

**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**

Autor: Bach. Miguel Angel Rivera Rojas

Asesor: Ing. Daniel Villa Abanto

Registro: _____

CHACHAPOYAS - PERÚ

2024

Dedicatoria

*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 a 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.

**Autoridades de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de
Mendoza de Amazonas**

Ph. D. JORGE LUIS MAICELO QUINTANA
Rector

Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES
Vicerrector Académico

Dra. MARÍA NELLY LUJÁN ESPINOZA
Vicerrectora de Investigación

Ph. D. RICARDO EDMUNDO CAMPOS RAMOS
Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Visto Bueno del Asesor de la Tesis



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (X), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada _____

Evaluación Probabilística del Peligro Sísmico de la Región Amazonas, Perú

del egresado Miguel Angel Rivera Rojas

de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.



Chachapoyas, 01 de Febrero de 2024

Firma y nombre completo del Asesor

DANIEL VILVA ABANTO.

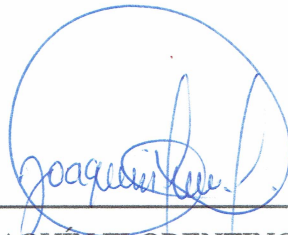
Jurado Evaluador de la Tesis



Ing. CARLOS ALBERTO CHÁVEZ CULQUIMBOZ
Presidente



Arq. JOSÉ LUIS FLORES BRUNO
Secretario



Ing. JOAQUÍN FLORENTINO FACUNDO FRÍAS
Vocal

Constancia de Originalidad de la Tesis



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Evaluación Probabilística del Peligro Sísmico de la Región Amazonas, Perú

presentada por el estudiante ()/egresado (x) Miguel Angel Rivera Rojas

de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil

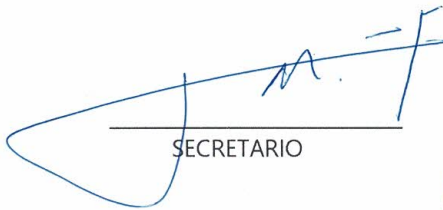
con correo electrónico institucional 7436044771@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- La citada Tesis tiene 23 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (x) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 15 de Marzo del 2024


SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

.....
.....

Reporte de Turnitin


EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	22%	10%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	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	


Carlos Alberto Chávez Colquimboz
PRESIDENTE

Acta de Sustentación de la Tesis



ANEXO 3-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 12 de abril del año 2024 siendo las 17:00 horas, el aspirante: BACH. RIVERA ROJAS MIGUEL ANGEL, asesorado por ING. DANIEL VILVA ABANTO defiende en sesión pública presencial () / a distancia () la Tesis titulada: "EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ", para obtener el Título Profesional de INGENIERO CIVIL, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: ING. CARLOS ALBERTO CHÁVEZ QUQUIMBOZ.

Secretario: ABO. JOSÉ LUIS FLORES BRUNO.

Vocal: ING. JOAQUÍN FLORENTINO FAUNDOERIAS.

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.



Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 18:00 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
VOCAL

[Signature]
PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Autoridades de la UNTRM	iv
Visto Bueno del Asesor de la Tesis	v
Jurado Evaluador de la Tesis	vi
Constancia de Originalidad de la Tesis	vii
Reporte de Turnitin	viii
Acta de Sustentación de la Tesis	x
Índice	xii
Índice de tablas	xiii
Índice de figuras	xiv
Resumen	xv
Abstract	xvi
I. Introducción	16
II. Materiales y Métodos	18
2.1. Región de interés	18
2.2. Catálogo sísmico	20
2.3. Identificación de fuentes sísmicas	24
2.4. Determinación de los parámetros de sismicidad	31
2.5. Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo	34
2.5.1. Ecuación de Youngs et al. (1997)	34
2.5.2. Ecuación de Sadigh et al. (1997)	35
2.6. Construcción de las curvas de peligro sísmico	35
2.7. Determinación del peligro sísmico en el programa CRISIS	36

III. Resultados	37
3.1. Curvas de peligro sísmico	37
3.2. Espectro de peligro uniforme	38
3.3. Mapas de peligro sísmico	39
IV. Discusión	42
V. Conclusiones	44
VI. Recomendaciones	46
VII. Referencias bibliográficas	49
Anexos	50
Anexo A: Mapa de ubicación del proyecto	50
Anexo B: Fuentes sismogénicas	52
Anexo C: Eventos sísmicos magnitud de momento (Mw)	54
Anexo D: Curvas de probabilidad anual de excedencia	56
Anexo E: Espectros de peligro uniforme	64
Anexo F: Mapas de isoaceleraciones espectrales	72
Anexo F.1: Isoaceleraciones espectrales Tr = 100 años	72
Anexo F.2: Isoaceleraciones espectrales Tr = 145 años	76
Anexo F.3: Isoaceleraciones espectrales Tr = 475 años	80
Anexo F.4: Isoaceleraciones espectrales Tr = 975 años	84
Anexo F.5: Isoaceleraciones espectrales Tr = 2475 años	88

Índice de tablas

1.	Año de inicio de integridad por rangos de magnitud	21
2.	Información geográfica de las fuentes de interfase, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	24
3.	Información geográfica de las fuentes de intraplaca, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	25
4.	Información geográfica de las fuentes continentales, tomado de Aguilar <i>et al.</i> (2017)	27
5.	Parámetros sísmicos necesarios para la evaluación del peligro, indicados para cada una de las fuentes	33
6.	Resumen de aceleraciones obtenidas del análisis probabilístico del peligro sísmico para los siete puntos de control	39
7.	Comparación de los valores de PGA para cada punto de control obtenidos en el presente estudio, y los obtenidos en otras investigaciones	43

Índice de figuras

1.	Región de interés para el presente estudio	19
2.	Algunos sismos fuertes que afectaron la región de interés en los últimos 30 años	19
3.	Distribución espacial de los sismos del catálogo	22
4.	Distribución temporal de los sismos del catálogo	23
5.	Análisis de integridad del catálogo	23
6.	Fuentes sísmicas de tipo área para el proceso de subducción	29
7.	Fuentes sísmicas de tipo área continentales	30
8.	Distribución Magnitud-Frecuencia para la fuente F-2, el punto de inflexión viene a ser la M_{min}	32
9.	Distribución del número de sismos encontrados en la fuente F-2 por magnitud	32
10.	Recta de ajuste por máxima verosimilitud para la fuente F-2	33
11.	Curva de peligro sísmico expresado en probabilidad de excedencia anual vs. aceleración espectral	37
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	38
13.	Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 475 años	40
14.	Mapa de isoaceleraciones (PGA) de la región de interés para un periodo de retorno de 2475 años	41

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 $333 \text{ km} \times 456 \text{ km}$ (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

