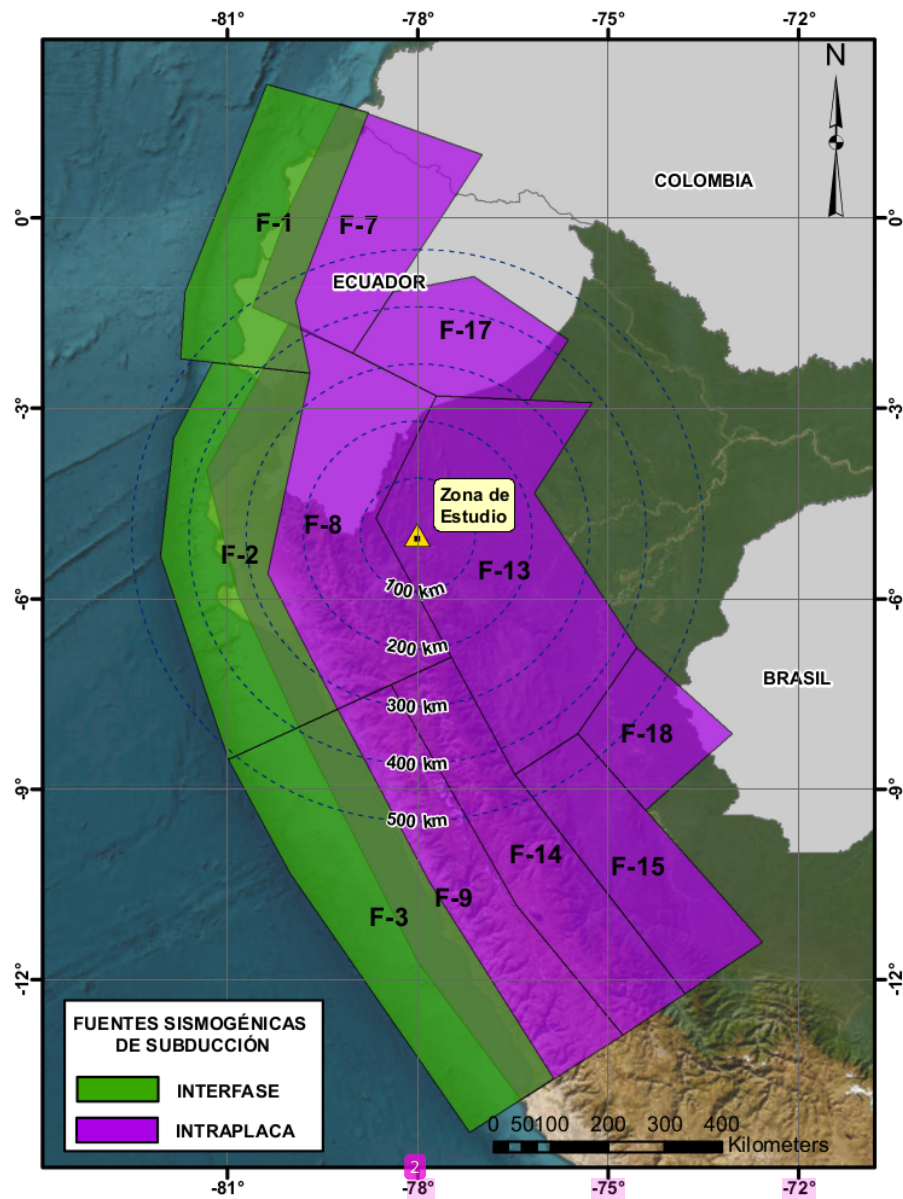
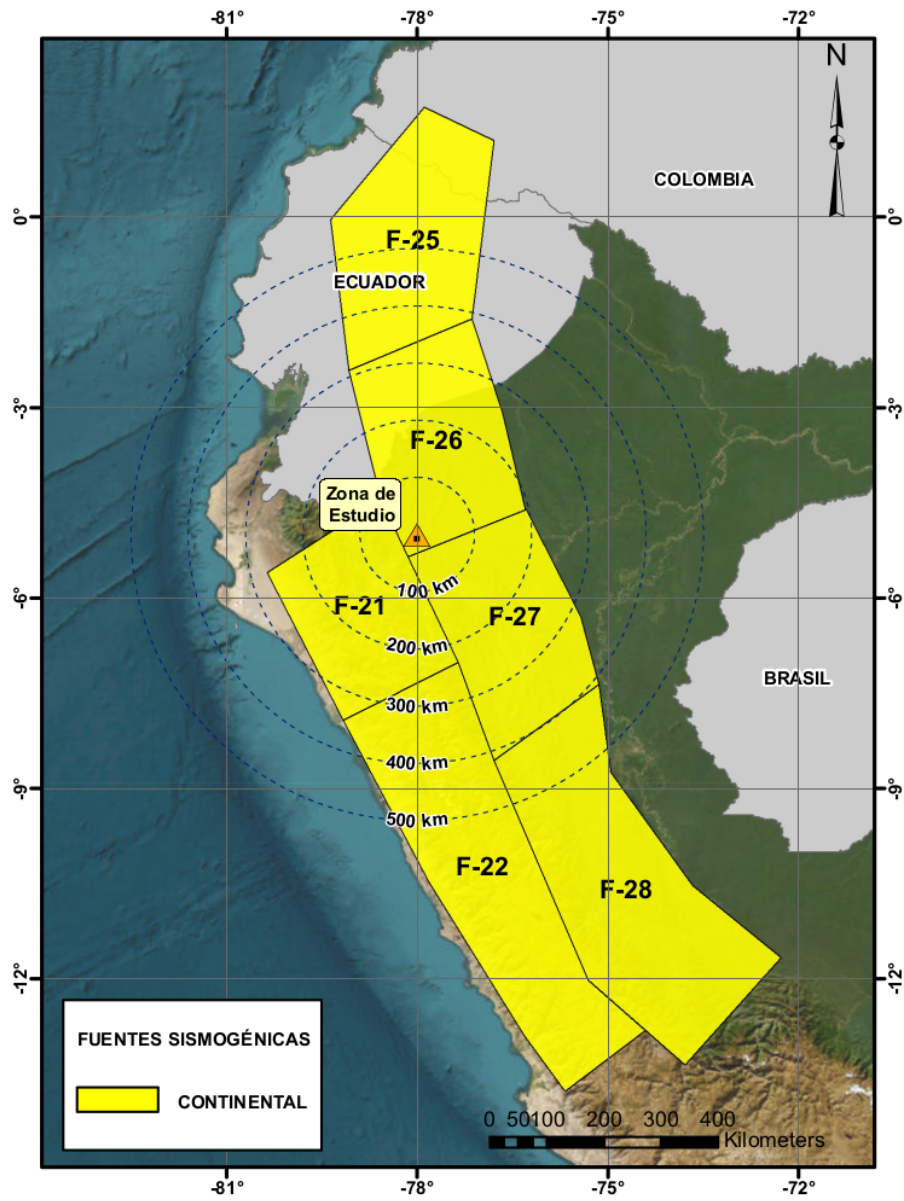


Figura 7
Fuentes sísmicas de tipo área continental



2.4. Determinación de los parámetros de sismicidad

Después de identificar las fuentes sísmicas se continúa con la determinación de la incertidumbre relacionada con la magnitud de los sismos y la distancia de estos con respecto al sitio de interés. Luego, la distribución de magnitudes se expresa mediante la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter (Baruwal *et al.*, 2020) y se adopta el supuesto de que existe la misma probabilidad de que ocurra un terremoto a cualquier distancia de la fuente sísmica (Baker *et al.*, 2015).

La ley de recurrencia de Gutenberg-Richter se expresa mediante la relación:

$$\log \lambda_M = a - bM \quad (6)$$

Donde λ_M es la tasa anual de excedencia de terremotos con magnitudes mayores que la magnitud M , y a y b son constantes. Además, el valor de a indica la tasa general de terremotos en una determinada región y el valor de b indica la relación entre la magnitud de un evento pequeño con uno de gran magnitud (Rahman *et al.*, 2020).

La Ecuación 6 admite un número infinito de magnitudes; sin embargo, para fines de ingeniería civil es necesario limitar el rango a una magnitud mínima, ya que se considera que una magnitud por debajo de la mínima difícilmente tendría efectos dañinos en las estructuras. De igual forma para el límite superior, se considera que toda fuente está sujeta a la ocurrencia de un sismo con una magnitud máxima. Con esto, la ley de recurrencia quedaría expresada de la siguiente manera:

$$\lambda_M = \nu \frac{\exp[-\beta(M - M_{min})] - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]} \quad (7)$$

La expresión anterior se conoce como ley de recurrencia de Gutenberg-Richter truncada. El símbolo griego ν representa la tasa media anual de excedencia y $\beta = b \ln(10)$.

La evaluación del peligro sísmico de la región de interés requiere la determinación de la magnitud máxima (M_{max}) y mínima (M_{min}) para cada una de las fuentes sísmicas. Para la magnitud máxima se consideró el mayor evento sísmico de la fuente, siguiendo las recomendaciones para la estimación de la magnitud máxima cuando se tengan fuentes de tipo área en el estudio de peligro sísmico. Por otro lado, la magnitud mínima, se determinó mediante el programa ZMAP como el punto de inflexión de la curva de los eventos sísmicos acumulados, como es el caso de la fuente F-2 que se muestra en la Figura 8. Del mismo modo se usó ZMAP para calcular el valor de la constante b para la misma fuente como se aprecia en la Figura 10.

La tasa media anual de excedencia se calculó usando el método propuesto por Weichert (1980) y los periodos de integridad del catálogo sísmico de la Tabla 1.

Figura 8

Distribución Magnitud-Frecuencia para la fuente F-2, el punto de inflexión viene a ser la M_{min}

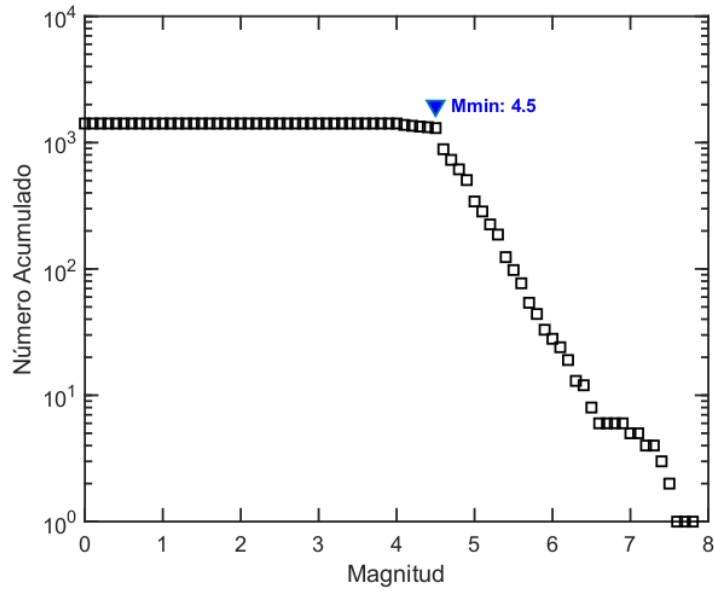


Figura 9

Distribución del número de sismos encontrados en la fuente F-2 por magnitud

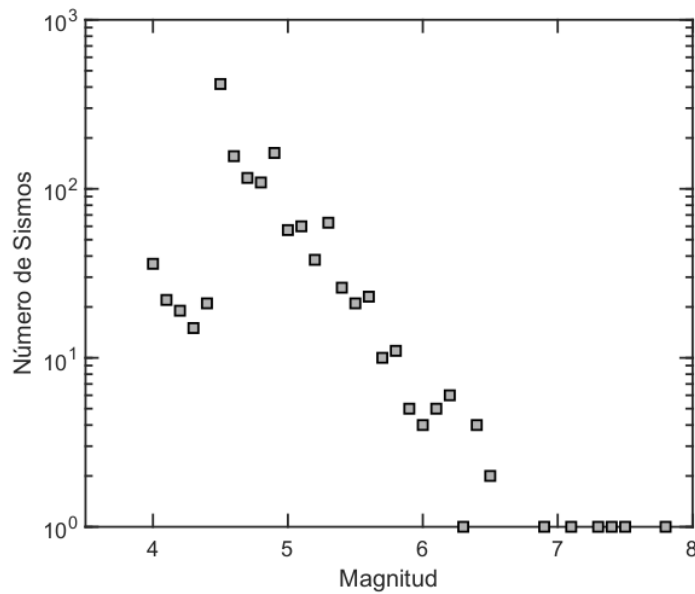


Figura 10

Recta de ajuste por máxima verosimilitud para la fuente F-2

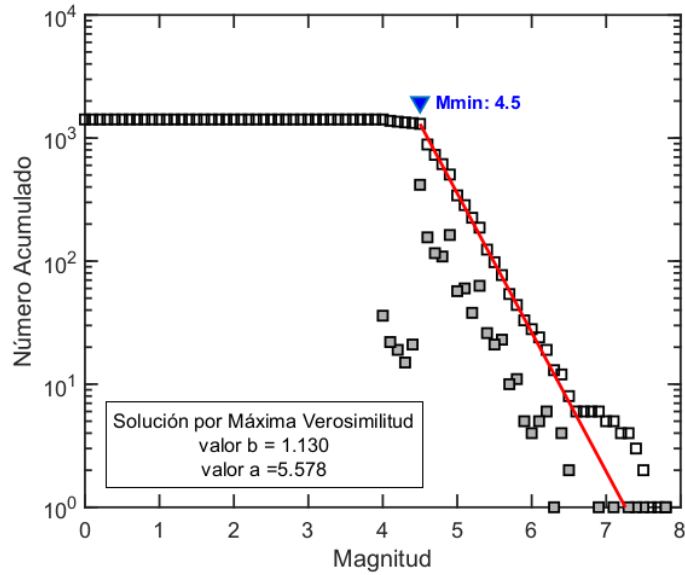


Tabla 5

Parámetros sísmicos necesarios para la evaluación del peligro, indicados para cada una de las fuentes

Fuente	Parámetros de sismicidad			
	M_{min}	M_{max}	β	Tasa
F-1	4.9	8.5	1.54	2.01
F-2	4.5	7.5	2.60	3.11
F-3	4.5	8.7	2.33	3.62
F-7	4.5	7.0	2.03	0.50
F-8	4.5	6.6	2.51	6.71
F-9	4.5	7.3	2.46	4.98
F-13	4.5	7.6	2.14	8.75
F-14	4.5	6.3	2.83	3.23
F-15	4.6	6.3	2.76	4.68
F-17	4.9	7.2	2.42	1.91
F-18	4.5	6.9	1.91	4.37
F-21	4.5	5.4	3.85	1.38
F-22	4.5	5.7	3.22	0.50
F-25	4.9	7.2	1.87	0.89
F-26	4.5	6.6	1.82	1.43
F-27	4.5	6.7	2.26	1.87
F-28	4.6	6.4	2.65	1.31

2.5. Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo

Hasta el momento se ha caracterizado los eventos sísmicos que podrían afectar a la región de interés en función de su magnitud y ubicación desde la fuente sismogénica al sitio; sin embargo, lo que interesa en verdad es conocer los movimientos del suelo, no los sismos. Para lograr esto se hace uso de modelos o ecuaciones empíricas de predicción del movimiento del suelo. Estos modelos nos van a permitir calcular estos movimientos a partir de las magnitudes y las distancias de la fuente al sitio de todos los eventos caracterizados anteriormente. Existen varios modelos desarrollados alrededor de todo el mundo y por varios autores; para este estudio en particular, se usaron los modelos propuestos por Youngs *et al.* (1997) para los sismos de subducción (interfase e intraplaca), y Sadigh *et al.* (1997) para los sismos continentales. La elección de estos modelos se basó en la recomendación hecha por Tavera *et al.* (2014), que en su estudio de la peligrosidad sísmica de todo el territorio peruano evaluó varios modelos de predicción indicando que los propuestos por Youngs *et al.* (1997) y Sadigh *et al.* (1997) se promediaban a los demás modelos. En los siguientes párrafos se da una descripción más detallada de los modelos de predicción adoptados.

2.5.1. Ecuación de Youngs *et al.* (1997)

La ventaja del modelo propuesto por Youngs *et al.* (1997) es que para su determinación se usaron 14 registros sísmicos del Perú, además de otros provenientes de Chile, México, Japón, Alaska, Cascadia y las Islas Salomón. Este se puede utilizar para sismos de subducción tanto de interfase como de intraplaca, que tengan magnitudes de momento ≥ 5.0 y distancias de la fuente al sitio de entre 10 a 500 km.

La ecuación de Youngs *et al.* (1997) para la aceleración espectral en roca con un amortiguamiento de 5 % tiene la siguiente forma:

$$\ln(Sa) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup}) + 17818e^{0.554M} + 0.00607H + 0.3846Zt \quad (8)$$

$$\text{Desviación estándar} = C_4 + C_5M \quad (9)$$

donde

Sa = aceleración espectral expresada en g

M = magnitud de momento sísmico M_w

r_{rup} = distancia más cercana al área de ruptura en km

H = profundidad en km

$Z_t = 0$ que corresponde a los sismos interfase y 1 para los sismos de intraplaca
 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 = coeficientes de atenuación

2.5.2. Ecuación de Sadigh *et al.* (1997)

Los autores desarrollaron este modelo con data sísmica principalmente de California en los Estados Unidos, así como de registros provenientes de Irán y Rusia. Este modelo se usa para los sismos continentales con magnitud de momento que van desde 4.0 hasta mayores de 8.0 y distancias de la fuente al sitio de hasta 100 km.

El modelo propuesto por Sadigh *et al.* (1997) para la aceleración espectral en roca con un amortiguamiento de 5% es:

$$\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup}) + e^{C_5M + C_6M} + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (10)$$

donde

y = aceleración espectral expresada en g

M = magnitud de momento sísmico M_w

r = distancia más cercana al área de ruptura en km

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ = coeficientes de atenuación

2.6. Construcción de las curvas de peligro sísmico

La curva de peligro sísmico es un gráfico que representa los parámetros de movimiento del suelo, como la máxima aceleración del suelo (PGA) o la aceleración espectral (S_a) en el eje de las abscisas y la tasa anual de superación (λ_y^*) en el eje de las ordenadas (Baruwal *et al.*, 2020). La tasa anual de superación (λ_y^*) de un parámetro del movimiento del suelo (y^*) se expresa como:

$$\lambda_y^* = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_0^{r_{max}} P[y \geq y^*(m, r)] \cdot f_M(m) \cdot f_r(r) \cdot dr \cdot dm \quad (11)$$

Donde $P[y \geq y^*(m, r)]$ es la probabilidad de que un parámetro de movimiento del suelo y pueda exceder un valor particular y^* en m y r dados, f_M y f_r son Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF) para la magnitud y la distancia de la fuente respectivamente. Además, el peligro total de un sitio es la suma de todas las contribuciones de las fuentes sísmicas, o:

$$\lambda_y^* = \sum_{k=i}^n \lambda_i \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_0^{r_{max}} P[y \geq y^*(m, r)] \cdot f_{Mi}(m) \cdot f_{ri}(r) \cdot dr \cdot dm \quad (12)$$

Luego, conociendo λ_y^* , podemos calcular la probabilidad de que un parámetro de movimiento del suelo (digamos PGA o Sa) representado por y exceda y^* en un periodo de tiempo de T años mediante la ecuación:

$$P[y \geq y^*] = 1 - \exp(-T\lambda_y^*) \quad (13)$$

2.7. Determinación del peligro sísmico en el programa CRISIS

El programa CRISIS tiene una interfaz de usuario sumamente accesible que permite calcular el peligro sísmico probabilístico de un determinado sitio solamente con ingresar las características geográficas de las fuentes sismogénicas, los parámetros de recurrencia de terremotos y los modelos de atenuación del movimiento del suelo. Los resultados que nos proporciona el programa son curvas de peligro sísmico con la probabilidad de exceder una determinada intensidad para diferentes periodos de tiempo, así como espectros de peligro uniforme.