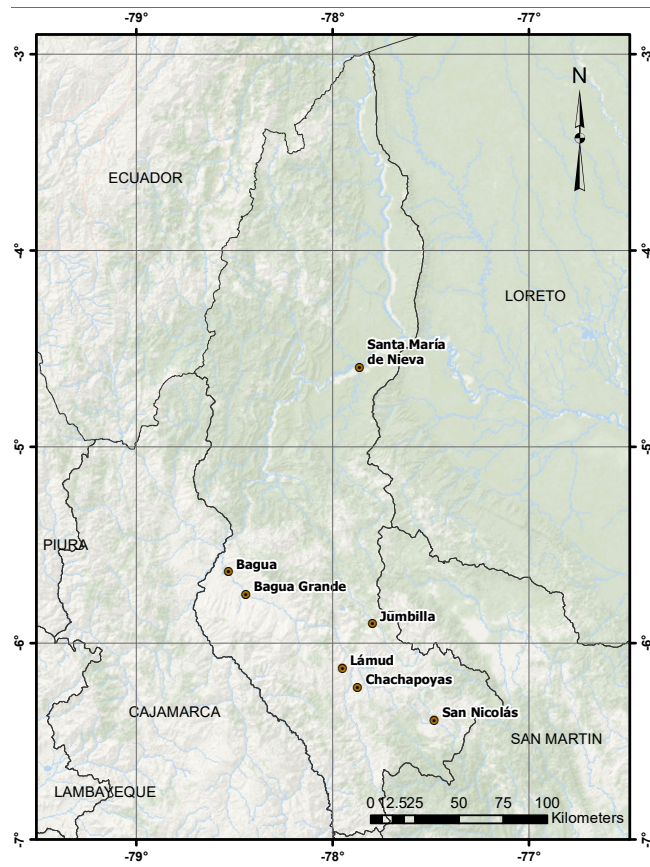
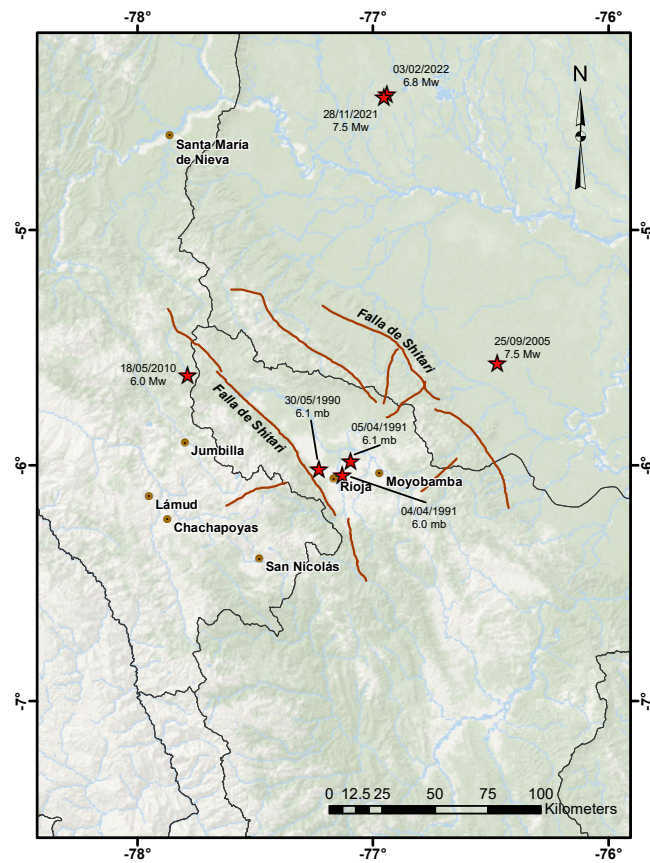


Figura 2
Algunos sismos fuertes que afectaron la región de interés en los últimos 30 años