Para que el algoritmo del programa CRISIS ejecute una evaluación probabilística del peligro sísmico, requiere que se adjunte la siguiente información:

1. Lo primero es la información geográfica en formato ShapeFile de toda la región de estudio para la cual se requiere calcular el peligro sísmico.
2. Lo que sigue es definir la grilla que se sobrepondrá a la región de interés, en nuestro caso se definió un grillado de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ para la longitud y la latitud, respectivamente.
3. El tercer paso es ingresar la información geográfica de las Tablas 2, 3 y 4 correspondientes a las fuentes sismogénicas.
4. Luego se coloca el número de periodo estructurales para los cuales se ejecutará la evaluación del peligro sísmico. Para el presente estudio se definieron los siguientes periodos estructurales: 0, 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 3 s.
5. El siguiente paso es el más importante y es definir los parámetros sísmicos para cada una de las fuentes, dicha información se encuentra en la Tabla 5 y corresponde a la M_{min} , M_{max} , el parámetro beta y la tasa media anual de excedencia.
6. Por último se escoge las ecuaciones de atenuación del movimiento del suelo, que en nuestro caso fueron las de Youngs *et al.* (1997) y Sadigh *et al.* (1997), y se ejecuta el programa.

III. Resultados

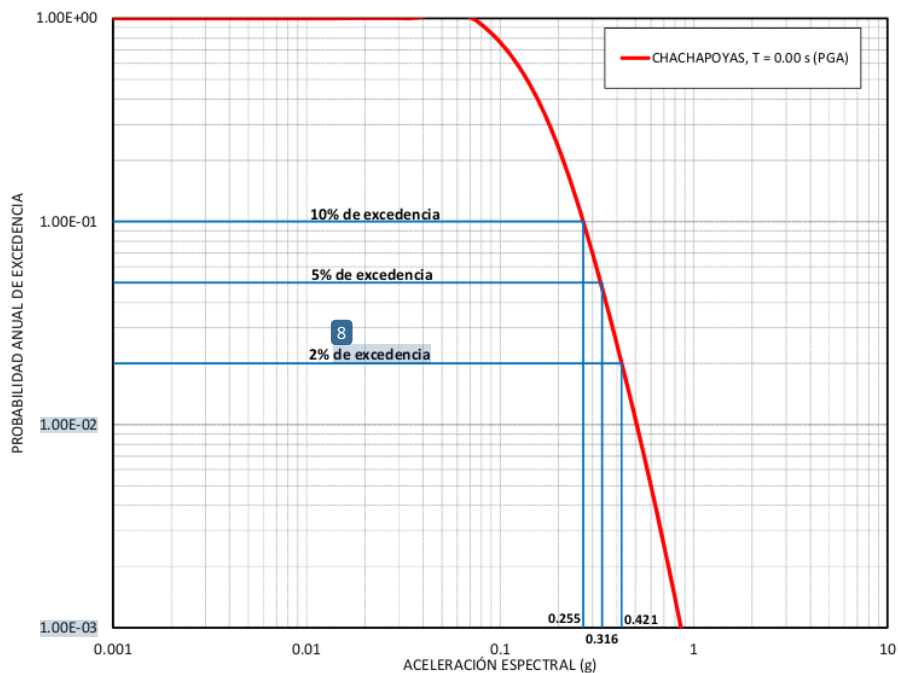
3.1. Curvas de peligro sísmico

La ejecución del análisis de peligro sísmico probabilístico en CRISIS muestra los resultados en forma de curvas de peligro y también como espectros de peligro uniforme, de los cuales se hablará más adelante. En la Figura 11 se presenta, por ejemplo, una curva de peligro que relaciona la probabilidad de excedencia anual en el eje de las ordenadas y las aceleraciones espectrales en las abscisas. El gráfico muestra la máxima aceleración del suelo (PGA) para la ciudad de Chachapoyas considerando las probabilidades de excedencia anual del 10% (periodo de retorno de 475 años), 5% (periodo de retorno de 975 años) y 2% (periodo de retorno de 2475 años), que son 0.255g, 0.316g y 0.421g, respectivamente.

En el Anexo D se presentan todas las curvas de peligro sísmico para los 7 puntos de control considerados, tanto para la PGA como para los periodos estructurales de 0.2s y 1s.

Figura 11

Curva de peligro sísmico expresado en probabilidad de excedencia anual vs. aceleración espectral



3.2. Espectro de peligro uniforme

Como se vio anteriormente una curva de peligro está relacionada para cada periodo estructural que se haya definido en el análisis probabilístico, por lo que puede resultar tedioso la visualización de un montón de curvas. Al respecto es que se construyen los espectros de peligro uniforme, ya que permiten visualizar las aceleraciones espectrales de un sitio en específico y el periodo estructural al que corresponde en un solo gráfico. Un ejemplo de esto se aprecia en la Figura 12, que corresponde a la curva de peligro y al espectro de peligro uniforme de la ciudad de Chachapoyas. Fijando una probabilidad de excedencia anual de 10% (es decir, un periodo de retorno de 475 años) vemos que las aceleraciones espectrales de las curvas de peligro para los periodos estructurales de 0s (PGA), 0.2s y 1s, corresponden a las del espectro que son respectivamente: 0.255g, 0.526g y 0.190g para la ciudad de Chachapoyas.

En el Anexo E se presentan todos los espectros de peligro uniforme para los siete puntos de control, considerando los periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años. Así mismo, los valores de estas aceleraciones se resumen en la Tabla 6.

Figura 12

terminación del espectro de peligro uniforme para Chachapoyas, a partir de la curva de peligro sísmico de la máxima aceleración del suelo en un periodo de retorno de 475 años

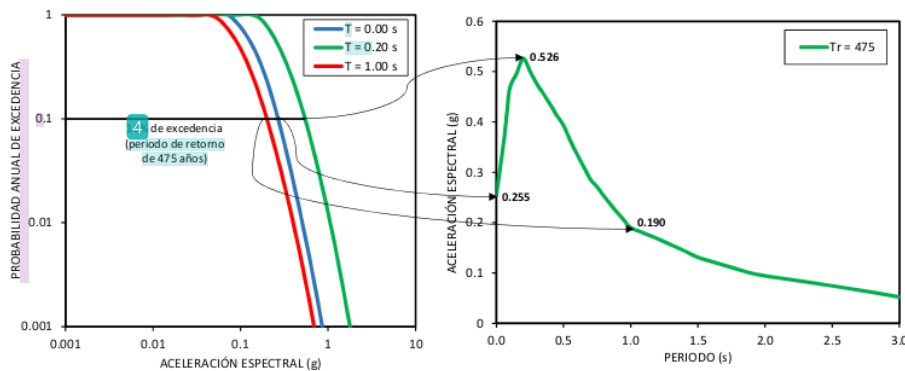


Tabla 6

Resumen de aceleraciones obtenidas del análisis probabilístico del peligro sísmico para los siete puntos de control

Sitio	Tr	PGA	0.20 s	1.00 s	1.50 s	2.00 s	3.00 s
Chachapoyas	475	0.255	0.526	0.190	0.131	0.094	0.052
	975	0.316	0.649	0.244	0.162	0.120	0.068
	2475	0.421	0.858	0.325	0.216	0.161	0.096
Bagua	475	0.245	0.499	0.175	0.117	0.085	0.048
	975	0.303	0.612	0.222	0.150	0.111	0.062
	2475	0.401	0.802	0.301	0.198	0.147	0.087
Jumbilla	475	0.263	0.546	0.200	0.136	0.100	0.055
	975	0.328	0.676	0.257	0.170	0.125	0.071
	2475	0.439	0.898	0.339	0.227	0.169	0.101
S. M. de Nieva	475	0.271	0.565	0.210	0.142	0.104	0.057
	975	0.339	0.704	0.273	0.178	0.131	0.075
	2475	0.452	0.943	0.356	0.240	0.179	0.105
Lámud	475	0.254	0.523	0.189	0.129	0.093	0.052
	975	0.315	0.646	0.242	0.161	0.119	0.067
	2475	0.419	0.852	0.323	0.214	0.160	0.095
San Nicolás	475	0.263	0.548	0.201	0.137	0.101	0.055
	975	0.328	0.679	0.260	0.171	0.126	0.072
	2475	0.439	0.901	0.341	0.229	0.171	0.101
Bagua Grande	475	0.247	0.503	0.178	0.119	0.086	0.049
	975	0.305	0.617	0.225	0.152	0.112	0.063
	2475	0.404	0.810	0.305	0.200	0.150	0.088

3.3. Mapas de peligro sísmico

Dado que el análisis de peligro sísmico se realizó sobre una grilla de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ en la región de interés, es posible representar cada una de estas aceleraciones en un mapa de peligro que permita visualizar de mejor manera los sitios con mayor peligro sísmico. Esto se realizó con la ayuda de ArcGIS considerando los periodos estructuras de 0s, 0.2s y 1s para los periodos de retorno de 100, 145, 475, 975 y 2475 años. Además, con la ayuda de las herramientas de interpolación de ArcGIS se logró construir los mapas de isoaceleraciones, las cuales relacionan los puntos del mapa que tienen la misma aceleración espectral con una curva tal y como se trataría de curvas de nivel. Los mapas de isoaceleraciones para los periodos de retorno mencionados líneas arriba se encuentran en el Anexo F de este documento.

Figura 13

Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 475 años

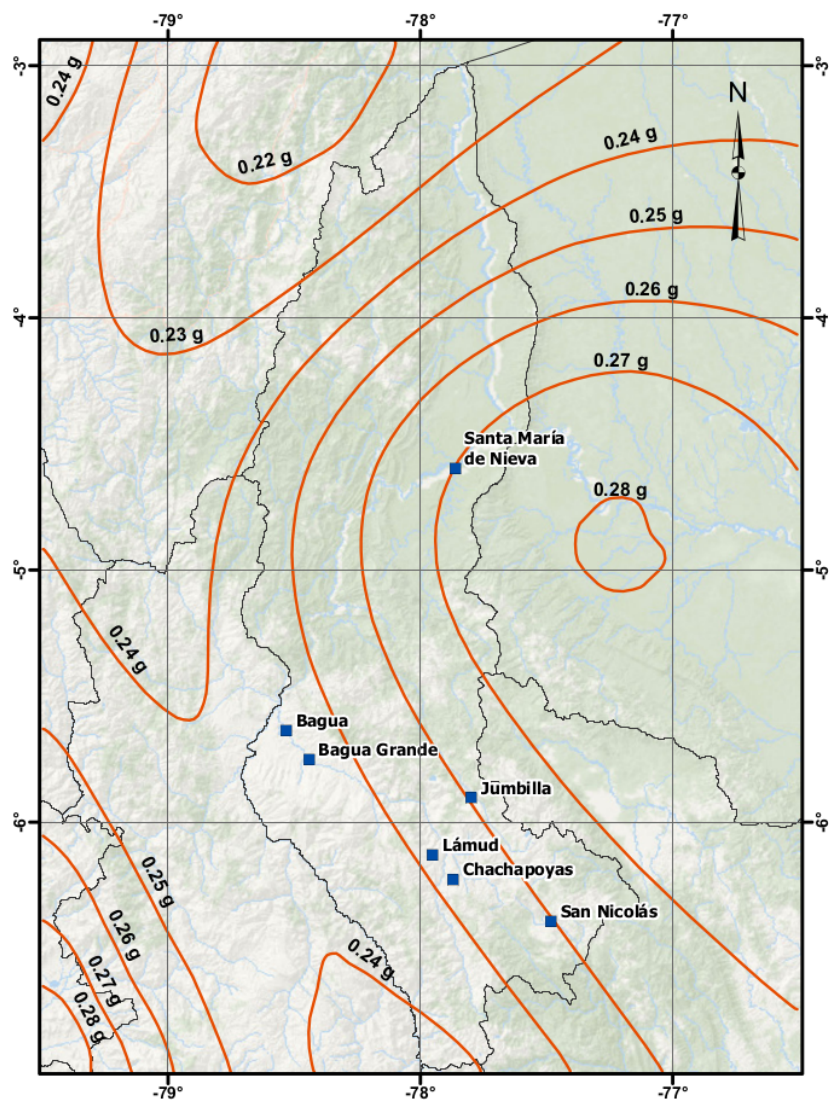
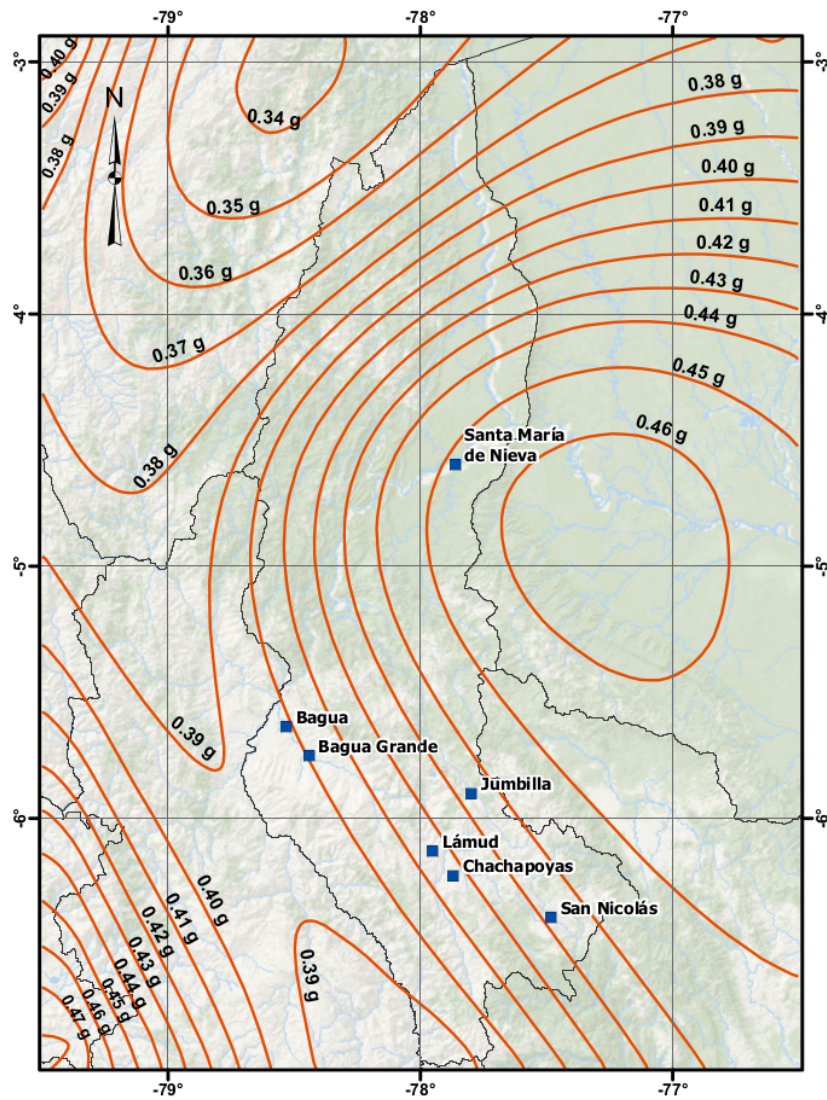


Figura 14
Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 2475 años



IV. Discusión

Si nos fijamos en los mapas de las Figuras 13 y 14 correspondientes a las máximas aceleraciones del suelo (PGA) para los periodos de retorno de 475 y 2475 años, notamos que las aceleraciones van aumentando en dirección Oeste-Este, lo cual es característico de la sismicidad de esta parte del país según varios autores. Se eligió los resultados obtenidos en esta investigación para los periodos de retorno de 475 y 2475 años, precisamente porque a nivel mundial son los que tienen utilidad en el diseño estructural. Debido a esto es que en los primeros estudios de la peligrosidad sísmica del país, como por ejemplo la investigación de Castillo & Alva (1993), presentaron sus resultados en forma de curvas de peligro así como mapas de peligro de la PGA para un periodo de retorno de 475 años. Con respecto a estos autores, sus resultados son mayores a los nuestros (ver Tabla 7), la razón de esta disparidad se debe principalmente a que Castillo & Alva (1993) usaron ecuaciones de predicción del movimiento del suelo diferentes a los usados en el presente estudio, los propuestos por Casaverde & Vargas (1980) (para las fuentes de subducción) y McGuire (1976) (para las fuentes continentales); además, su catálogo sísmico solo cubrió los eventos registrados desde 1963 hasta 1990, un total de 3892 eventos independientes para ser más exactos.

Muy por el contrario, al comparar nuestros resultados con los de Bolaños & Monroy (2004) notamos que sus resultados de PGA para un periodo de retorno de 475 años son menores a los nuestros. Sin embargo, estos autores usaron las ecuaciones de predicción de Youngs *et al.* (1997) y Sadigh *et al.* (1997) al igual que nosotros, por lo que la diferencia en los resultados se deba quizá al uso de un programa de cálculo del peligro sísmico distinto, dado que Bolaños & Monroy (2004) usaron el programa MRIESGO desarrollado por ellos mismos.

Sin embargo, con los estudios de Tavera *et al.* (2014) y Aguilar *et al.* (2017) prácticamente coincidimos en los resultados de las PGA para los puntos considerados. Los primeros realizaron el estudio de la peligrosidad sísmica del Perú usando un catálogo para el periodo 1960-2012. En cuanto a la evaluación del peligro sísmico, lo llevaron a cabo siguiendo la metodología propuesta por Cornell-McGuire y los cálculos en el programa CRISIS. Por su parte Aguilar *et al.* (2017) usaron un catálogo sísmico para el periodo 1555-2016. Para la determinación del peligro sísmico usaron el programa CRISIS a través de las ecuaciones de predicción propuestas por Abrahamson *et al.* (2016), Zhao *et al.* (2006) y Youngs *et al.* (1997) para sismos de subducción de interfase e intraplaca, y las ecuaciones propuestas por Abrahamson *et al.* (2016), Campbell & Bozorgnia (2014) y Sadigh *et al.* (1997) para sismos continentales. Los resultados los presentaron en forma de mapas de peligro sísmico por todo el territorio nacional de la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando los tiempos de retorno de 475 y 2475 años.

Tabla 7

Comparación de los valores de PGA para cada punto de control obtenidos en el presente estudio, y los obtenidos en otras investigaciones

Autores	Periodo de retorno	PGA (g)						
		Chachapoyas	Bagua	Jumbilla	S. M. de Nieva	Lámud	San Nicolás	B. Grande
Este estudio	475	0.255	0.245	0.263	0.271	0.254	0.263	0.247
	2475	0.421	0.401	0.439	0.452	0.419	0.439	0.404
Otros estudios								
Castillo & Alva (1993)	475	0.28-0.30	0.28-0.30	0.30-0.32	0.30-0.32	0.28-0.30	0.28-0.30	0.28-0.30
	2475	-	-	-	-	-	-	-
Bolaños & Monroy (2004)	475	0.18-0.20	0.16-0.18	0.18-0.20	0.20-0.22	0.18-0.20	0.18-0.20	0.16-0.20
	2475	-	-	-	-	-	-	-
Tavera et al. (2014)	475	0.254	0.24-0.26	0.28-0.30	0.28-0.30	0.25-0.26	0.28-0.30	0.24-0.26
	2475	-	-	-	-	-	-	-
Aguilar et al. (2017)	475	0.24-0.26	0.24-0.26	0.26-0.28	0.26-0.28	0.24-0.26	0.26-0.28	0.24-0.26
	2475	0.40-0.45	0.40-0.45	0.40-0.45	0.40-0.45	0.40-0.45	0.40-0.45	0.40-0.45

V. Conclusiones

Se realizó la evaluación del peligro sísmico de la región Amazonas, para lo cual se construyó un catálogo sísmico de la región de interés combinando información de eventos sísmicos recopilados del Instituto Geofísico del Perú, del Servicio Geológico de los Estados Unidos y del Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. A los eventos del catálogo se los distribuyó en fuentes sísmicas de tipo área, distinguiéndolos en fuentes de subducción de interfase, intraplaca o corticales, y se calculó los parámetros de recurrencia sísmica para cada una de ellas. Se adoptaron las ecuaciones propuestas por Youngs *et al.* (1997) y Sadigh *et al.* (1997) para modelar los movimientos del suelo, y el cálculo del peligro sísmico se realizó en el programa CRISIS considerando una grilla de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ superpuesta a la región de interés. Los resultados obtenidos permiten ver la peligrosidad sísmica de la región Amazonas a partir de curvas de peligro sísmico, espectros de peligro sísmico uniforme y mapas de isoaceleraciones.