2.2. Catálogo sísmico

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

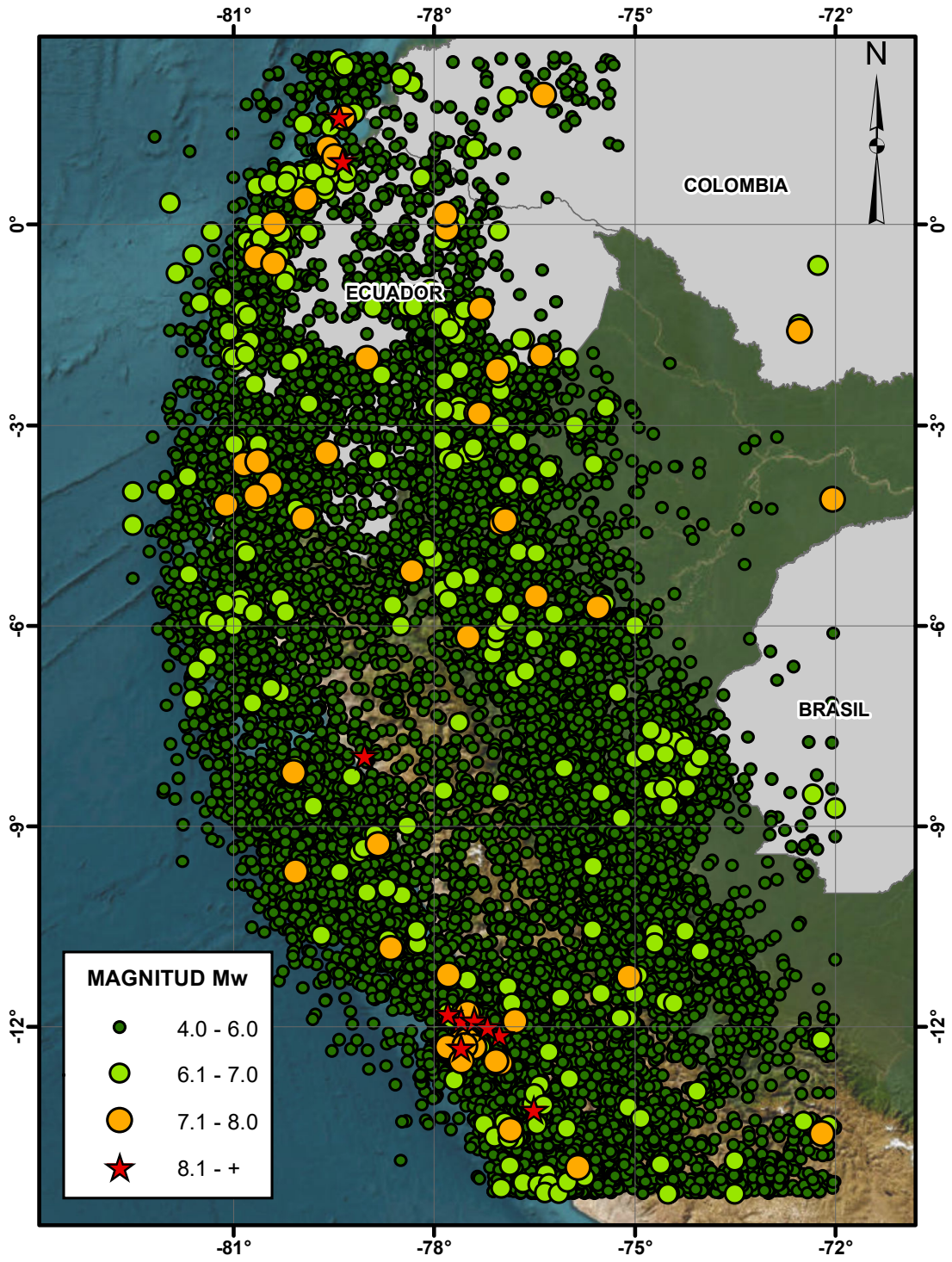


Figura 4

Distribución temporal de los sismos del catálogo

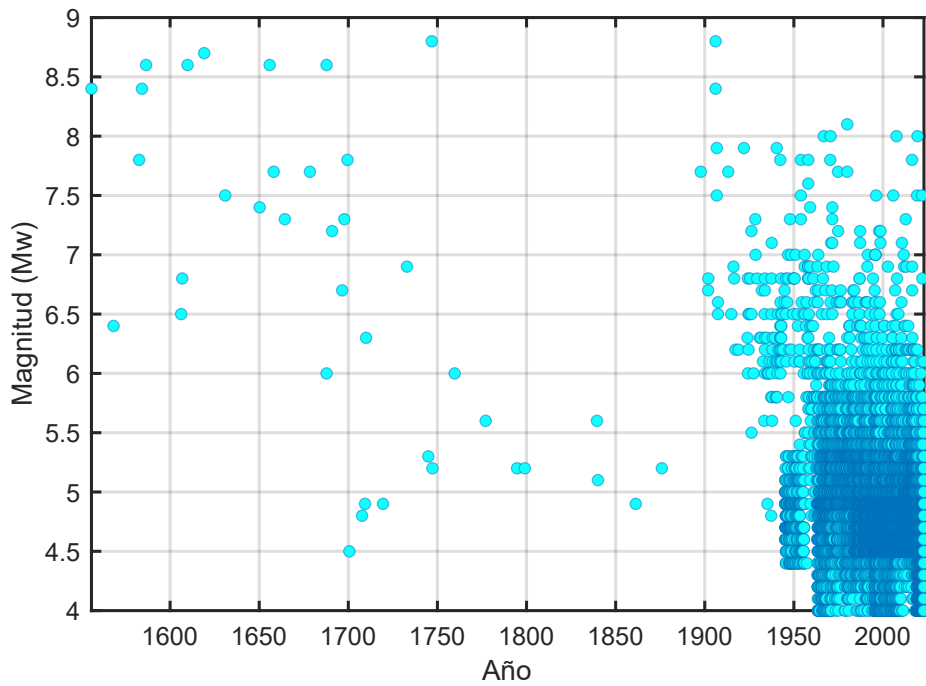