- Para Chachapoyas, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años (es decir, para 10% de excedencia en 50 años de exposición) tiene un valor de 0.255g; además, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su pico más grande de 0.526g y disminuye a 0.190g para un periodo de 1s.
- Para Bagua, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.245g; además, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su pico más grande de 0.499g, y disminuye a 0.175g para un periodo de 1s.
- Para Jumbilla, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.263g; además, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su valor más grande de 0.546g, y disminuye a 0.200g para un periodo de 1s.
- Para Santa María de Nieva, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.271g; por su parte, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su valor más grande de 0.565g, y disminuye a 0.210g para un periodo de 1s.
- Para Lámud, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.254g; por su parte, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su valor más grande de 0.523g, y disminuye a 0.189g para un periodo de 1s.

- Para San Nicolás, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.263g; en tanto que, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su valor más grande de 0.548g, y disminuye a 0.201g para un periodo de 1s.
- Para Bagua Grande, la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años es de 0.247g; en tanto que, la aceleración espectral en un periodo estructural de 0.2s tiene su valor más grande de 0.503g, y disminuye a 0.178g para un periodo de 1s.

VI. Recomendaciones

La evaluación probabilística del peligro sísmico de la región Amazonas arrojó valores de máxima aceleración del suelo en el rango de 0.24g a 0.27g para las siete capitales de provincia consideradas en el estudio, esto para un periodo de retorno de 475 años. Si bien es cierto que los valores concuerdan con la descripción de la sismicidad (de baja a moderada) de la región de interés, existen factores que podrían agravar este aspecto. Uno de ellos es el crecimiento de la población, lo que hace que la necesidad de vivienda aumente y con con ello también los niveles de informalidad a la hora de construir; por lo tanto, se debería tener en consideración los estudios de sismicidad regional que nos permita tomar acciones para prevenir los efectos de futuros terremotos. Los resultados obtenidos en este estudio se deberían ampliar con estudios de la respuesta de sitio y la generación de escenarios sísmicos para cada uno de las siete capitales; en otras palabras, futuros estudios deberían de estar encaminados en la microzonificación sísmica, y un buen punto de partida es este estudio.

VII. Referencias bibliográficas

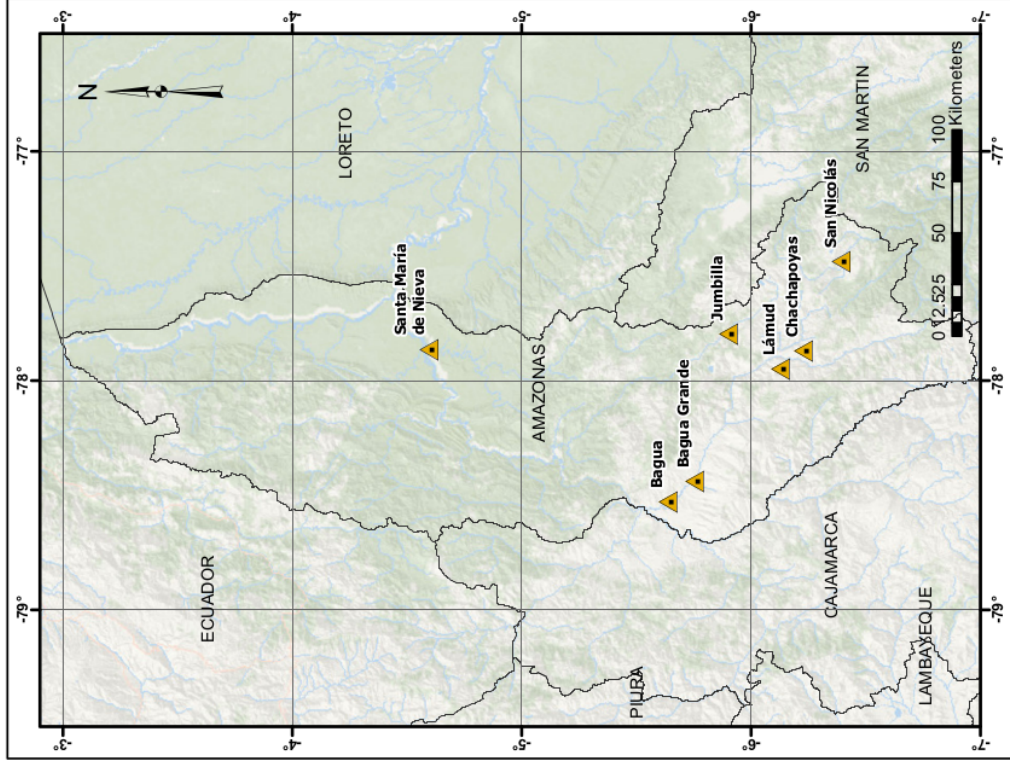
- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. doi: <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Aguilar, Z., Roncal, M., & Piedra, R. (2017, enero). Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Peruvian Territory [Presentación de paper]. En *16th World Conference on Earthquake*. Santiago de Chile, Chile. Descargado de <https://www.researchgate.net/publication/319314757>
- Alva, J., & Escalaya, M. (2005, mayo). Actualización de los Parámetros Sismológicos en la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú [Presentación de paper]. En *Simposio Internacional en Honor al Profesor Yuji Ishiyama CISMID/FIC/UNI*. Lima, Perú. Descargado de <https://docplayer.es/41438893>
- Baker, J. (2015). *Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. White Paper Version 2.1.
- Baruwal, R., Chhetri, B., & Chaulagain, H. (2020). Probabilistic seismic hazard analysis and construction of design spectra for Pokhara valley, Nepal. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(8), 1297–1308. doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00278-4>
- Bolaños, A., & Monroy, O. (2004). *Espectros de Peligro Sísmico Uniforme* (Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú). Descargado de PUCP Tesis <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1331>
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087–1115. doi: <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- Casaverde, L., & Vargas, J. (1980). Zonificación Sísmica del Perú [Presentación de paper]. En *II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, OEA y PUCP*. Lima, Perú.
- Castillo, J., & Alva, J. (1993). *Peligro Sísmico en el Perú* (Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería). Descargado de Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería <http://hdl.handle.net/20.500.14076/3852>
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606. doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>

- Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5).
- Jia, J. (2017). Seismic Analysis and Response of Structures. En J. Jia (Ed.), *Modern Earthquake Engineering : Offshore and Land-based Structures* (pp. 471–545). Springer.
- Kadirioglu, F., & Kartal, R. (2016). The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900–2012). *TURKISH JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 25, 300–310.
- Khoshnevis, N., Taborda, R., Azizzadeh-Roodpish, S., & Cramer, C. (2017). Seismic hazard estimation of northern Iran using smoothed seismicity. *Journal of Seismology*, 21(4), 941–964. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9645-5>
- Machare, J., Camac, D., & Leureyro, J. (1997). Nuevos datos sobre las fallas activas de Shitari y Cayesh, en los Andes peruanos [Presentación de paper]. En *IX Congreso Peruano de Geología*. Lima, Perú.
- McGuire, R. K. (1976). *FORTTRAN computer program for seismic risk analysis* (Inf. Téc. n.º 76-67). U.S. Geological Survey. Descargado de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr7667>
- Mouloud, H., & Badreddine, S. (2017). Probabilistic seismic hazard assessment in the Constantine region, Northeast of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(6), 156. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2876-5>
- Ordaz, M., Aguilar, A., & Arboleda, J. (2007). CRISIS2007. Program for computing seismic hazard. *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México*.
- Rahman, M. Z., Siddiqua, S., & Kamal, A. (2020). Seismic source modeling and probabilistic seismic hazard analysis for Bangladesh. *Natural Hazards*, 103(2), 2489–2532. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04094-6>
- Sadigh, K., Chang, C., Egan, J., Makdisi, F., & Youngs, R. (1997). Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180–189. doi: <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.180>
- Scordilis, E. (2006). Empirical Global Relations Converting MS and mb to Moment Magnitude. *Journal of Seismology*, 10(2), 225–236. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>

- Stepp, J. (1972, october). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. En *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation, Seattle*, Vol. 2, pp. 897–910.
- Tavera, H., Bernal, Y., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú. Descargado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/783>
- Tavera, H., Buforn, E., Bernal, Y., & Antayhua, Y. (2001). Análisis de los procesos de ruptura de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú). Descargado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/836>
- Thenhaus, P., & Campbell, K. (2003). Seismic Hazard Analysis. En C. Scawthorn & W.-F. Chen (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook* (pp. 408–457). CRC Press.
- Weichert, D. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1337–1346. doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0700041337>
- Wiemer, S. (2001). A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382. doi: <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Youngs, R., Chiou, S., Silva, W., & Humphrey, J. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. doi: <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>
- Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., . . . Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913. doi: <https://doi.org/10.1785/0120050122>

Anexos

Anexo A: Mapa de ubicación del proyecto



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000





PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



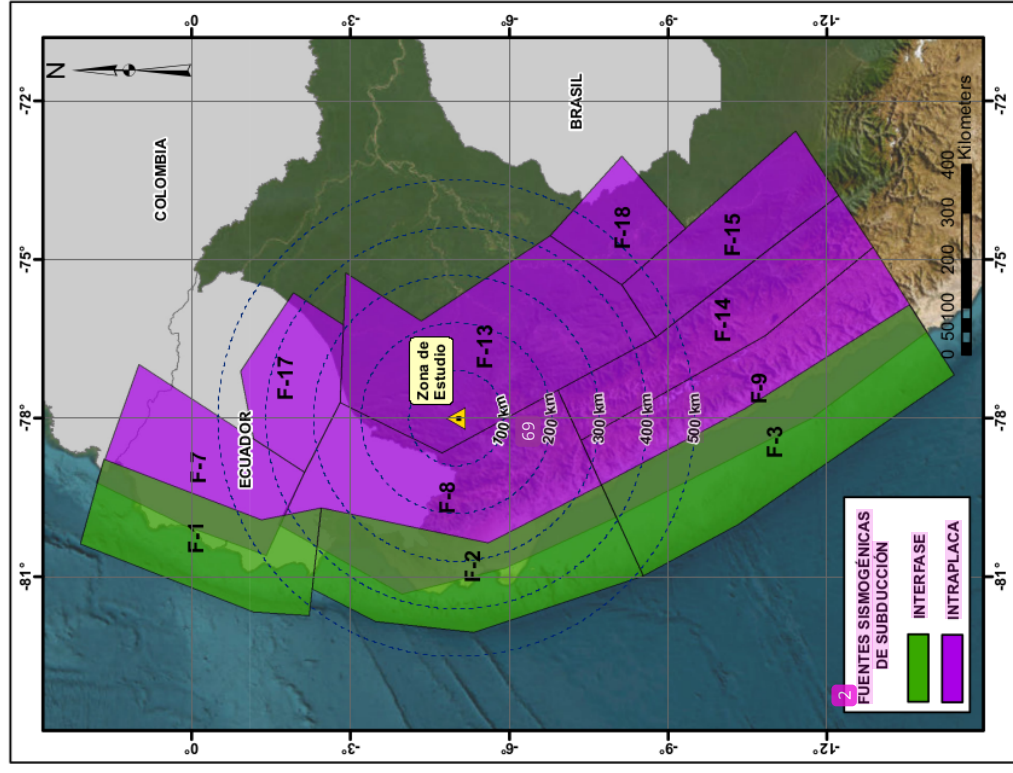
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

LEYENDA

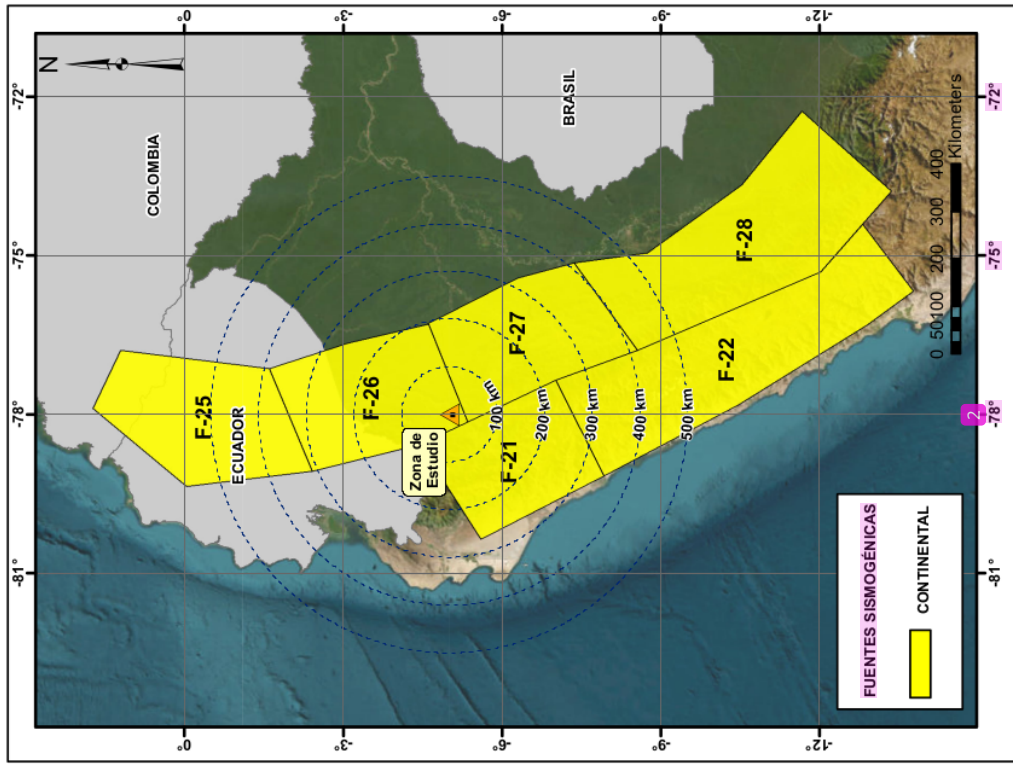
-  Puntos de control
-  Límite departamental

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: UBICACIÓN DEL PROYECTO	DIMANº: A4 FECHA: JULIO-2023 CÓDIGO:
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Earthstar, IGN, Swire			M-01

Anexo B: Fuentes sismogénicas



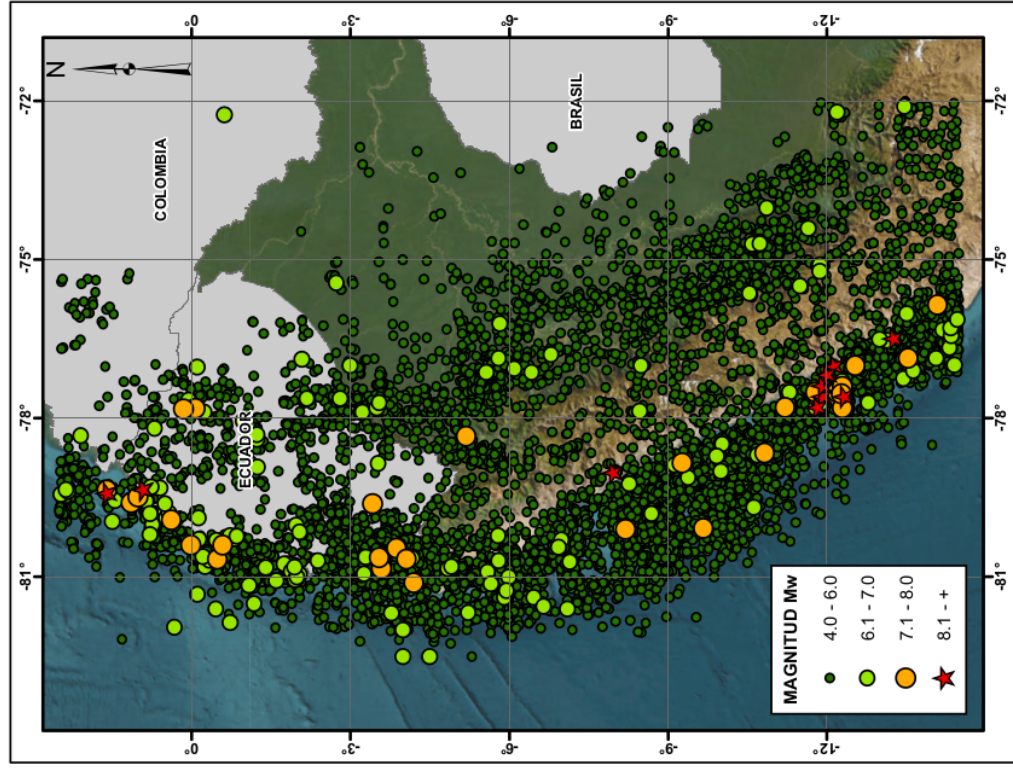
FUENTES SISMOGÉNICAS
Escala 1 / 13 000 000



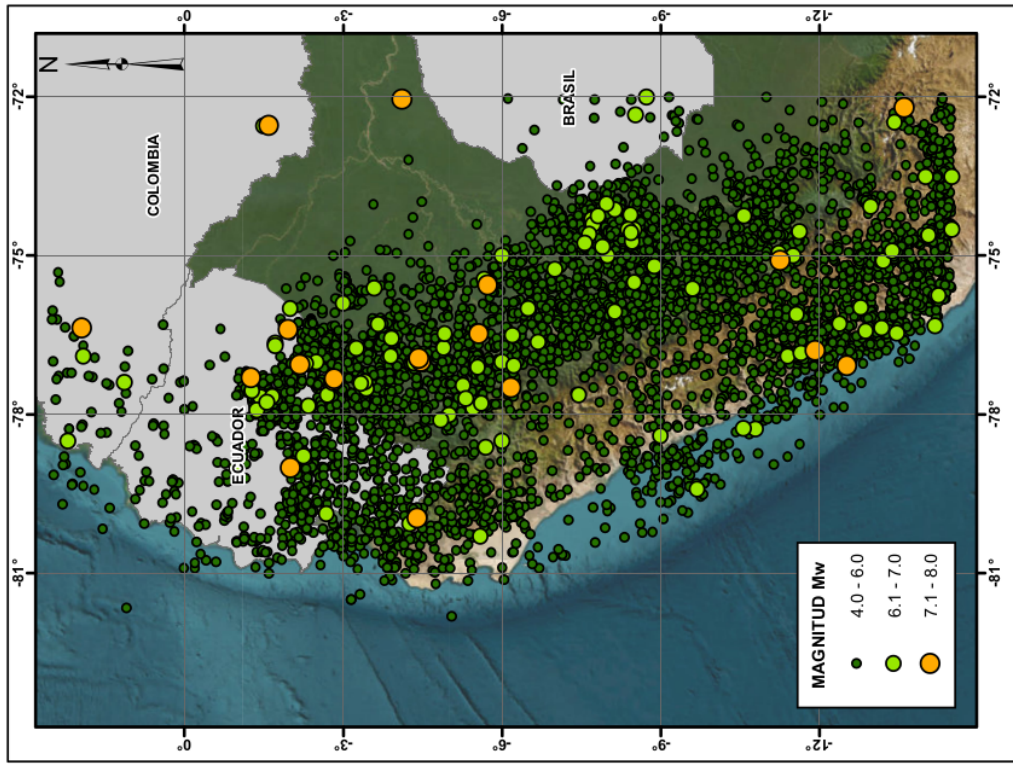
FUENTES SISMOGÉNICAS
Escala 1 / 13 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEODÉSICAS DATUM WGS84	TESIS:	PLANO:	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Est. Wazir, Geógr. Est. Abanto, UGOS	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	FUENTES SISMOGÉNICAS	FECHA: JULIO-2023 CÓDIGO: M-02

Anexo C: Eventos sísmicos magnitud de momento (M_w)



SISMOS SUPERFICIALES (h <= 60 km)
Escala 1 / 13 000 000



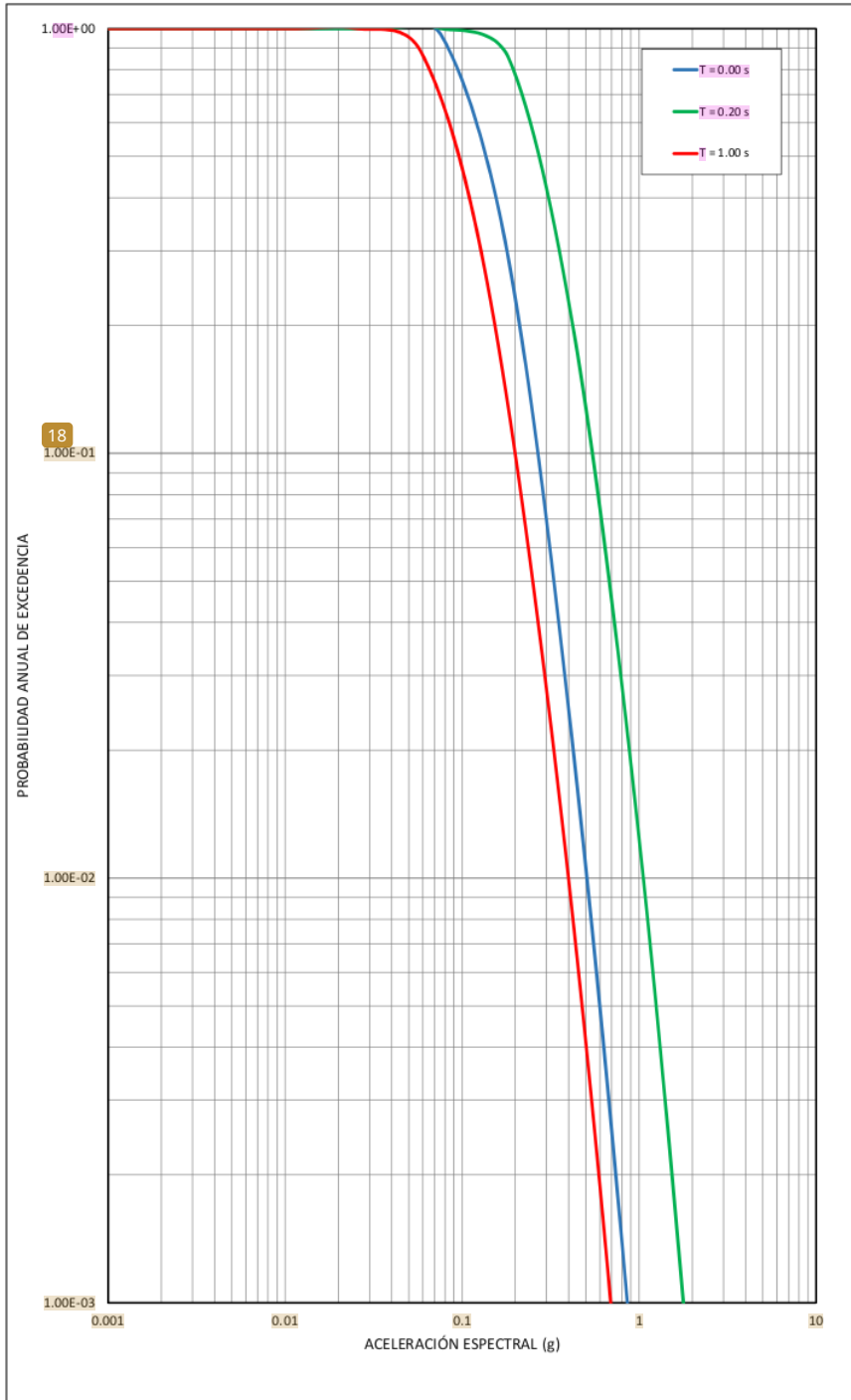
SISMOS INTERMEDIOS Y PROFUNDOS (h > 60 km)
Escala 1 / 13 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS Ing. DANIEL VILLA ABANTO	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM WGS84 REFERENCIA: Est. Wazir, Google Est. AERIAL DE USGS	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SISMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: EVENTOS SISMICOS MAGNITUD MOMENTO	TITULO: M-03
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	ESCALA: 1 / 13 000 000	FECHA: JULIO-2023	PLANO: EVENTOS SISMICOS MAGNITUD MOMENTO	TITULO: M-03

Anexo D: ⁶Curvas de probabilidad anual de excedencia

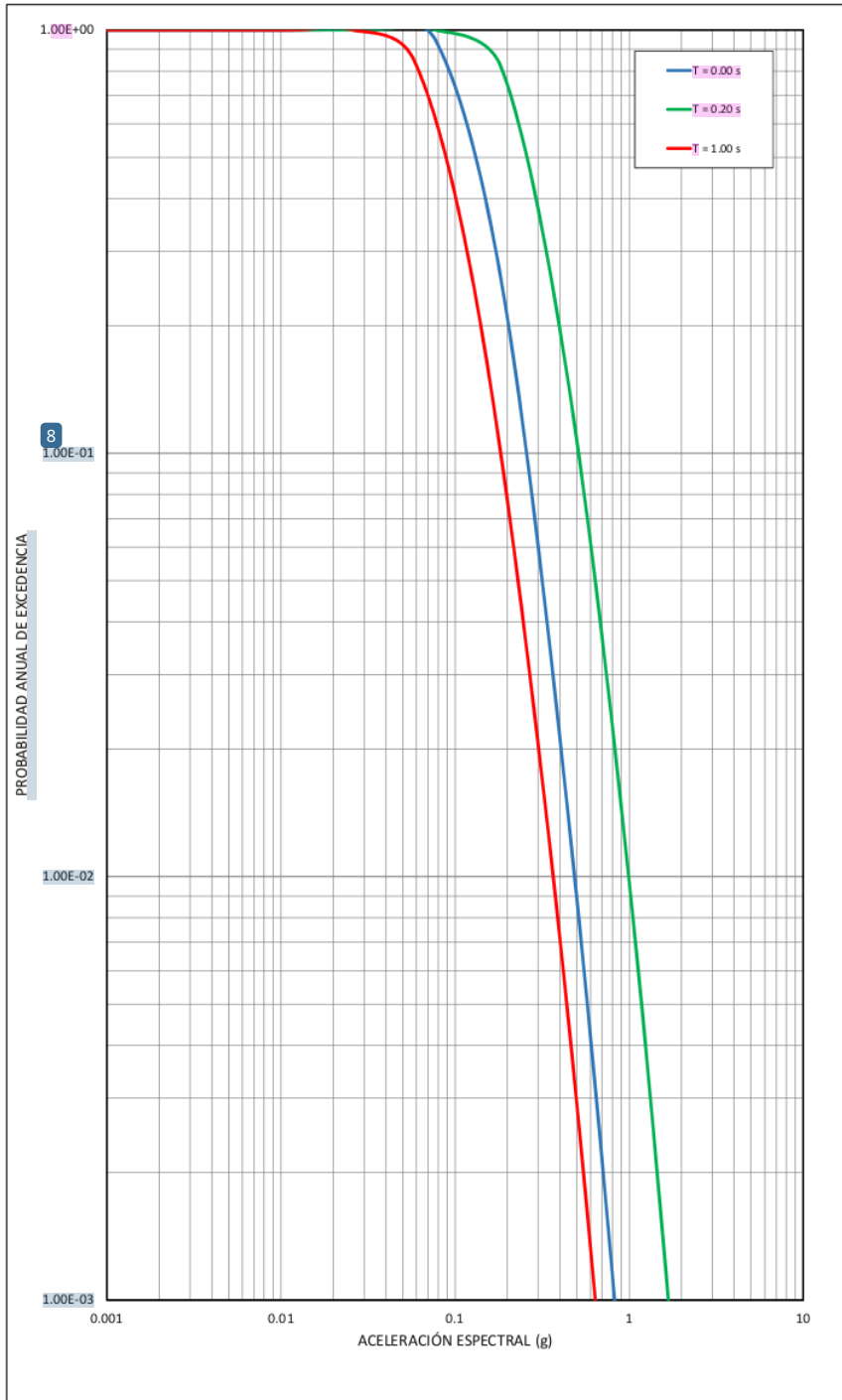
2

CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: CHACHAPOYAS



2

CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: BAGUA



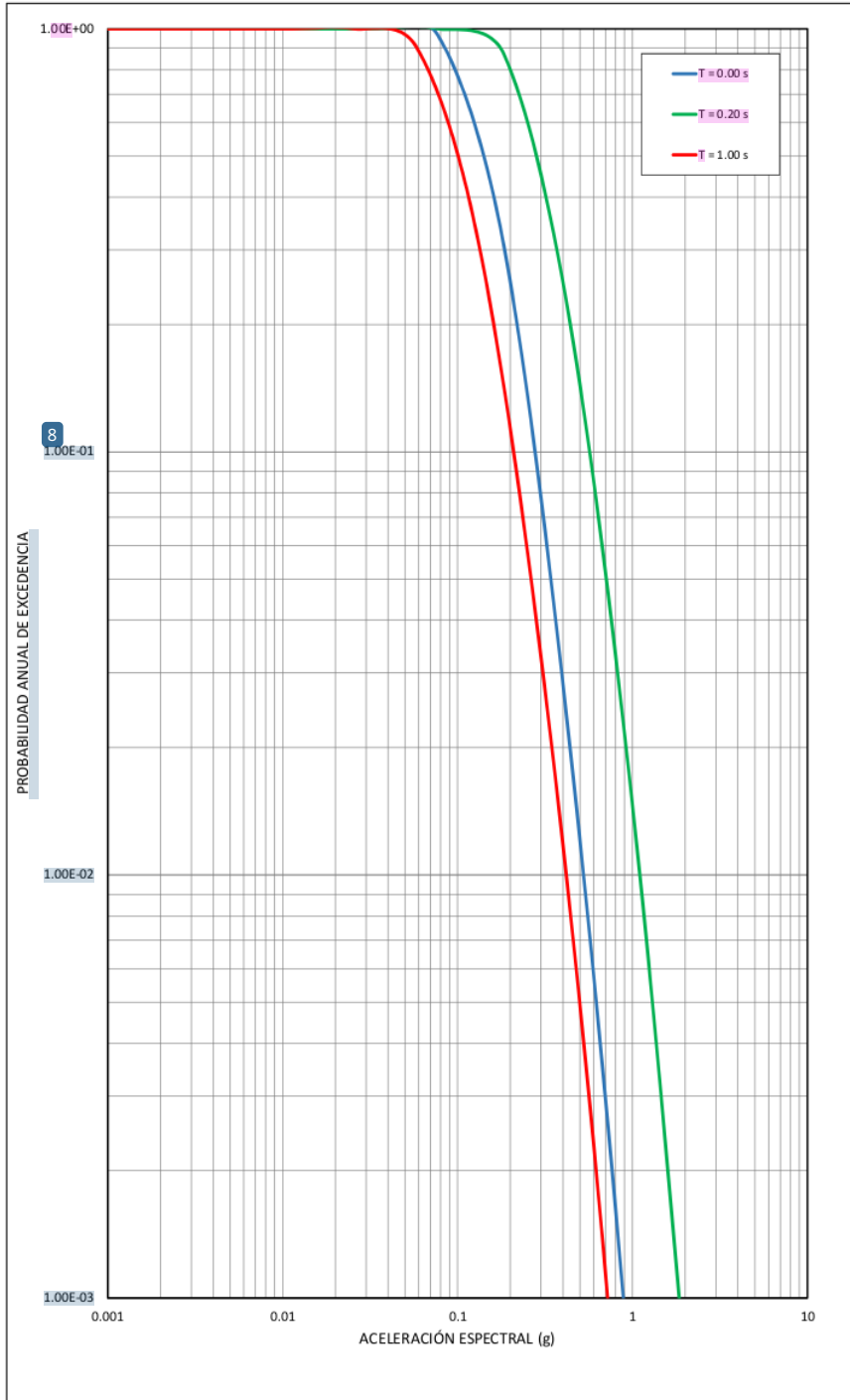
8

PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA

ACCELERACIÓN ESPECTRAL (g)

2

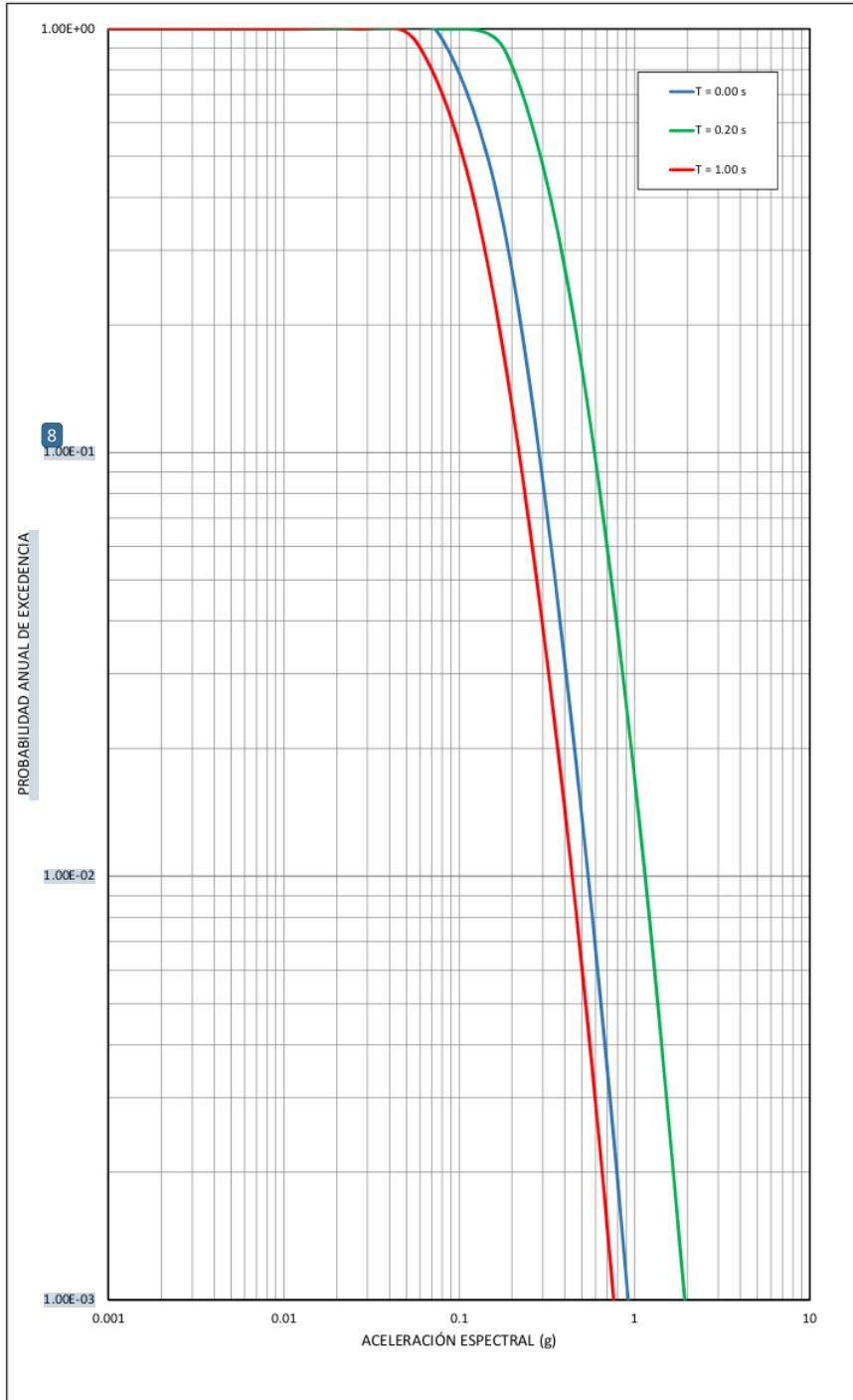
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: JUMBILLA



8

2

CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: SANTA MARÍA DE NIEVA



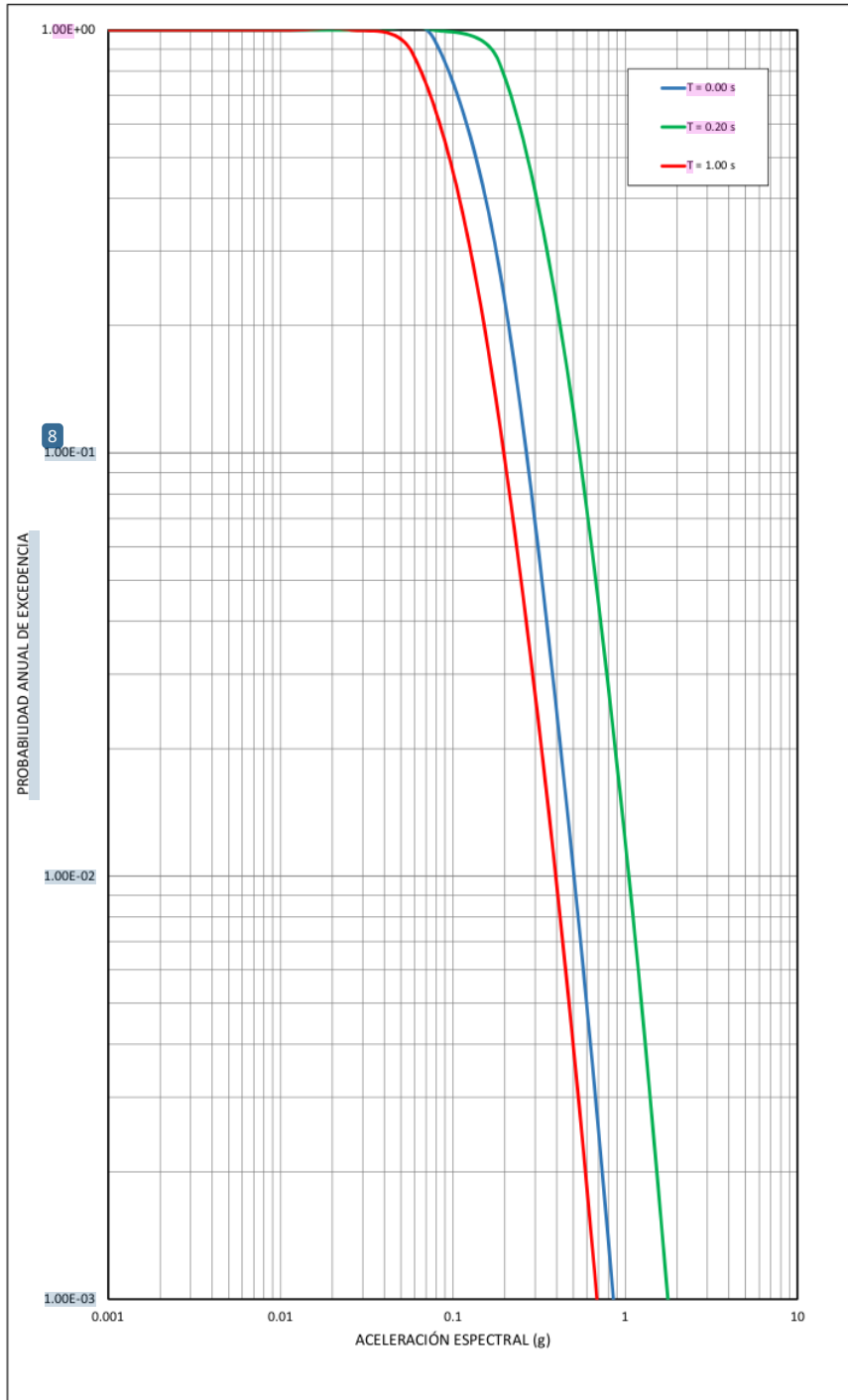
8

PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA

ACCELERACIÓN ESPECTRAL (g)