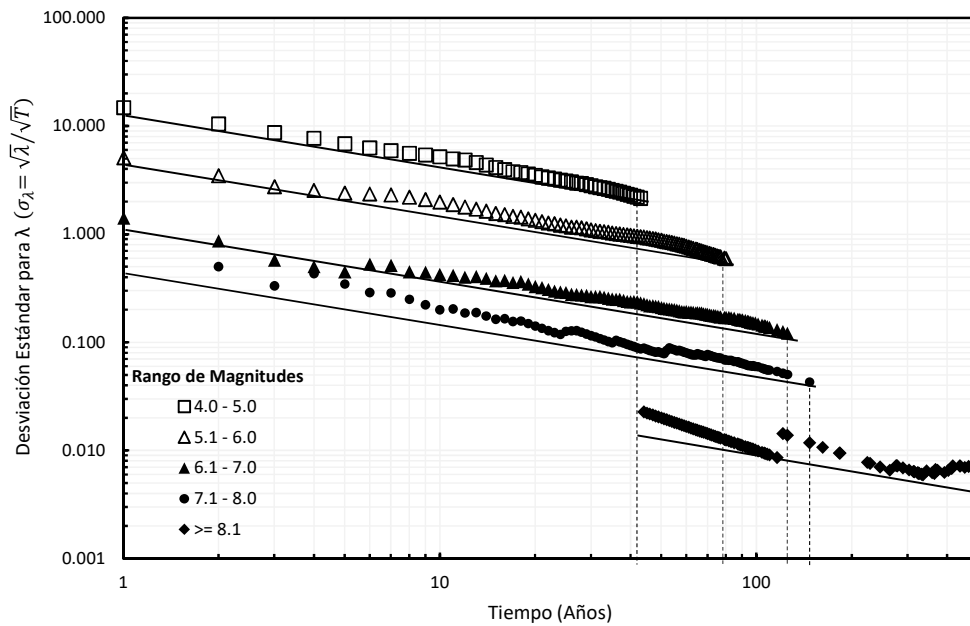


Figura 5

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

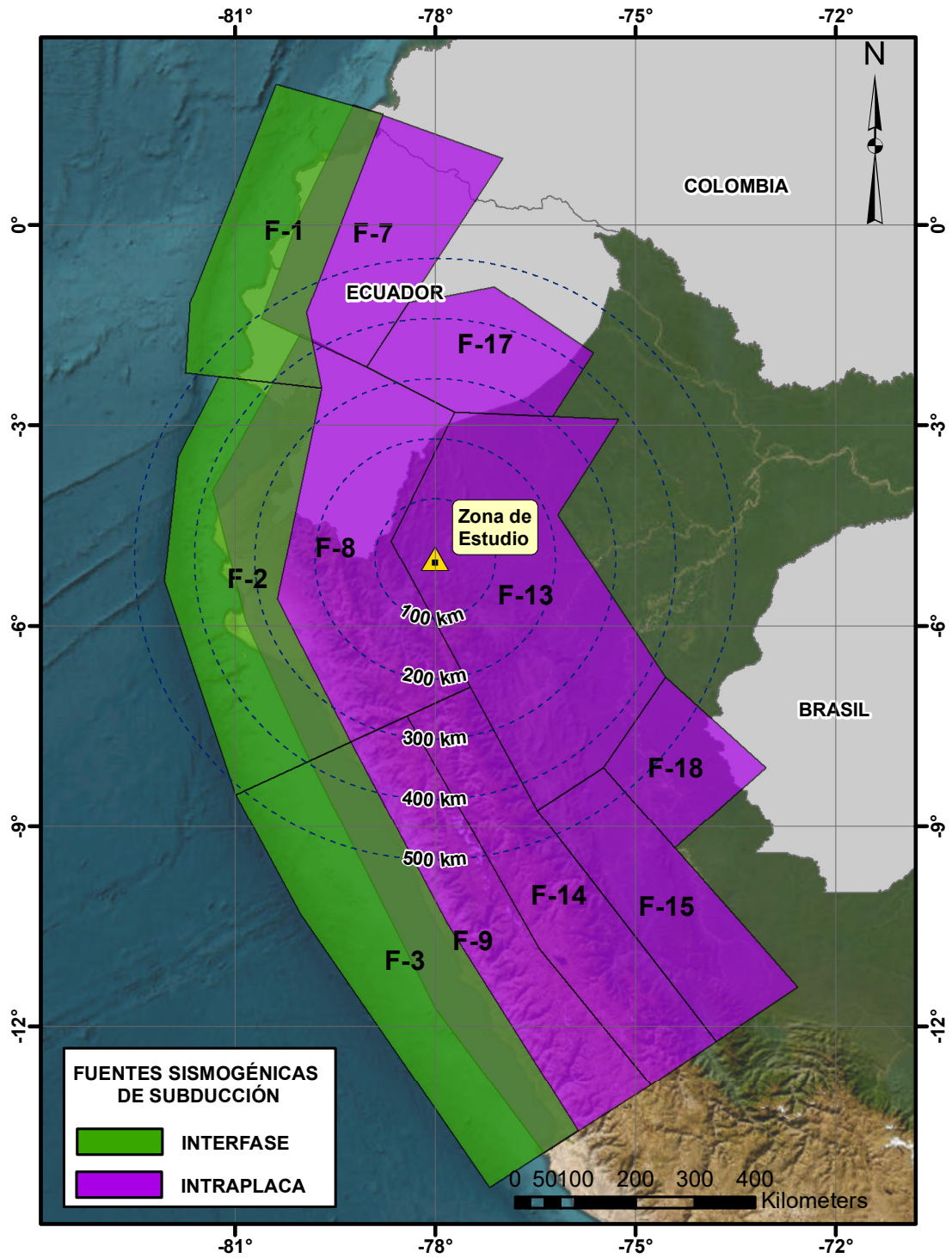
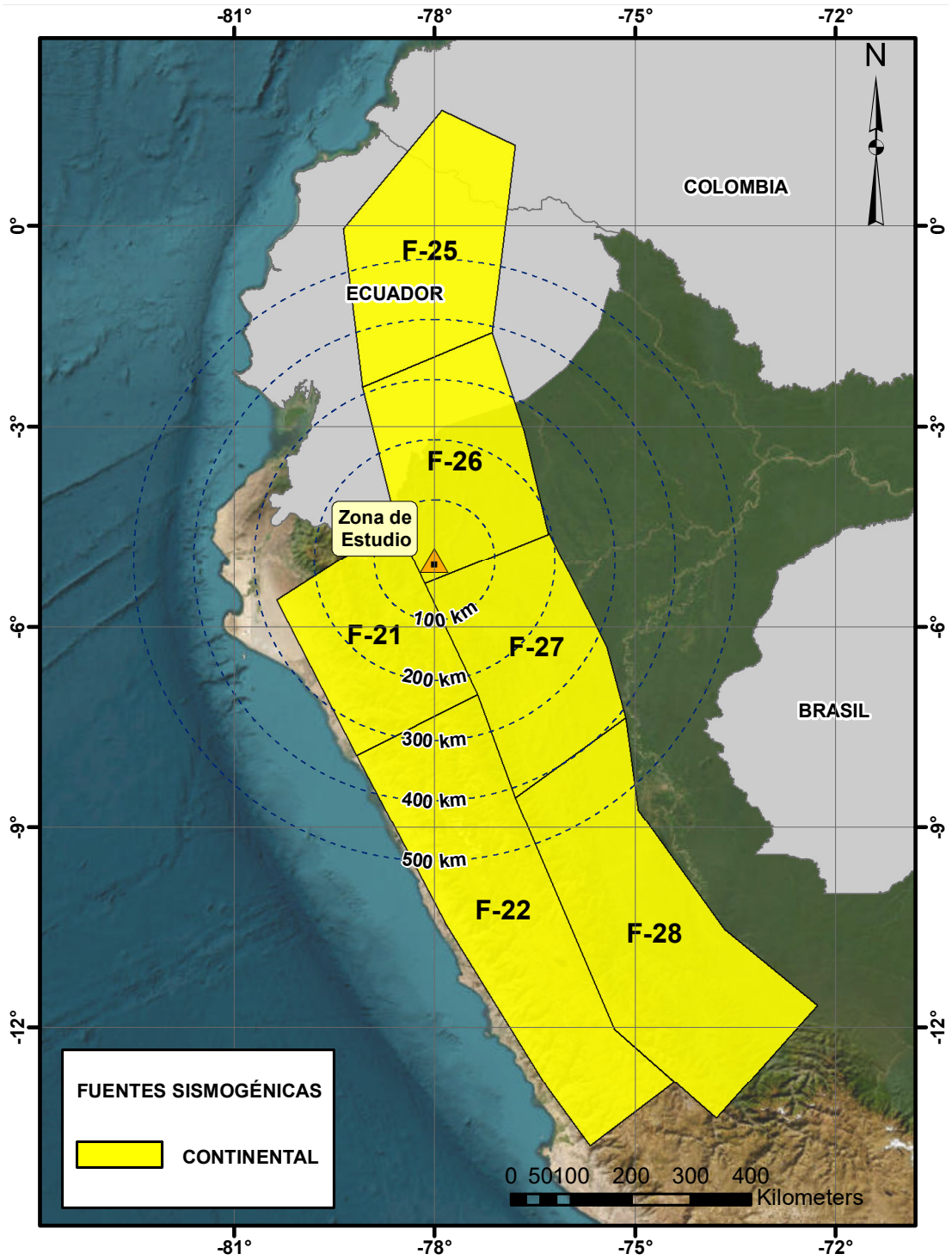