2

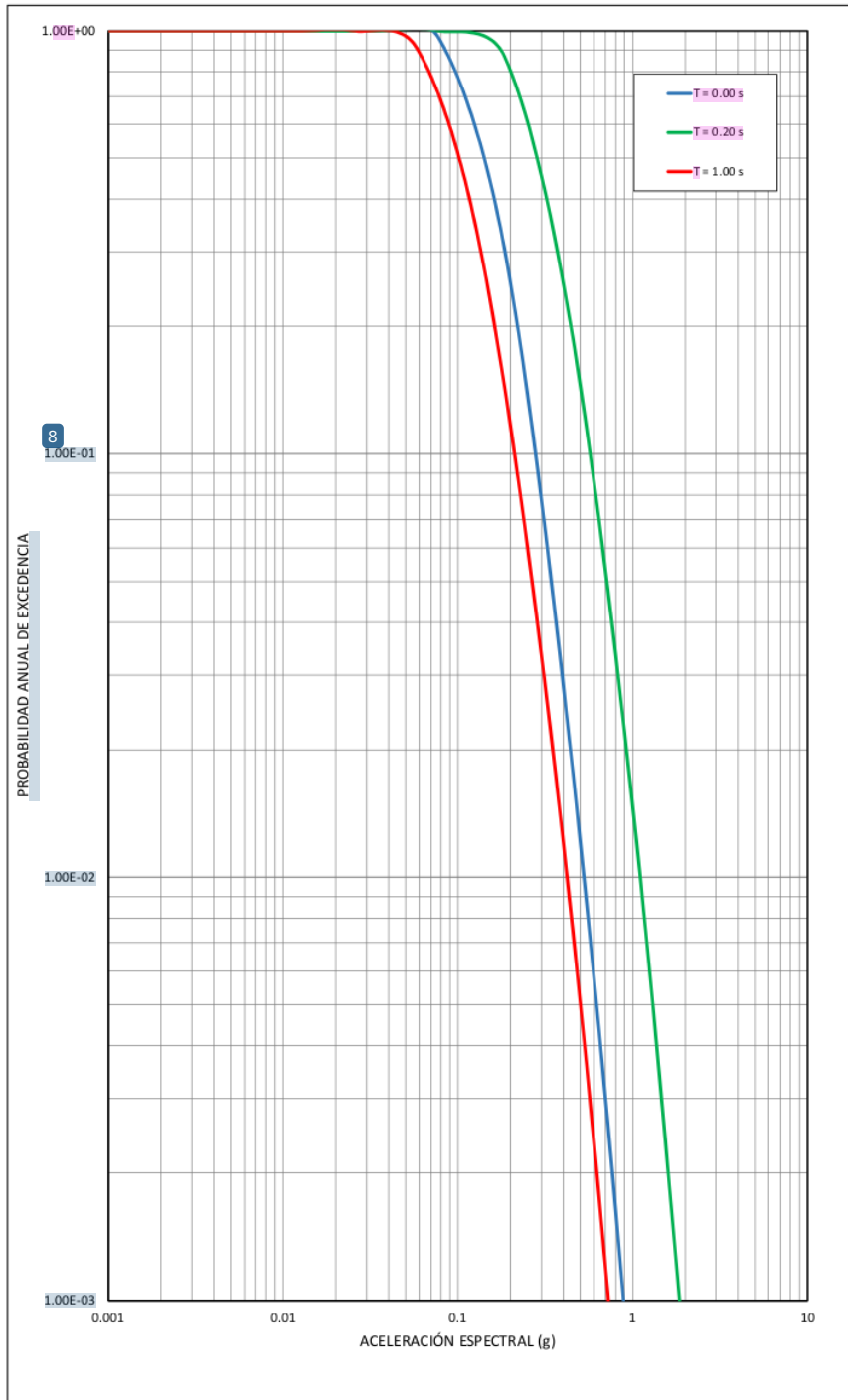
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: LÁMUD



3

2

CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: SAN NICOLÁS



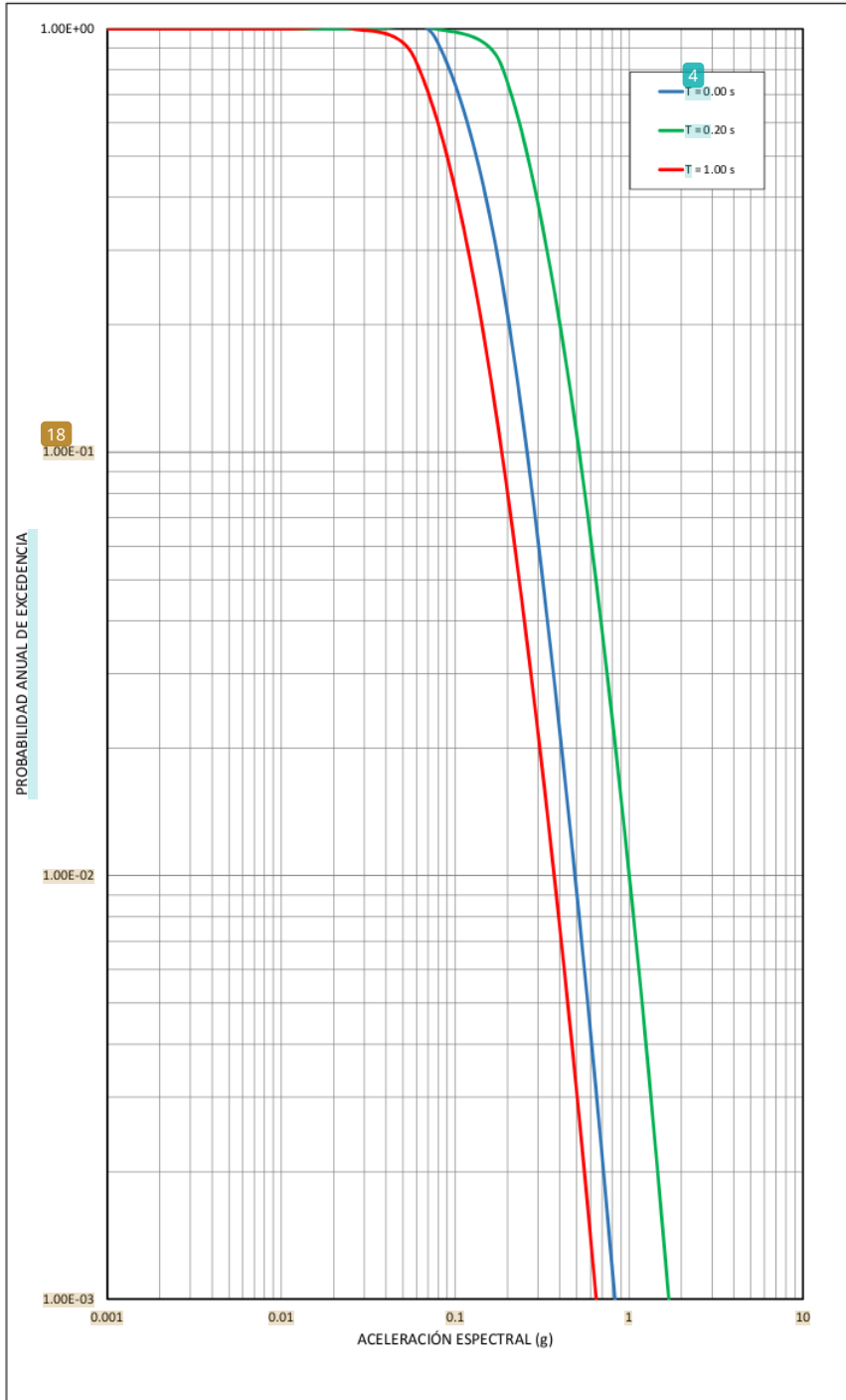
3

PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA

ACELERACIÓN ESPECTRAL (g)

2

CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: BAGUA GRANDE



18

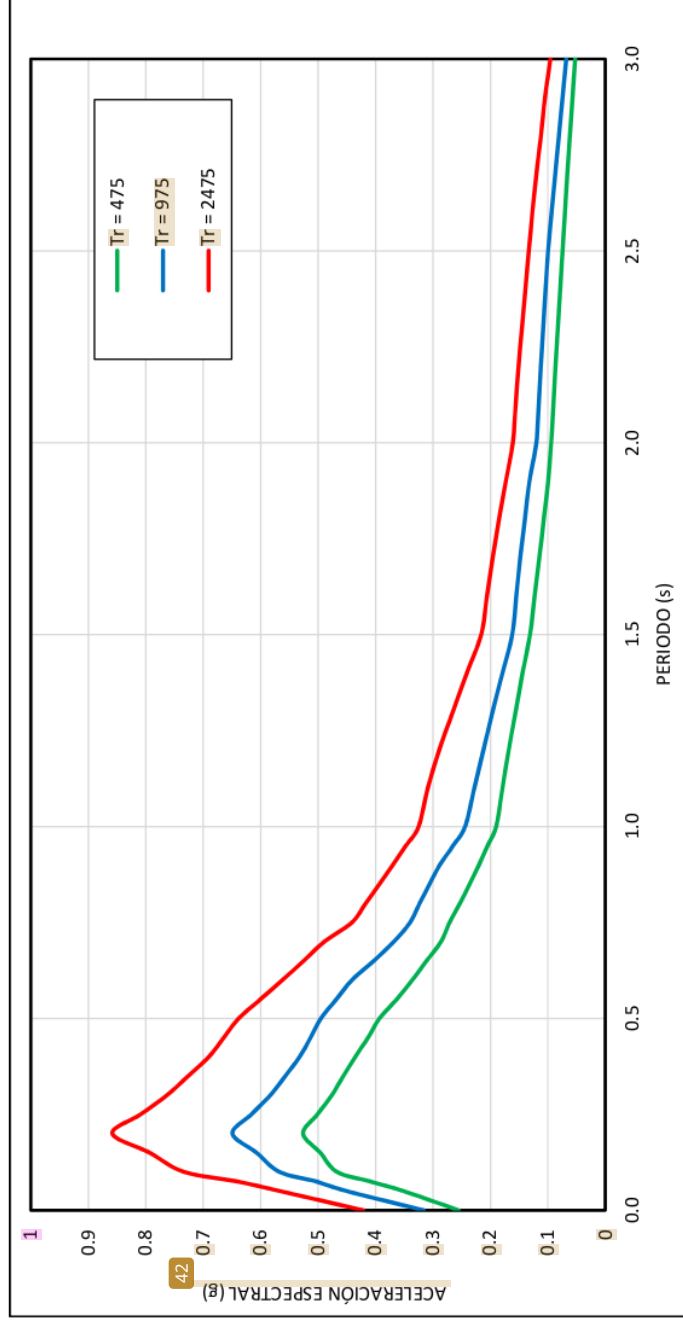
PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA

ACCELERACIÓN ESPECTRAL (g)

Anexo E: Espectros de peligro uniforme

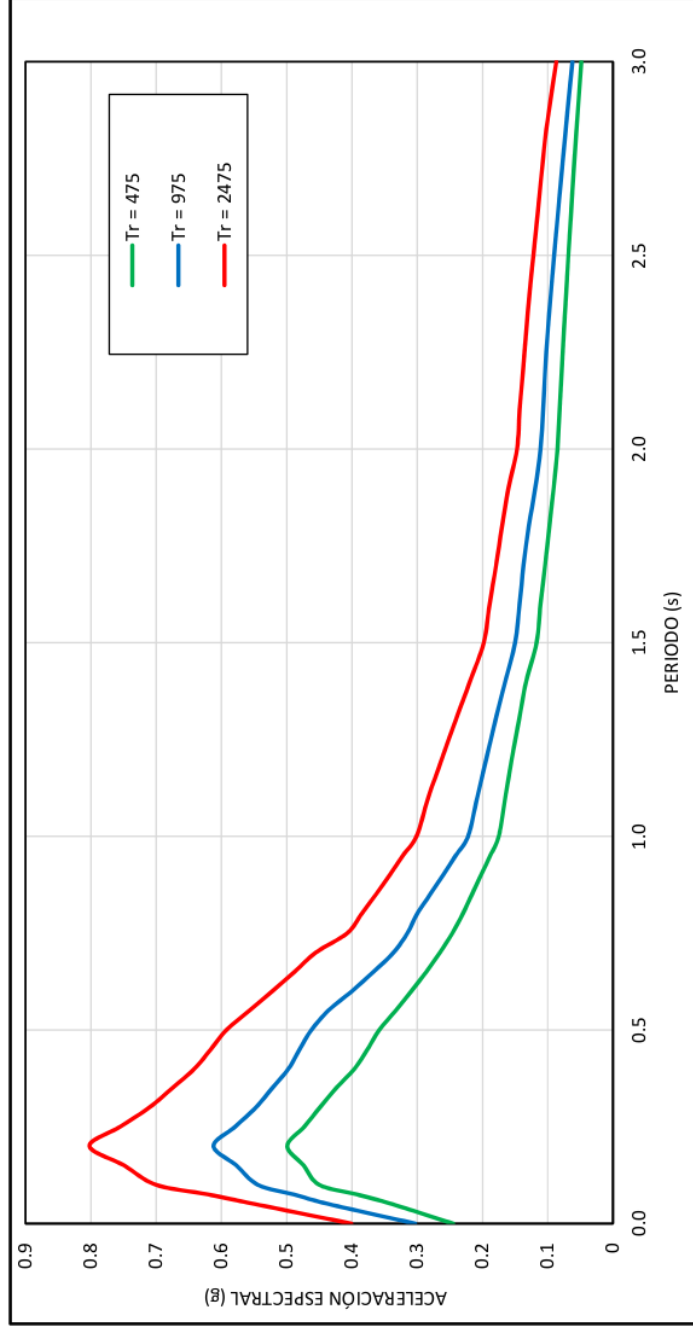
2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - CHACHAPOYAS