Figura 7
Fuentes sísmicas de tipo área continentales



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 (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}

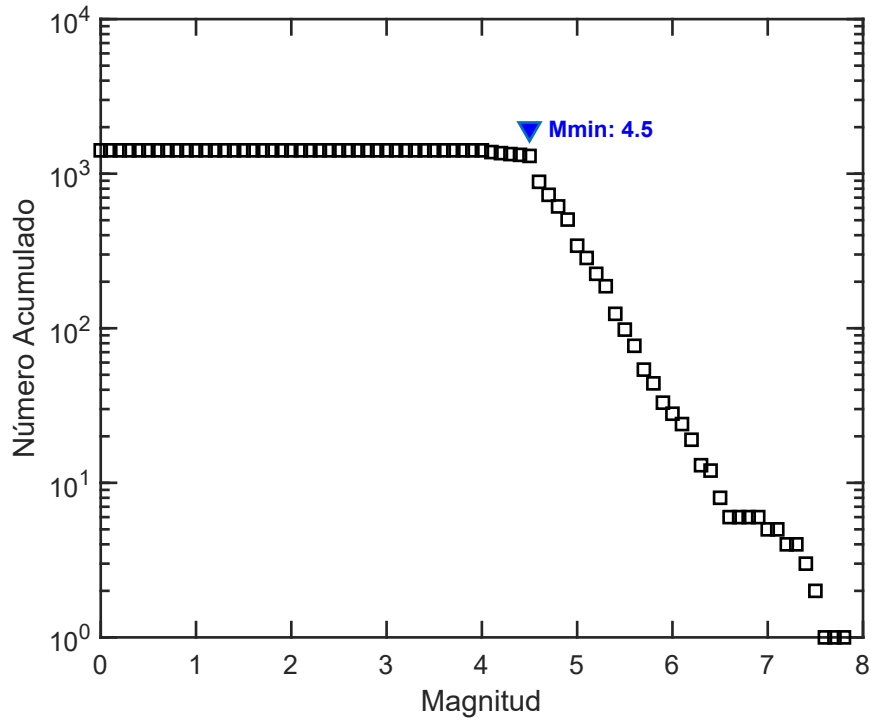


Figura 9

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

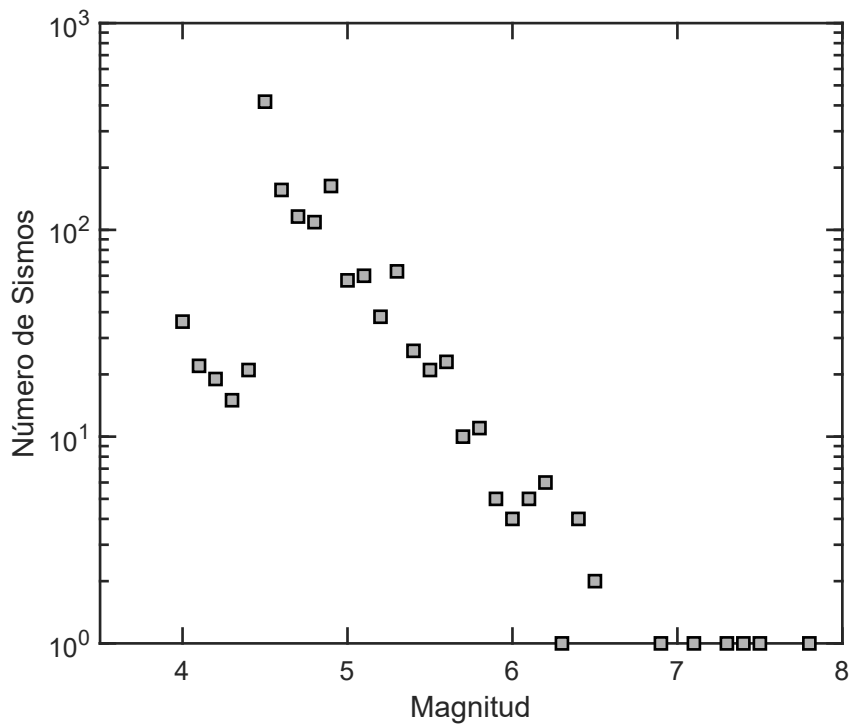
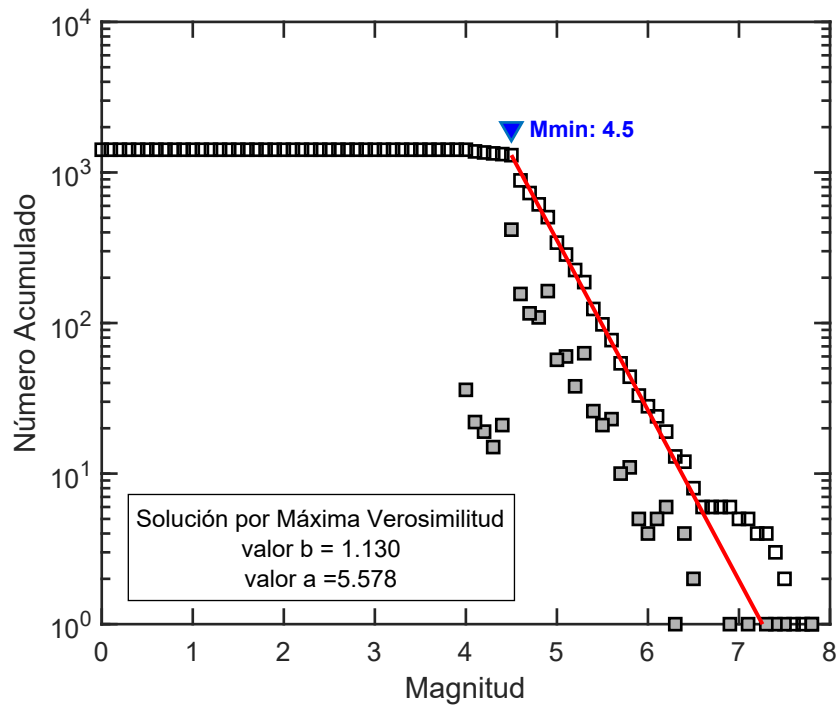


Figura 10*Recta de ajuste por máxima verosimilitud para la fuente F-2***Tabla 5***Parámetros sísmicos necesarios para la evaluación del peligro, indicados para cada una de las fuentes*

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

$r_{rup} =$ 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 (Sa) 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

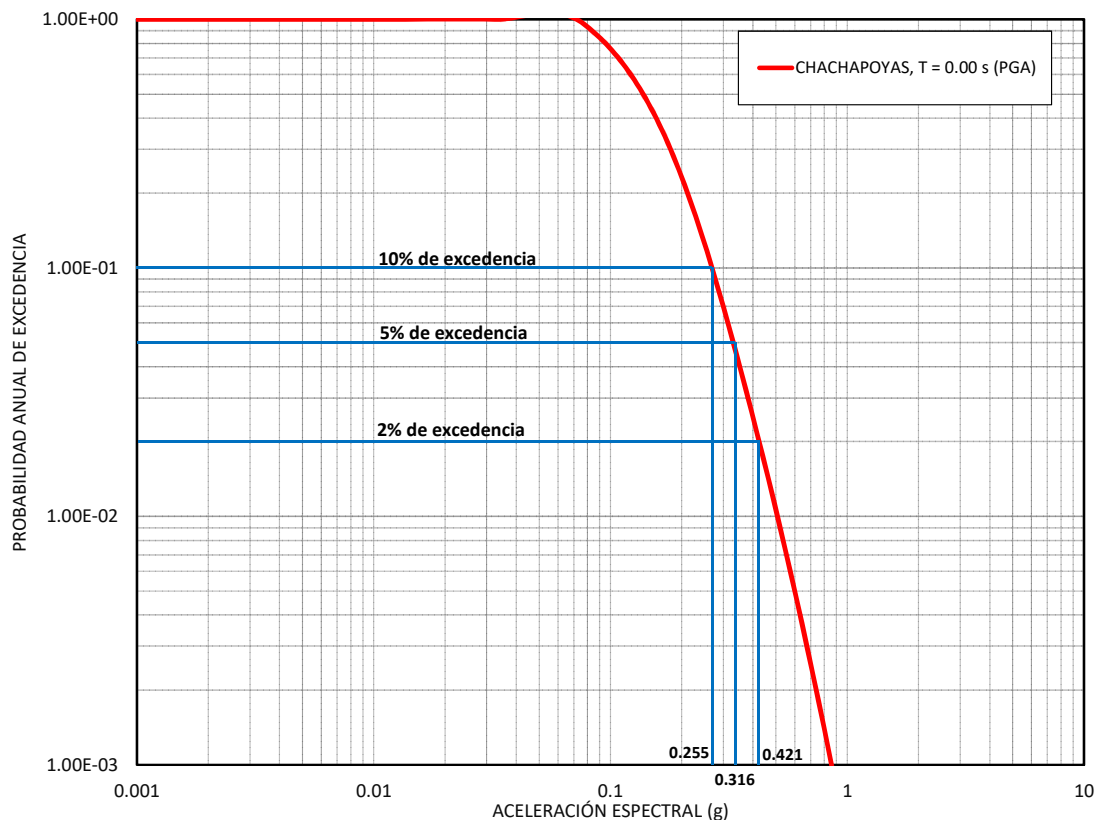
3.1. Curvas de peligro sísmico

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

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

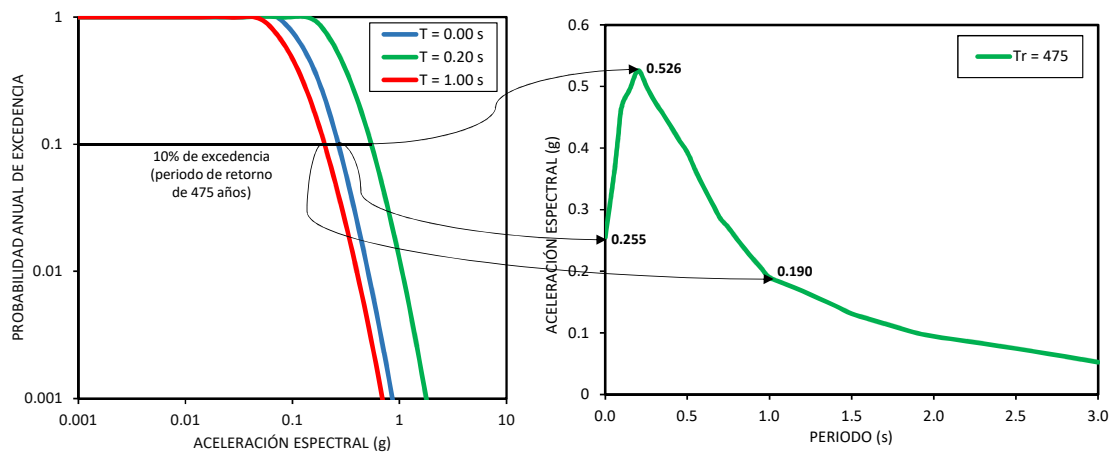


Tabla 6

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

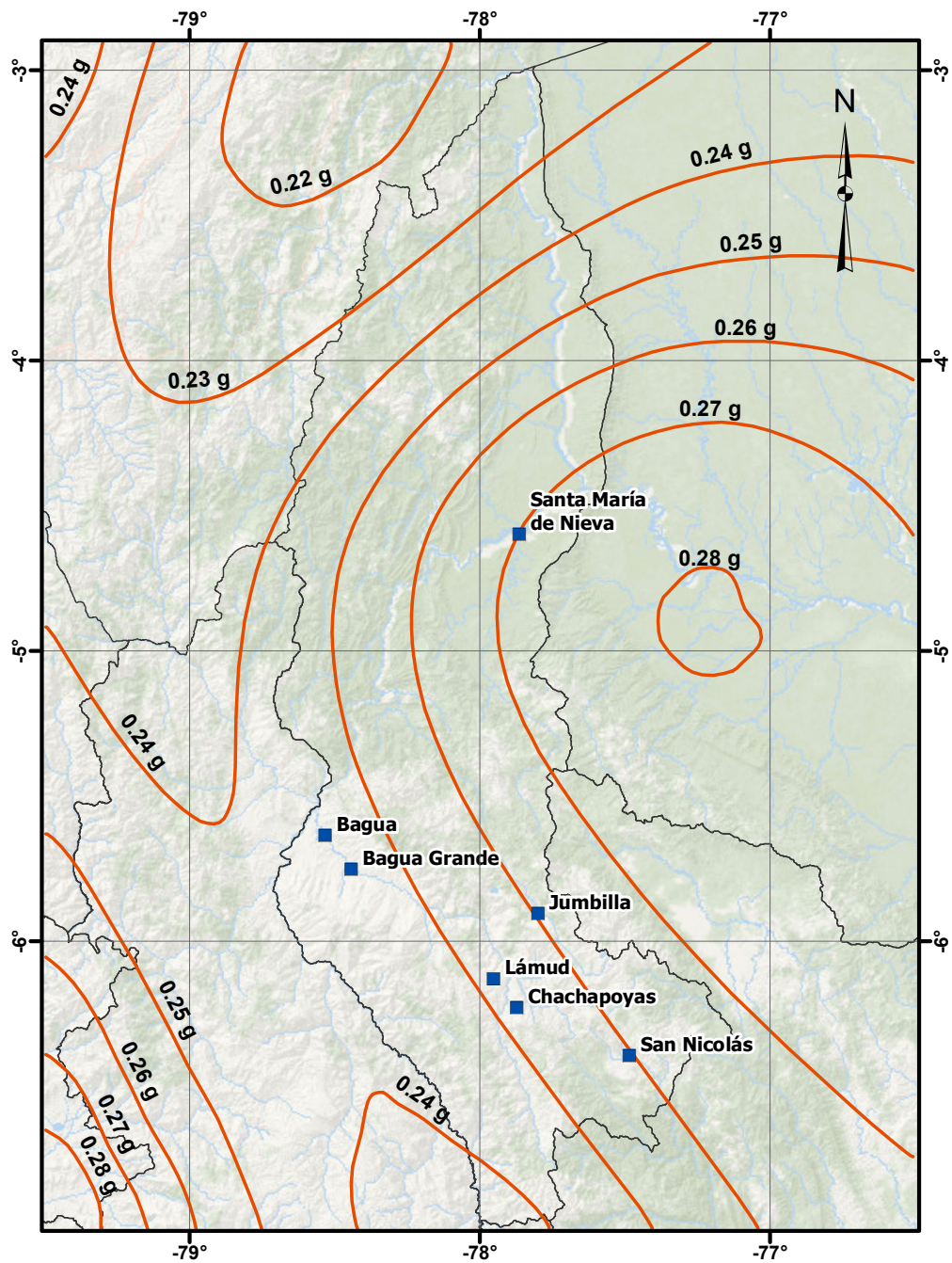
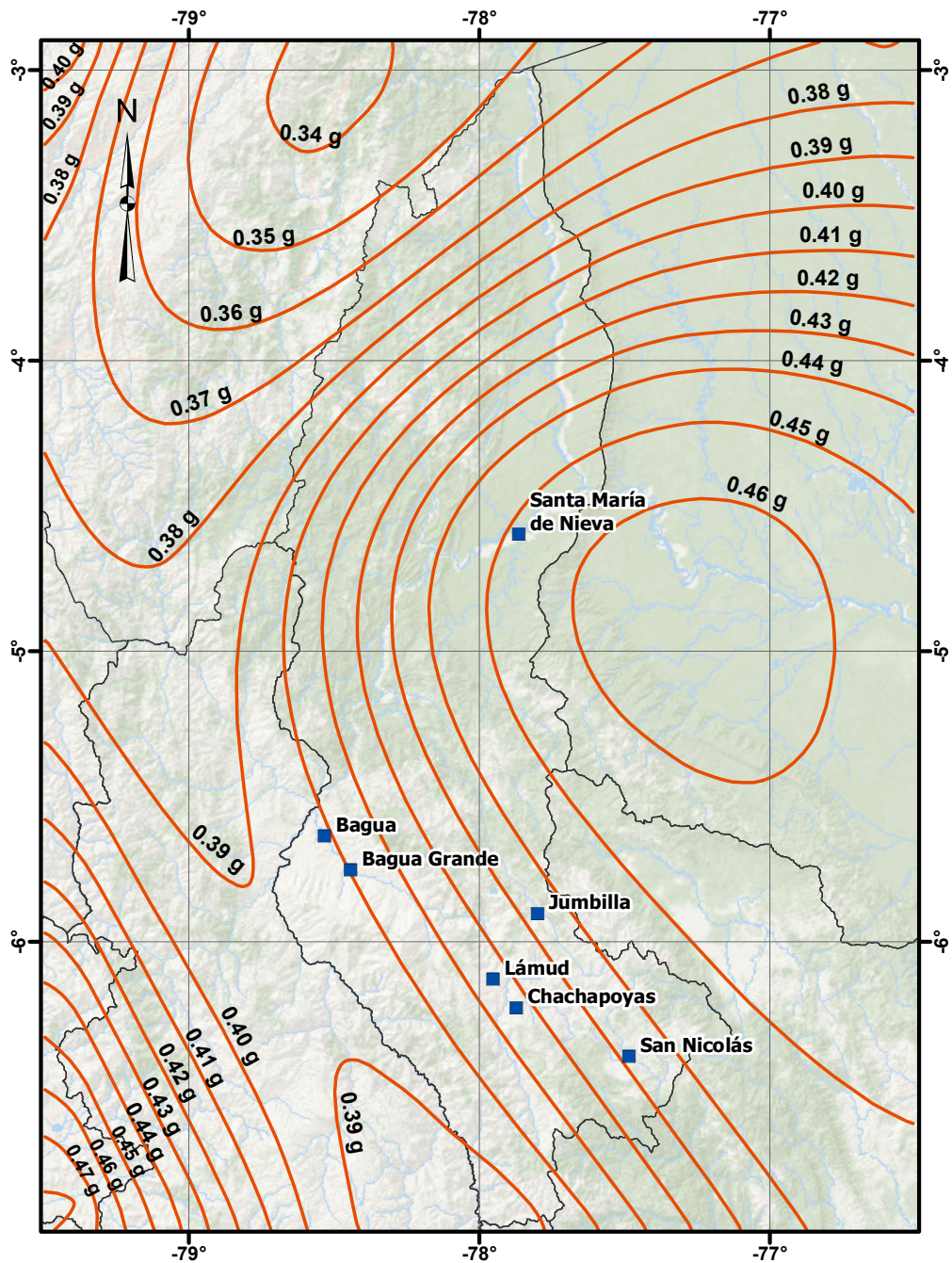


Figura 14

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 para todo el territorio nacional de la máxima aceleración del suelo (PGA) considerando los tiempos de retorno de 475 y 2475 años.