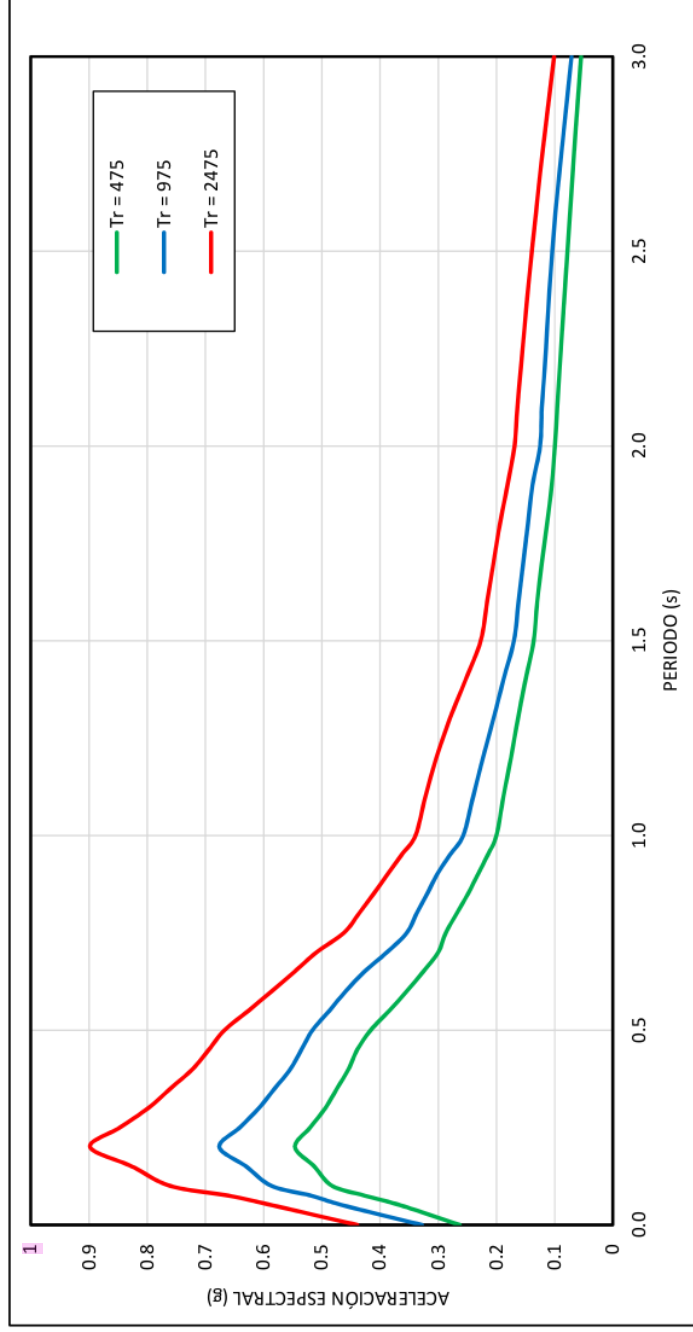


2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

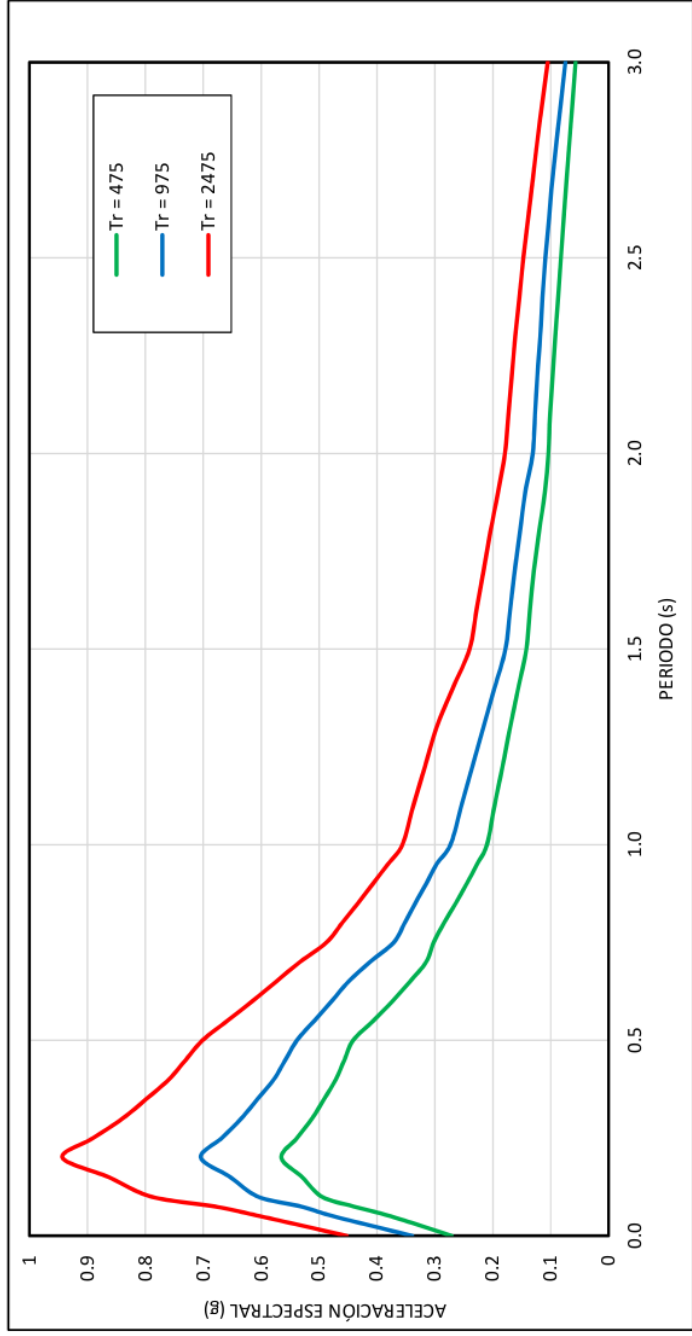
Tiempo de Exposición de 50 años - BAGUA



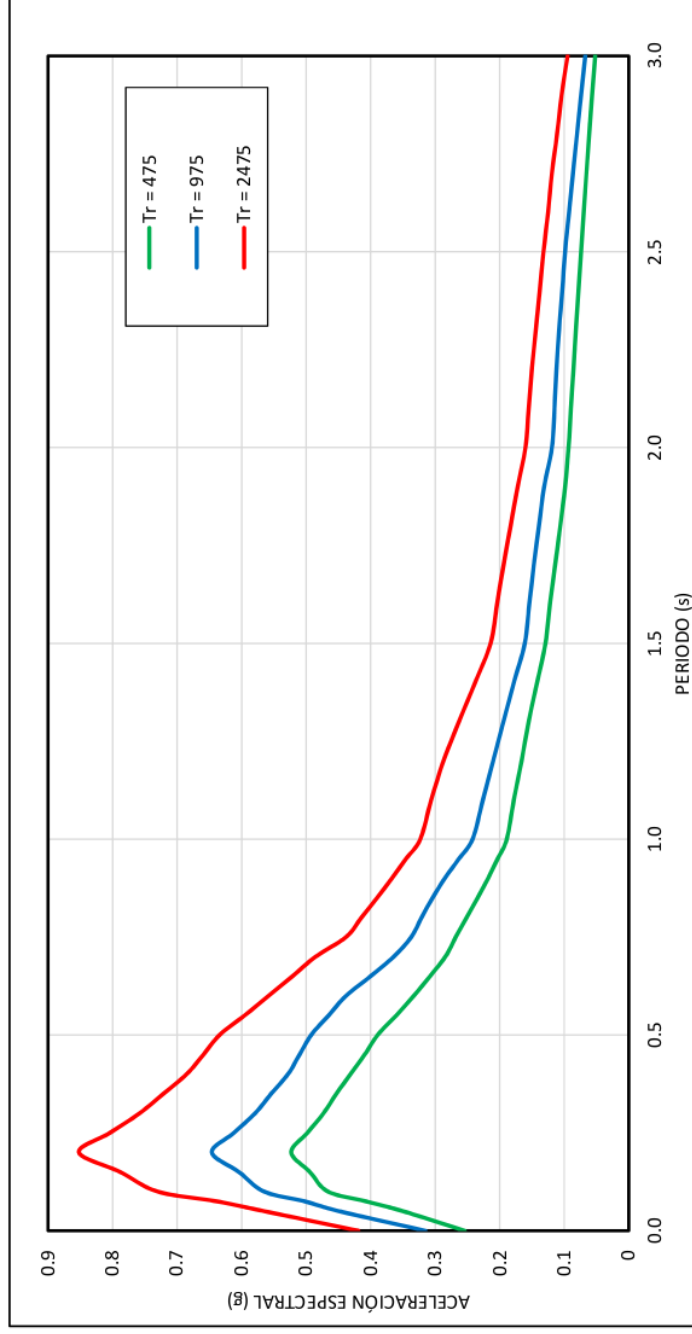
2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - JUMBILLA



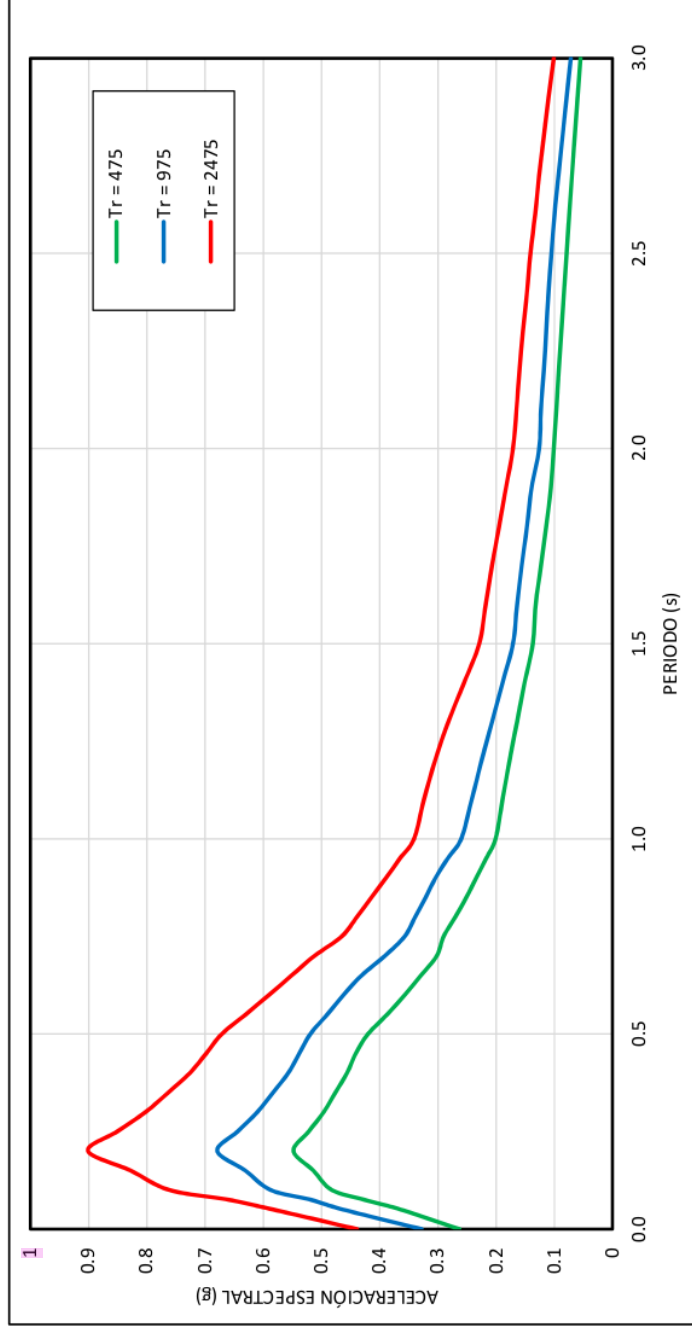
2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - SANTA MARÍA DE NIEVA



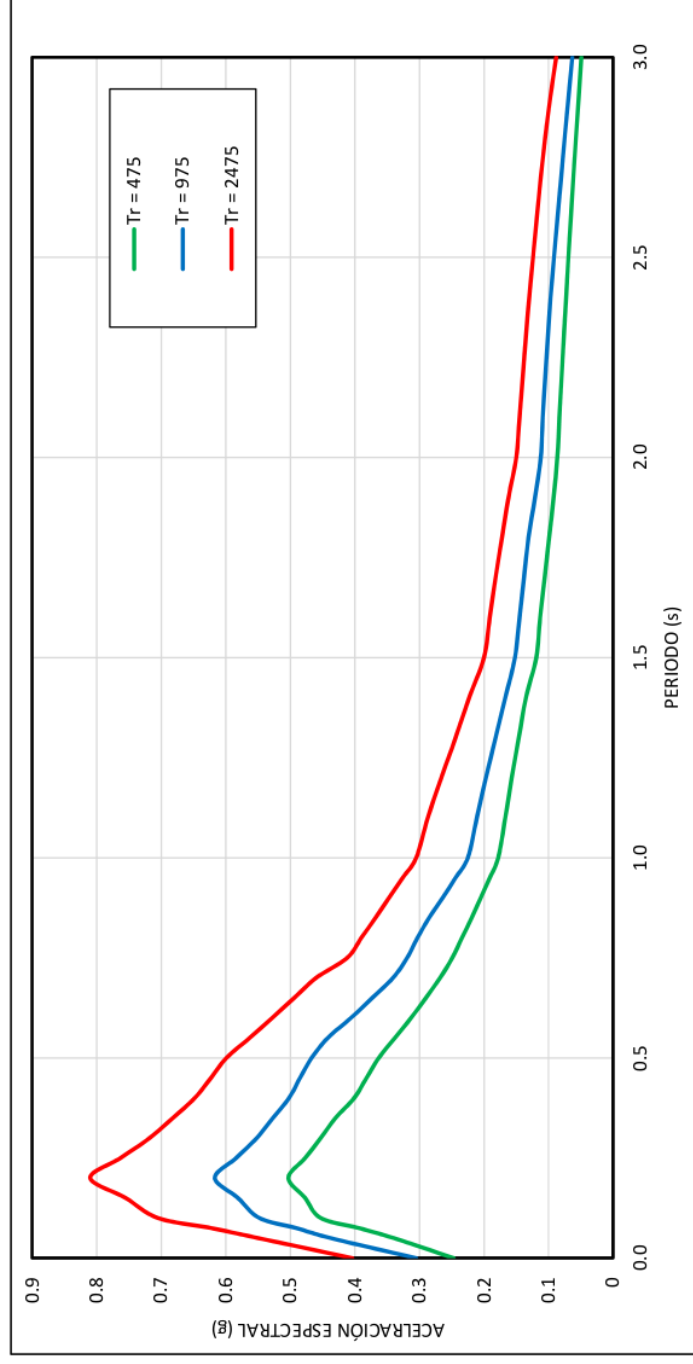
2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - LÁMUD



2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - SAN NICOLÁS

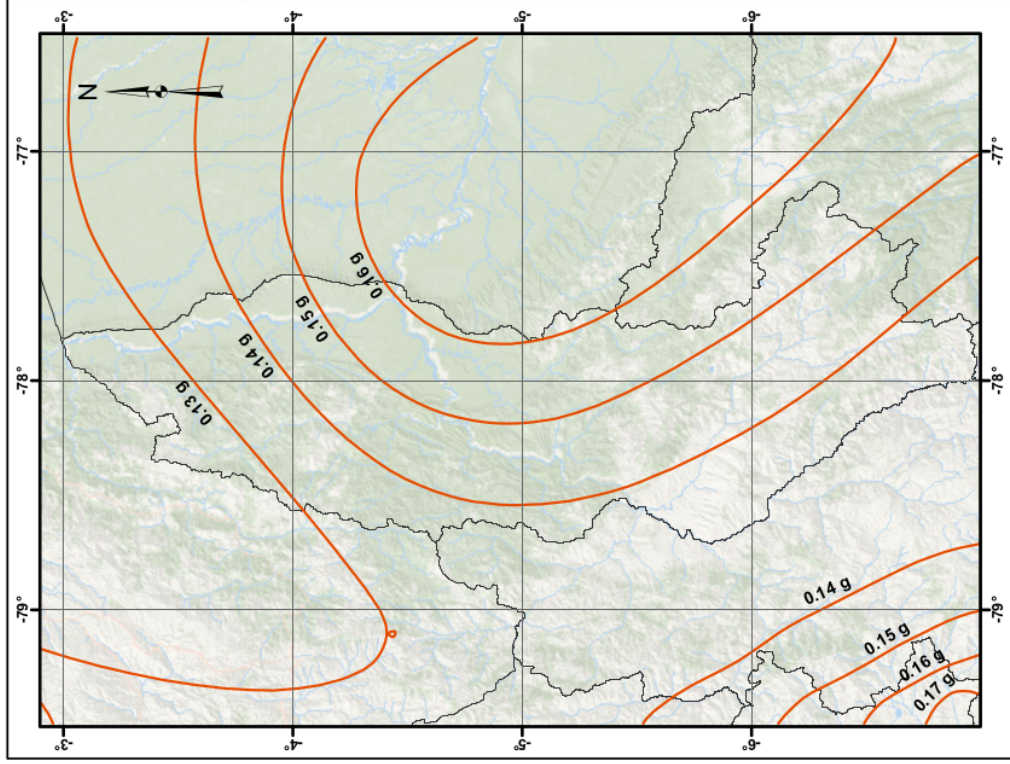


2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - BAGUA GRANDE



Anexo F: ¹ **Mapas de isoaceleraciones espectrales**

Anexo F.1: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 100$ años



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



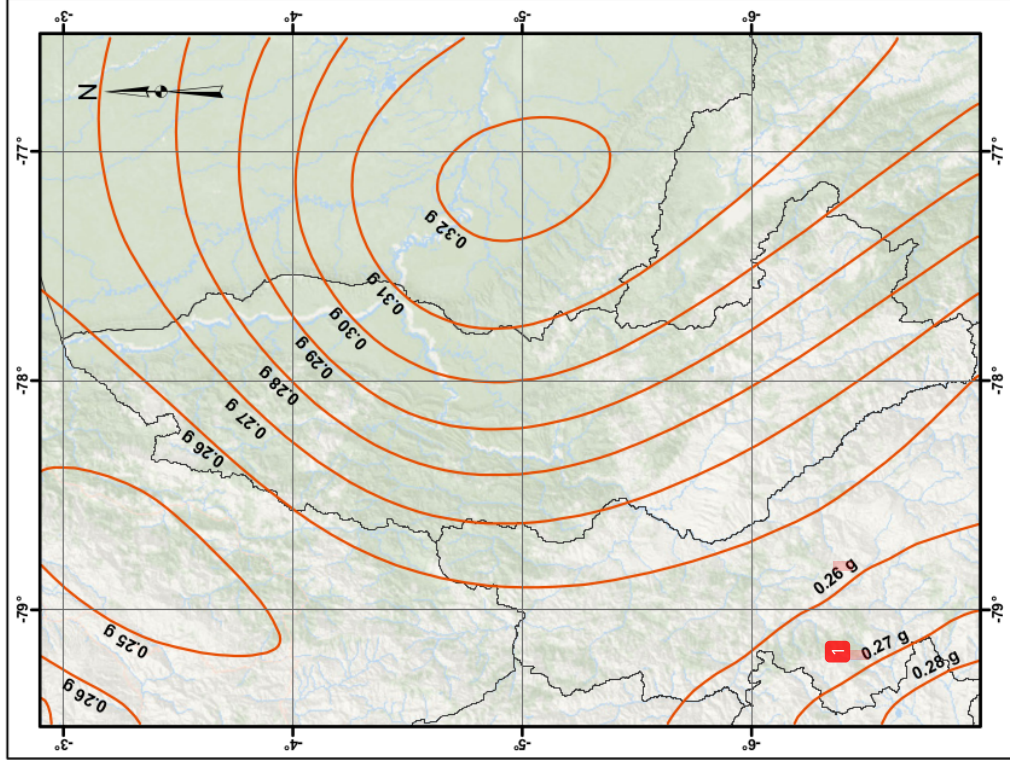
1
MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 0.00 \text{ s}$ (PGA)

Periodo de retorno $Tr = 100 \text{ años}$

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE ORTOGRAFAS DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	FORMATO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Eri, Wazir, Gueche Eri, Aburo, Uros	$T = 0.00 \text{ s}$ (PGA) $Tr = 100 \text{ AÑOS}$	FECHA: JULIO-2023 CODIGO M-04
TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ				



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



ZONA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



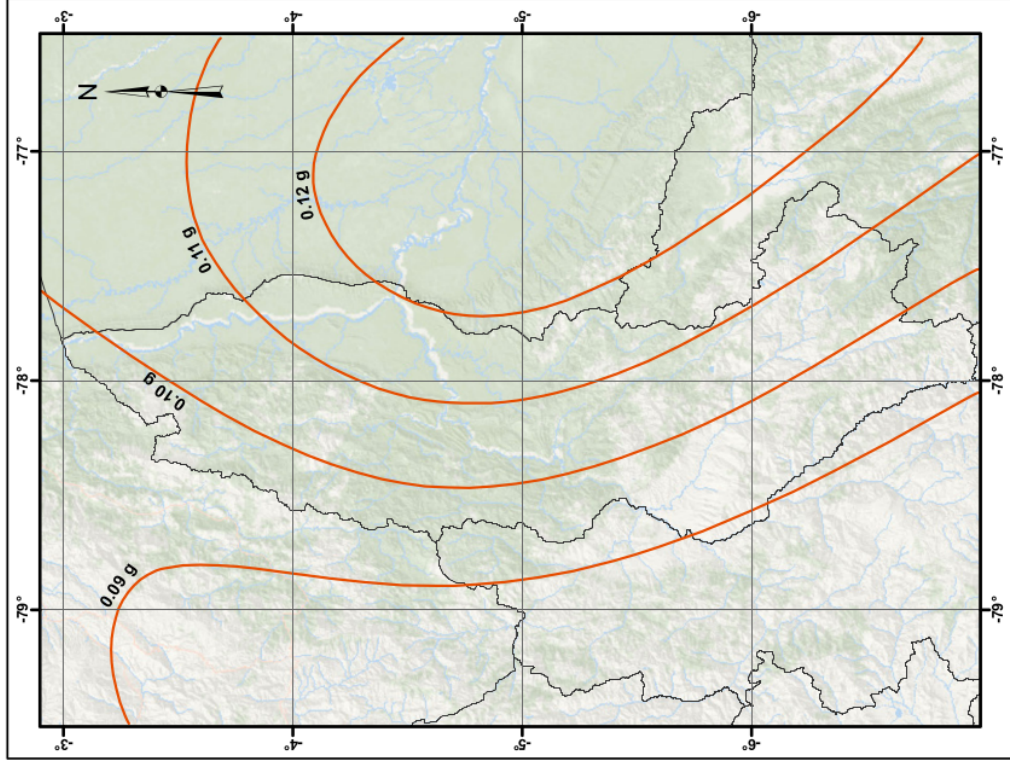
MAPA DE ISOACCELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)

1

Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$

Periodo de retorno $Tr = 100 \text{ años}$

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE ORTOGRAFÍAS DATUM WGS84 REFERENCIA: Est. Marz. Guáre Est. Morúa DE USOS	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 0.20 \text{ s}$ $Tr = 100 \text{ AÑOS}$	DISEÑO: A4 FECHA: JULIO-2023 CÓDIGO: M-05
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO				



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



MAPA DE ISOACCELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)

Periodo estructural $T = 1.00$ s

Periodo de retorno $Tr = 100$ años

ELABORADO POR:
Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS

NOTA:
SISTEMA DE COORDENADAS DE DATUM WGS84
REFERENCIA:
Eri, Wazir, Gueche
Eri, Mbov, Dos, Uroq

TESIS:
EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ

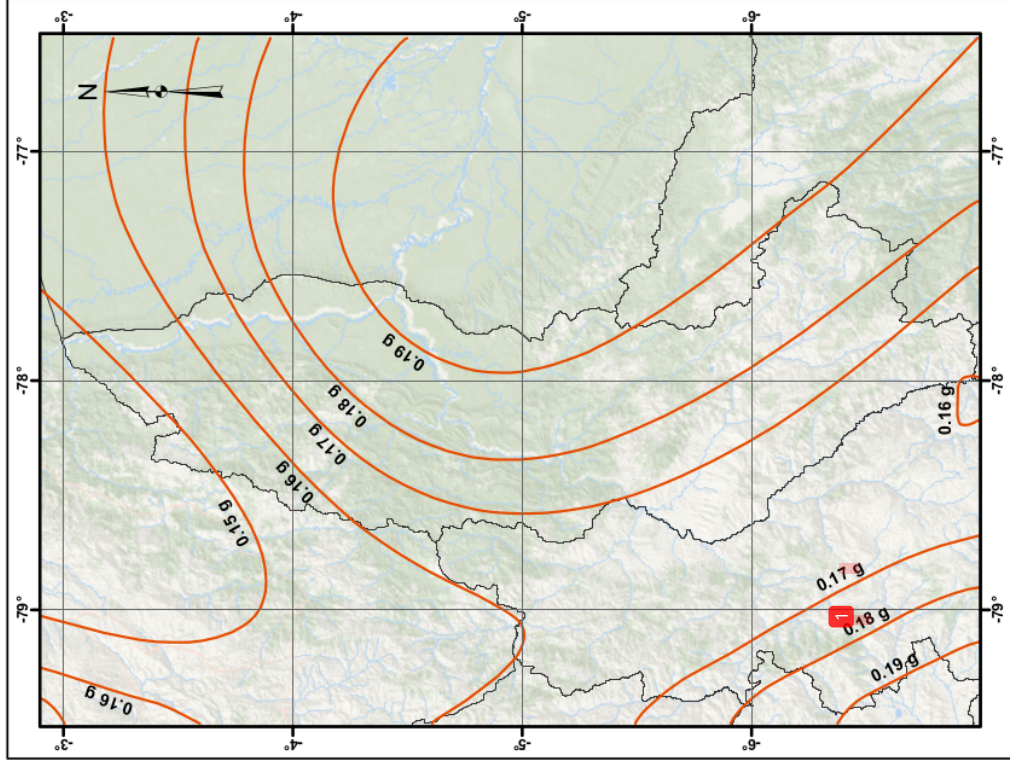
PLANO:
ISOACCELERACIONES
 $T = 1.00$ s
 $Tr = 100$ AÑOS