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 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

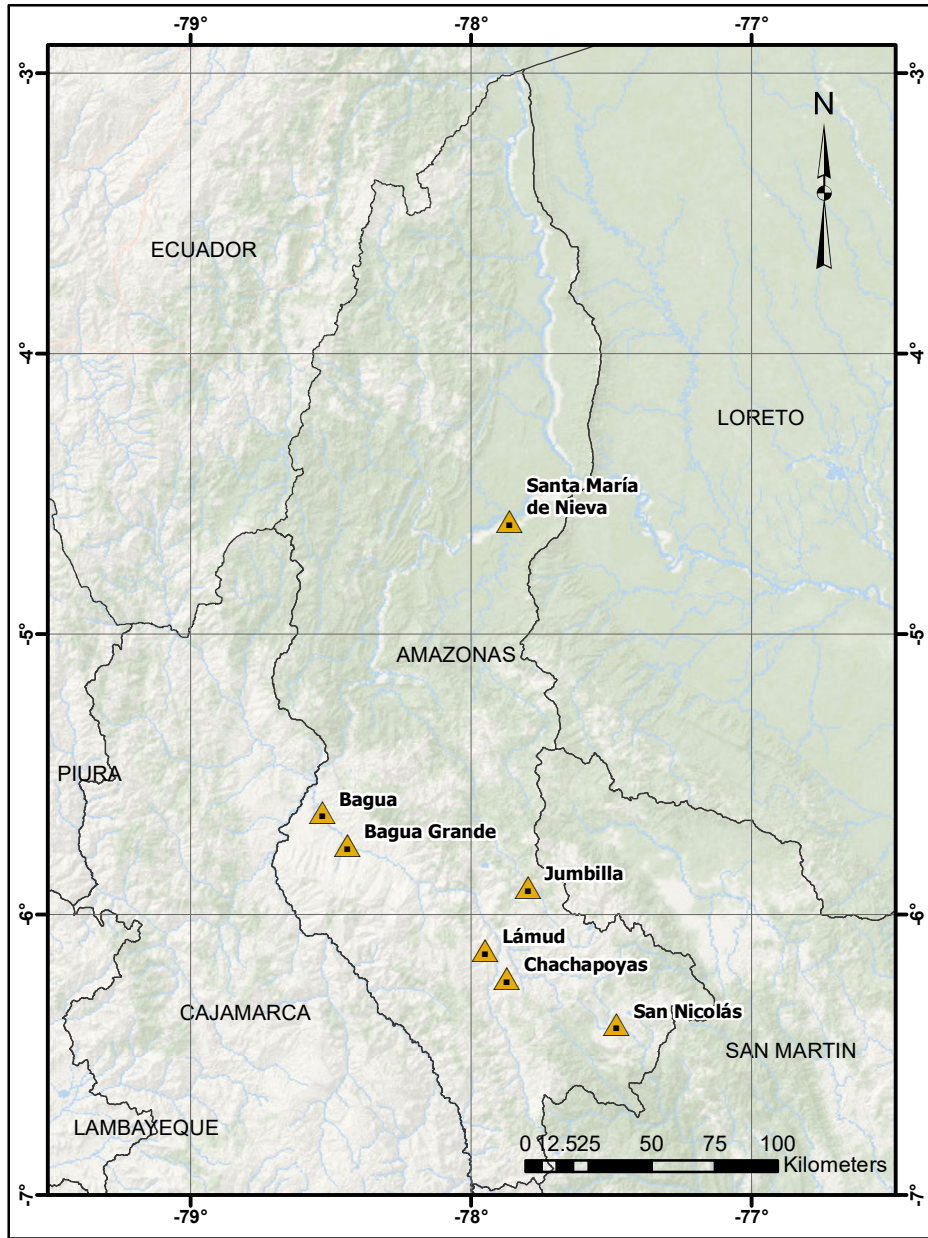
- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. doi: <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Aguilar, Z., Roncal, M., & Piedra, R. (2017, enero). Probabilistic Seismic Hazard Assessment in 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>

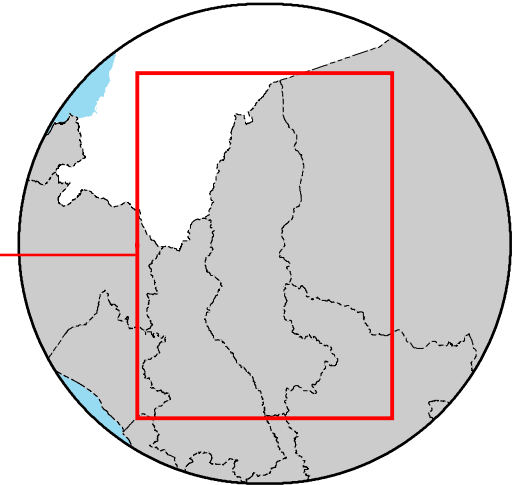
- Stepp, J. (1972, october). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. En *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation, Seattle*, Vol. 2, pp. 897–910.
- Tavera, H., Bernal, Y., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, 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



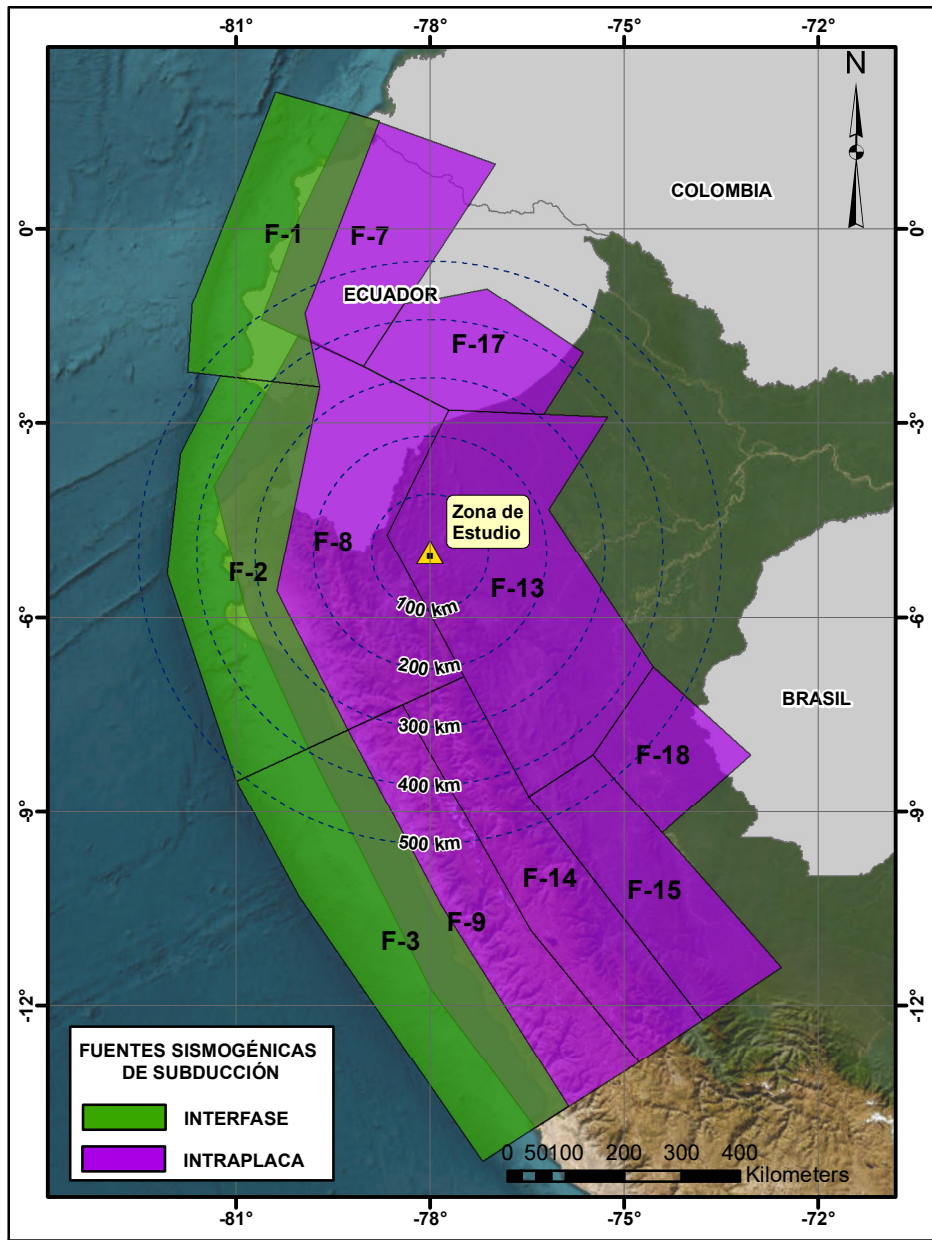
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