TEMA:
M-06

FECHA: JULIO-2023

CODIGO:

Anexo F.2: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 145$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

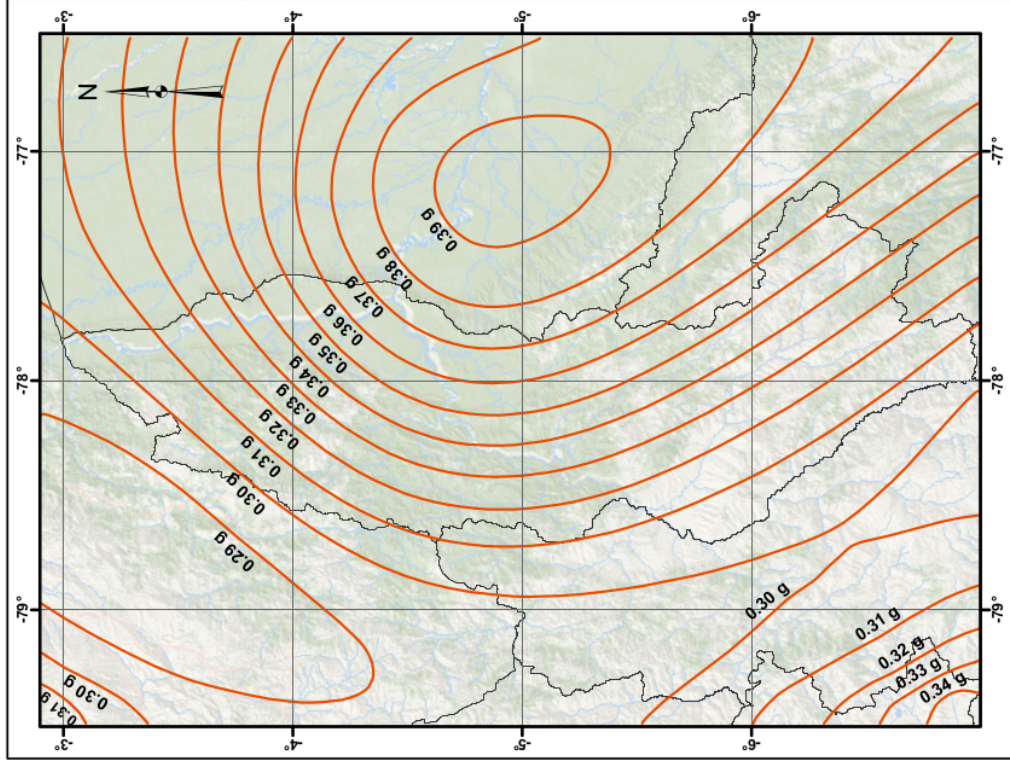


MAPA DE ISOACCELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)

Periodo estructural $T = 0.00$ s (PGA)

Periodo de retorno $Tr = 145$ años

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE DATUM WGS84 REFERENCIA: Esri, Mapbox, Google, Esri, Mapbox, Google, Esri, Mapbox, Google	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 0.00$ s (PGA) $Tr = 145$ AÑOS	IMAGEN: A4 FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-07
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ		



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



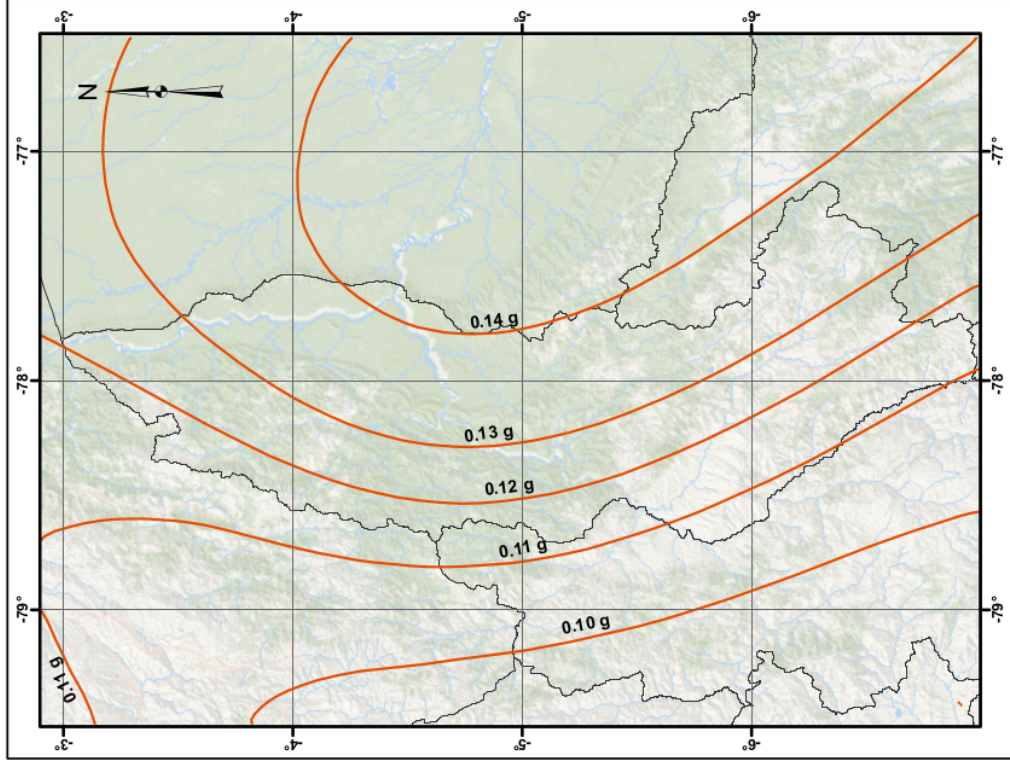
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)
Periodo estructural $T = 0.20$ s
Periodo de retorno $Tr = 145$ años

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUMS DATUM WGS84	TESIS:	PLANO:	IMAGEN:
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Est. WGS84, Geóide Est. AMÉRICA DEL SUR	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	ISOACCELERACIONES $T = 0.20$ s $Tr = 145$ AÑOS	A4
					FECHA: JULIO-2023 CÓDIGO: M-08



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



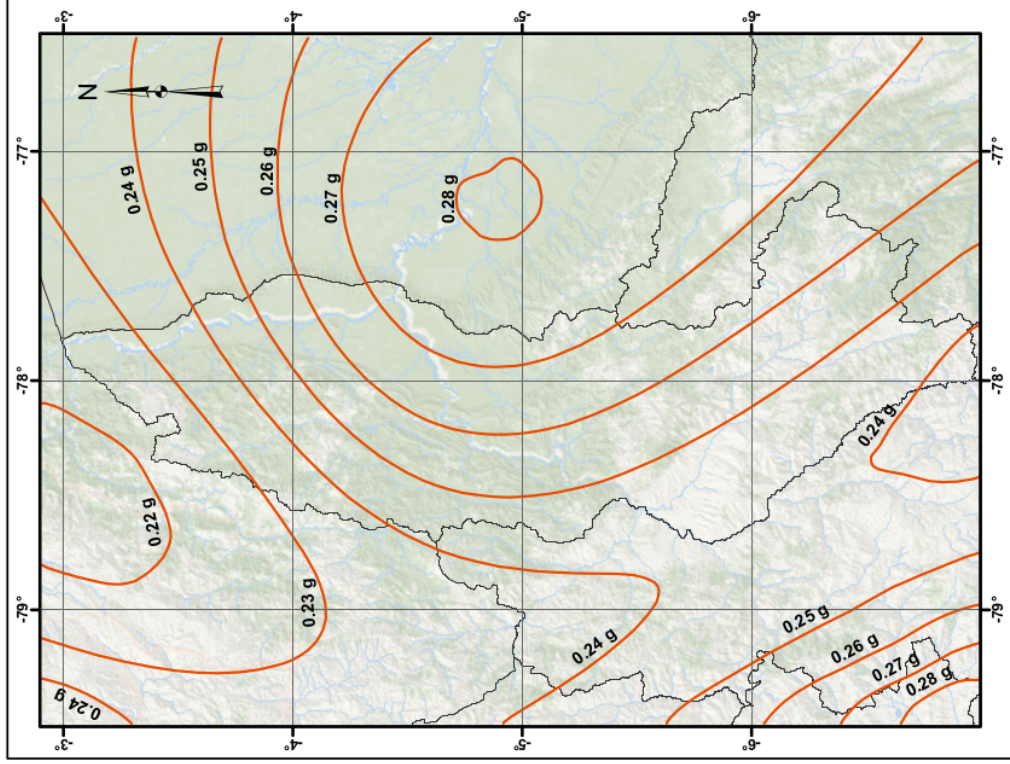
5
MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 1.00$ s
Periodo de retorno $Tr = 145$ años

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Eri, Wazir, Gueche Eri, Abant, UROS	$T = 1.00$ s $Tr = 145$ AÑOS	FECHA: JULIO-2023 CODIGO M-09
TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ				

Anexo F.3: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 475$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

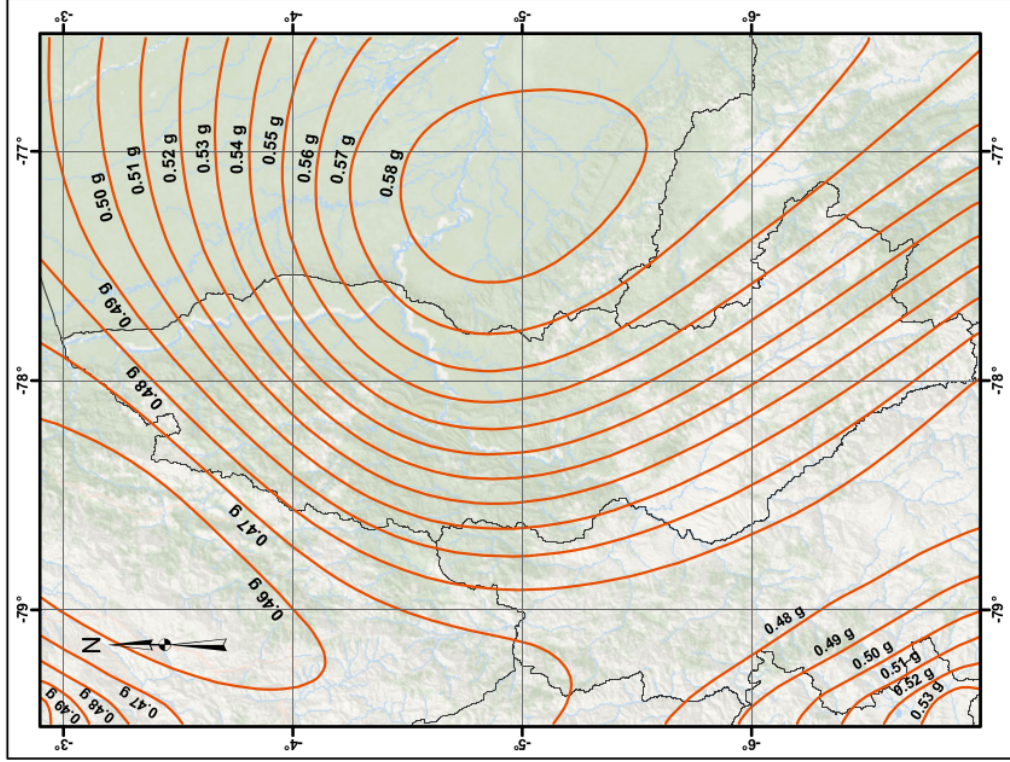


MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 0.00 \text{ s}$ (PGA)

Periodo de retorno $Tr = 475 \text{ años}$

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE ORTOGRAFAS DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Eri, Wazir, Ge@re Eri, Ab@v@D@S, USGS	$T = 0.00 \text{ s}$ (PGA) $Tr = 475 \text{ AÑOS}$	FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-10
		TE.SIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



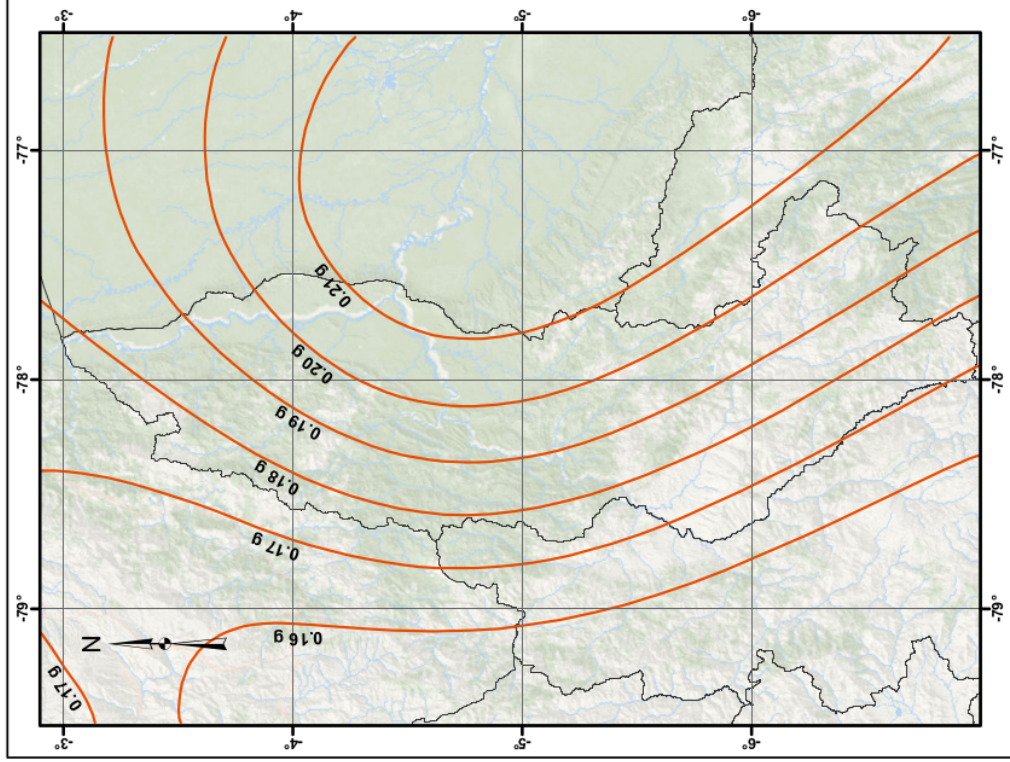
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



MAPA DE ISOACCELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)

Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$
Periodo de retorno $T_r = 475 \text{ años}$

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM WGS84 REFERENCIA: Est. Marz. Guáre Est. Marz. LOS	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 0.20 \text{ s}$ $T_r = 475 \text{ AÑOS}$	IMAGEN: A4 FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-11
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SISMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



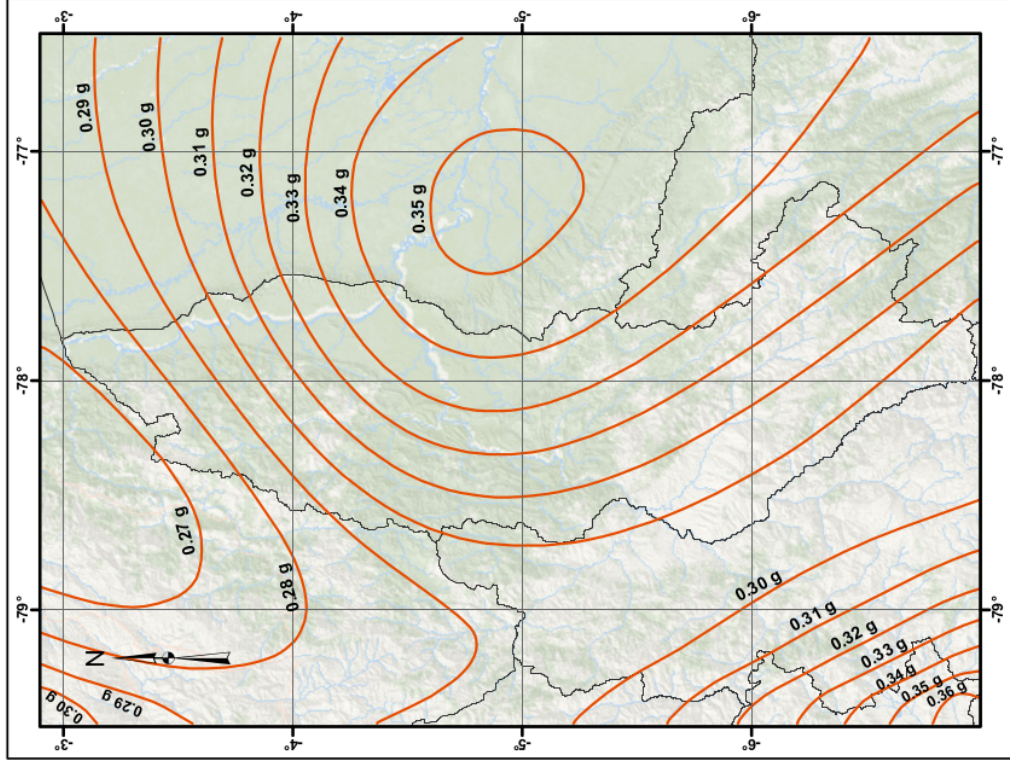
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



MAPA DE ISOACCELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)
Periodo estructural $T = 1.00 \text{ s}$
Periodo de retorno $Tr = 475 \text{ años}$

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM WGS84 REFERENCIA: Eri, Wazir, Guebe Eri, Aburid, UROS	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 1.00 \text{ s}$ $Tr = 475 \text{ AÑOS}$	IMPAÑO: A4 FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-12
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO				