LEYENDA

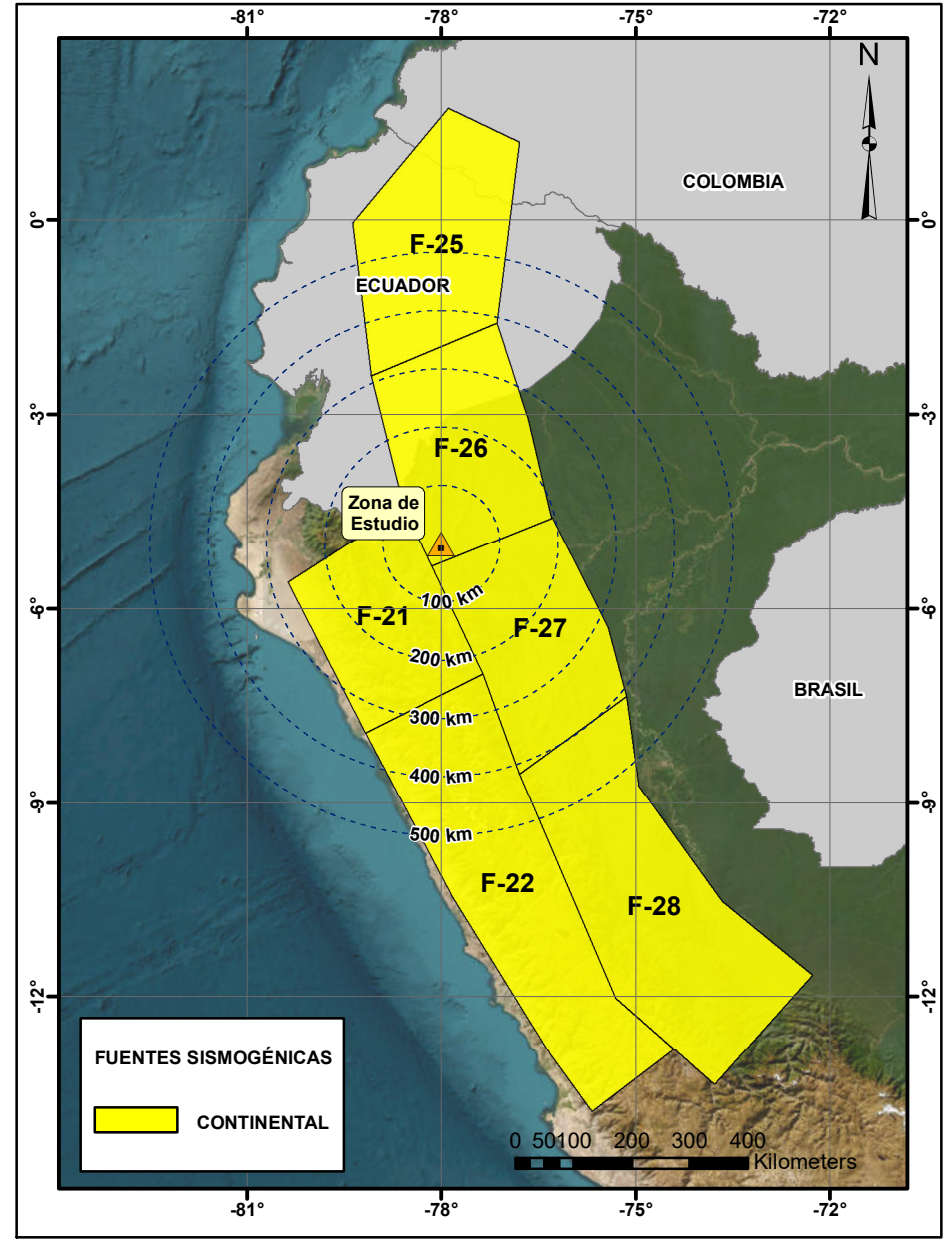
- Puntos de control
- Límite departamental

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

Anexo B: Fuentes sismogénicas



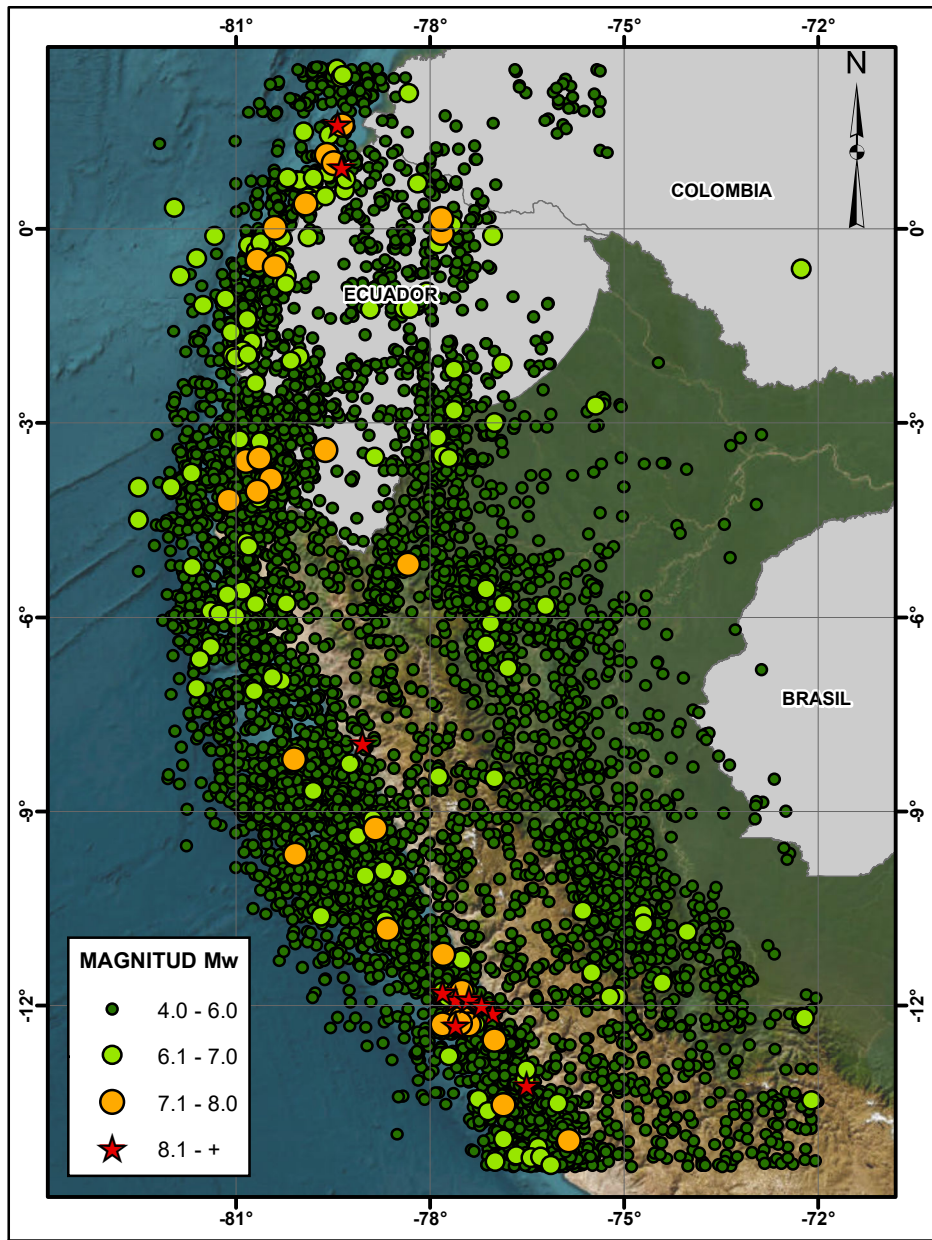
FUENTES SISMOGÉNICAS
Escala 1 / 13 000 000