Anexo F.4: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 975$ años



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



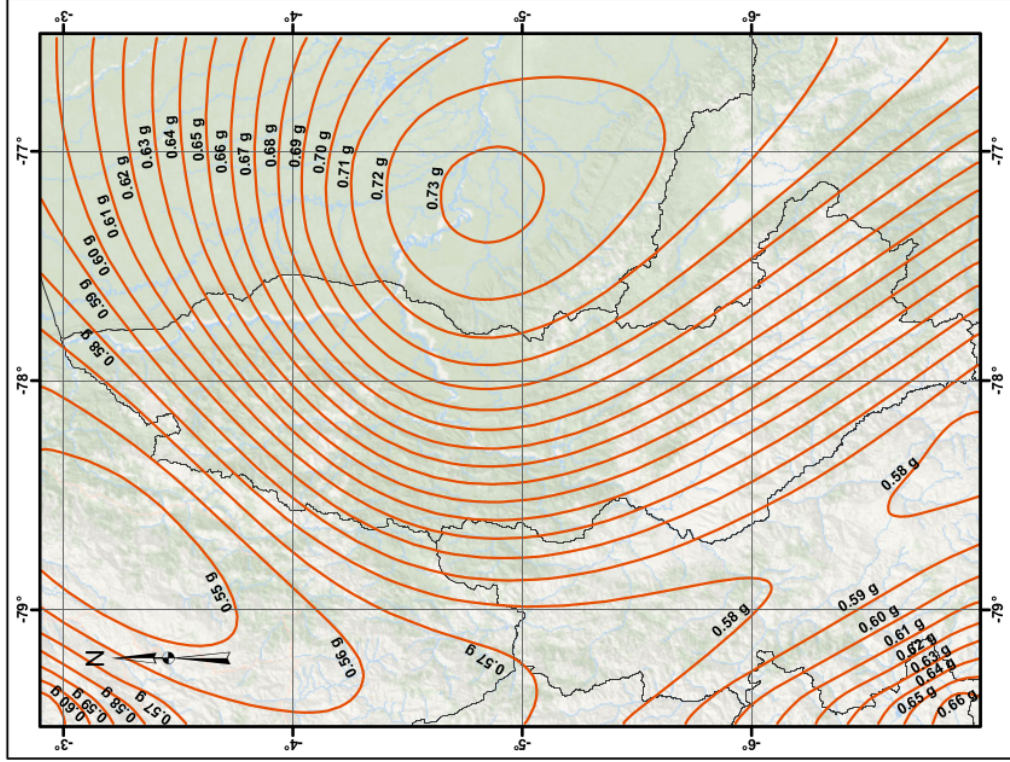
1
MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 0.00$ s (PGA)

Periodo de retorno $Tr = 975$ años

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS DE ORTOGRAFAS DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Eri, Wazir, Ge@re Eri, Ab@r, Dos, U@gs	$T = 0.00$ s (PGA) $Tr = 975$ AÑOS	FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-13
		TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

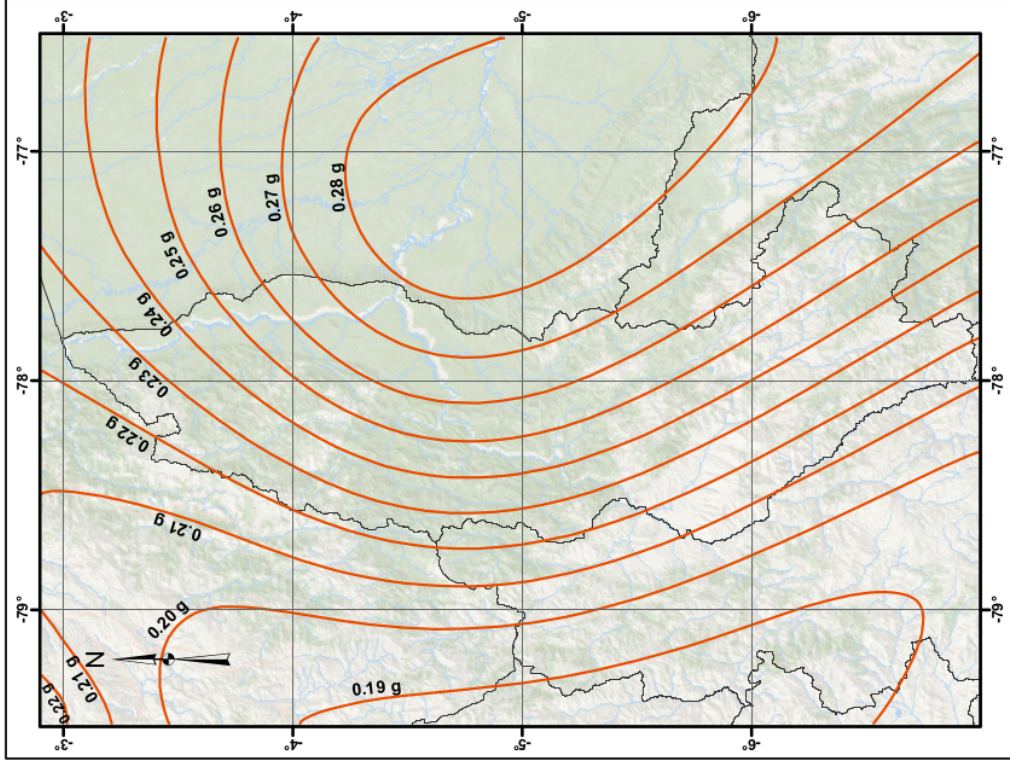


**MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)**

Periodo estructural $T = 0.20$ s

Periodo de retorno $T_r = 975$ años

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUMS DATUM WGS84 REFERENCIA: Eri, Wazir, Gae8e Eri, Mvzr, DOL, USGS	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 0.20$ s $T_r = 975$ AÑOS	IMAGEN: A4 FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-14
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SISMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

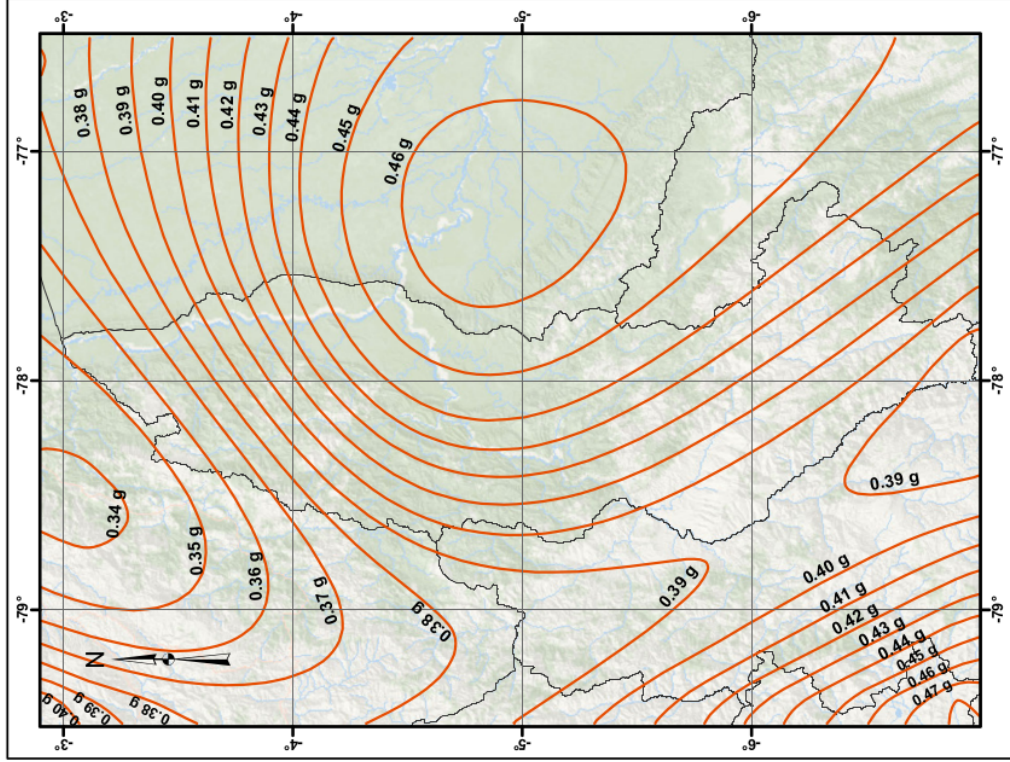


MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 1.00$ s
Periodo de retorno $Tr = 975$ años

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Eri, Wgs84, Gcs84 Eri, Wgs84, UTM	$T = 1.00$ s $Tr = 975$ AÑOS	FECHA: JULIO-2023 CODIGO M-15
TE.SIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ				

Anexo F.5: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 2475$ años



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



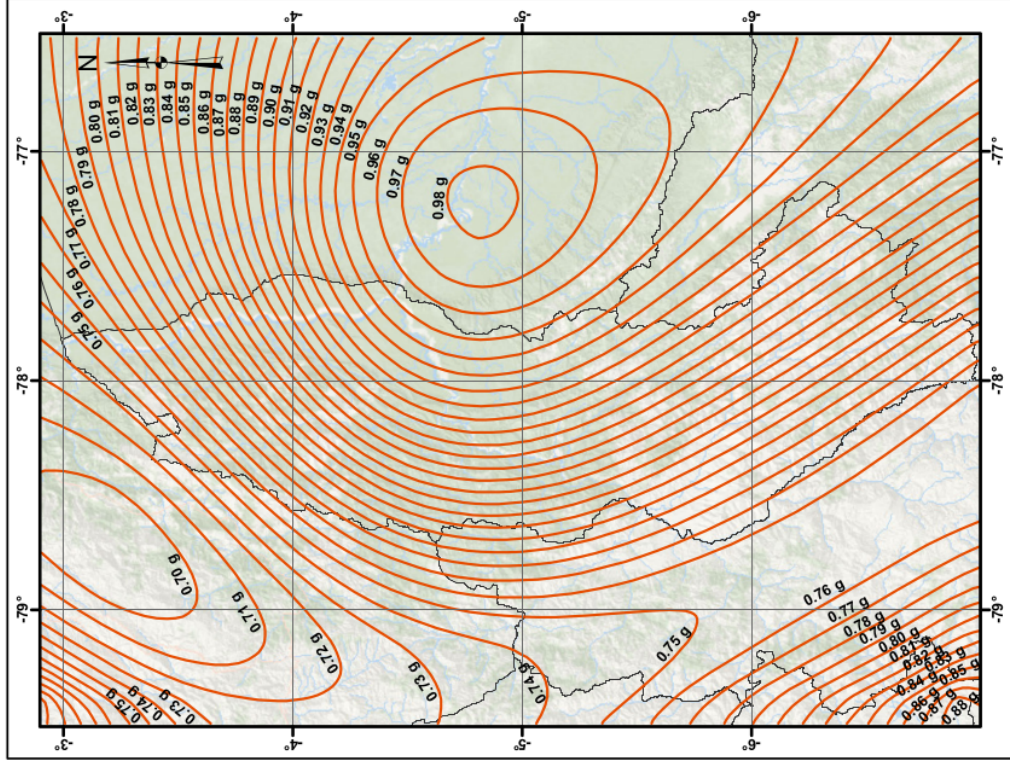
26
MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

6
Periodo estructural $T = 0.00 \text{ s}$ (PGA)

Periodo de retorno $Tr = 2475 \text{ años}$

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Est. Marz, Geógr Est. Mérida, UGOS	$T = 0.00 \text{ s}$ (PGA) $Tr = 2475 \text{ AÑOS}$	FECHA: JULIO-2023 CODIGO M-16
TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SISMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ				



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



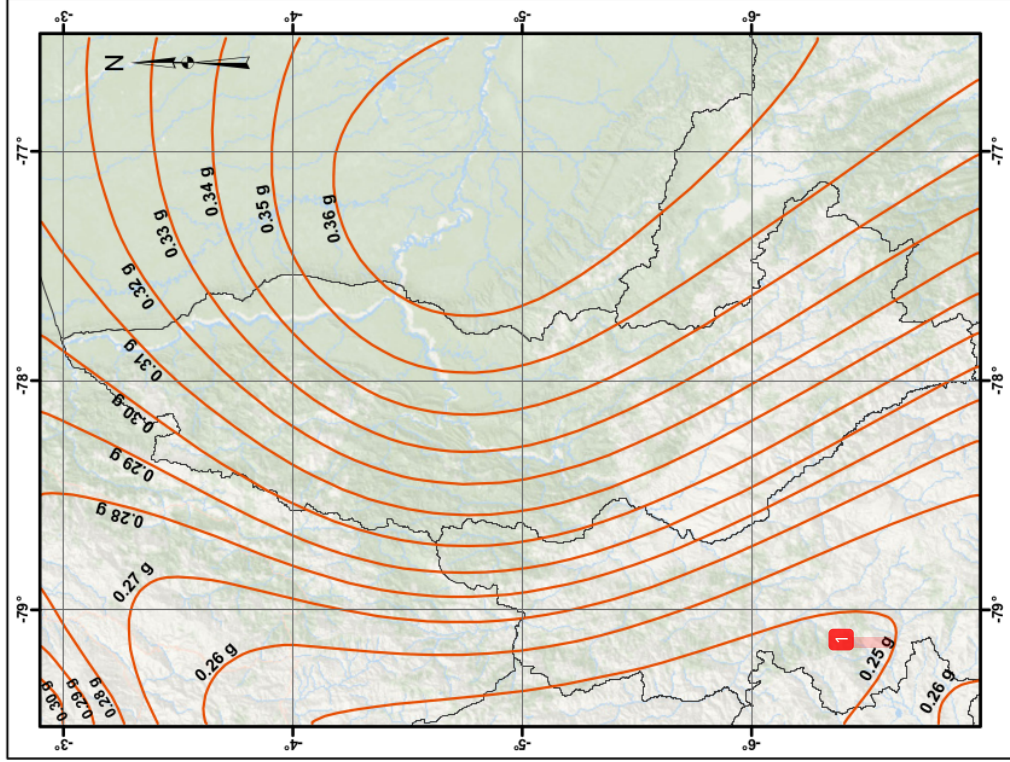
**MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)**

Periodo estructural $T = 0.20$ s

Periodo de retorno $Tr = 2475$ años

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUMS DATUM WGS84 REFERENCIA: Eri, Wazir, Gae8e Eri, Mvz, Dos, UGOS	PLANO: ISOACCELERACIONES $T = 0.20$ s $Tr = 2475$ AÑOS	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	FECHA: JULIO-2023 CODIGO M-17	



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



MAPA DE ISOACCELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)

Periodo estructural $T = 1.00$ s

Periodo de retorno $Tr = 2475$ años

PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMAS DE COORDENADAS DE DATUM DATUM WGS84	PLANO: ISOACCELERACIONES	IMAGEN: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Est. Marz. Geógr. Est. Mérid. USGS	$T = 1.00$ s $Tr = 2475$ AÑOS	FECHA: JULIO-2023 CODIGO: M-18
TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SISMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ				

EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

vsip.info

Fuente de Internet

3%

2

repositorio.igp.gob.pe

Fuente de Internet

3%

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%

4

oa.upm.es

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

1%

6

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

1%

7

tesis.pucp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

8

www.bcie.org

Fuente de Internet

1%

9

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

10

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

11

repositorio.untrm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

12

eudora.vivienda.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

13

dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

14

www.cbd.int

Fuente de Internet

<1 %

15

repositorio.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

16

pdfcoffee.com

Fuente de Internet

<1 %

17

Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

18

etheses.whiterose.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

19

Mendo Rodriguez, Arnold Ramsey. "Bases para la implementacion de la norma peruana de analisis y diseno de edificios con aislacion

<1 %

sismica.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

20

recordcenter.sgc.gov.co

Fuente de Internet

<1 %

21

sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

22

docplayer.es

Fuente de Internet

<1 %

23

www.scielo.org.mx

Fuente de Internet

<1 %

24

www.eltiempo.com

Fuente de Internet

<1 %

25

cloud-storage.globalquakemodel.org

Fuente de Internet

<1 %

26

1library.co

Fuente de Internet

<1 %

27

Ruiz Esquivel, Jose Oscar. "Estimacion de perdidas por sismos mediante funciones de fragilidad analiticas: caso de dos pabellones universitarios del Cusco.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

<1 %

28

upcommons.upc.edu

Fuente de Internet

<1 %

29 Submitted to Indian Institute of Technology Guwahati <1 %
Trabajo del estudiante

30 worldwidescience.org <1 %
Fuente de Internet

31 sigrid.cenepred.gob.pe <1 %
Fuente de Internet

32 ia903106.us.archive.org <1 %
Fuente de Internet

33 repositorio.uchile.cl <1 %
Fuente de Internet

34 repositorio.ucv.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

35 americanae.aacid.es <1 %
Fuente de Internet

36 dspace.igme.es <1 %
Fuente de Internet

37 Submitted to IIT Delhi <1 %
Trabajo del estudiante

38 cnnespanol.cnn.com <1 %
Fuente de Internet

39 patents.google.com <1 %
Fuente de Internet

40 Submitted to University of Birmingham

<1 %

41

repositorio.unasam.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

42

zaloamati.azc.uam.mx

Fuente de Internet

<1 %

43

Goda, Katsuichiro. "Assessment of seismic hazard and risk, and decision-making under uncertainty", Proquest, 20111003

Publicación

<1 %

44

Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

<1 %

45

repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

46

cyberleninka.org

Fuente de Internet

<1 %

47

diariooficial.gob.mx

Fuente de Internet

<1 %

48

faculty.ksu.edu.sa

Fuente de Internet

<1 %

49

repositorio.unican.es

Fuente de Internet

<1 %

50

www.uzknastu.ru

Fuente de Internet

<1 %

51 Hernando Tavera. "Ground motions observed during the 15 August 2007 Pisco, Peru, earthquake", Bulletin of Earthquake Engineering, 02/2009 $<1\%$
Publicación

52 Vargas Bejarano, Cesar Isidoro. "Evaluacion del desempeno sismico de puentes continuos.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 $<1\%$
Publicación

53 academic.uprm.edu $<1\%$
Fuente de Internet

54 core.ac.uk $<1\%$
Fuente de Internet

55 repositorio.ingemmet.gob.pe $<1\%$
Fuente de Internet

56 ruja.ujaen.es $<1\%$
Fuente de Internet

57 ultimosismo.igp.gob.pe $<1\%$
Fuente de Internet

58 www.gdacs.org $<1\%$
Fuente de Internet

59 www.investigarmqr.com $<1\%$
Fuente de Internet

60 www.revistaviajeros.com $<1\%$
Fuente de Internet

61	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
62	revistas.uis.edu.co Fuente de Internet	<1 %
63	www.cigna.com Fuente de Internet	<1 %
64	www.scielo.org.pe Fuente de Internet	<1 %
65	Ana Elena Posada Sánchez, Edgar Iram Villagrán Arroyo, Juan Pablo Hidalgo Toxqui. "Adecuación de la ley de Gutenberg–Richter al contexto mexicano", Revista Digital Universitaria, 2020 Publicación	<1 %
66	GEOLAB S.R.LTDA. "EIA Preliminar del Proyecto Reparación de la Plataforma Corvina CX-11, Reacondicionamiento y Pruebas del Pozo CX11-16X - Lote Z-1-IGA0007034", R.D. N° 198-2005-MEM/AAE, 2020 Publicación	<1 %
67	Rios Leon, Julio Rolando. "Evaluacion del comportamiento dinamico del suelo en Lima y Callao utilizando el metodo del cociente espectral h/v.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020 Publicación	<1 %

68

cuartobasicoprofesorakarla.blogspot.com

Fuente de Internet

<1 %

69

docplayer.cz

Fuente de Internet

<1 %

70

idus.us.es

Fuente de Internet

<1 %

71

repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080

Fuente de Internet

<1 %

72

repositorio.uc.cl

Fuente de Internet

<1 %

73

repositorio.unan.edu.ni

Fuente de Internet

<1 %

74

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

75

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

76

repositorio.usm.cl

Fuente de Internet

<1 %

77

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

78

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

79

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

80

Bolanos Luna, Ana Malena. "Espectros de peligro sismico uniforme.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

<1 %

81

Zanelli Flores, Criss Talita. "Evaluacion de Vulnerabilidad Sismica de Pircas Mediante Modelacion Numerica en Elementos Discretos: Aplicacion II Caso de las Pircas en Carabayllo, Lima.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

<1 %

82

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

83

repositorio-aberto.up.pt

Fuente de Internet

<1 %

84

repositorio.upao.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

85

A. G. Rodríguez-Lomelí, J. García-Mayordomo. "Seismic hazard at a triple plate junction: the state of Chiapas (México)", Natural Hazards, 2019

Publicación

<1 %

86

David M. Boore, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, Gail M. Atkinson. "NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5%

<1 %

Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes", Earthquake Spectra, 2020

Publicación

87

Encyclopedia of Earthquake Engineering, 2015.

Publicación

<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo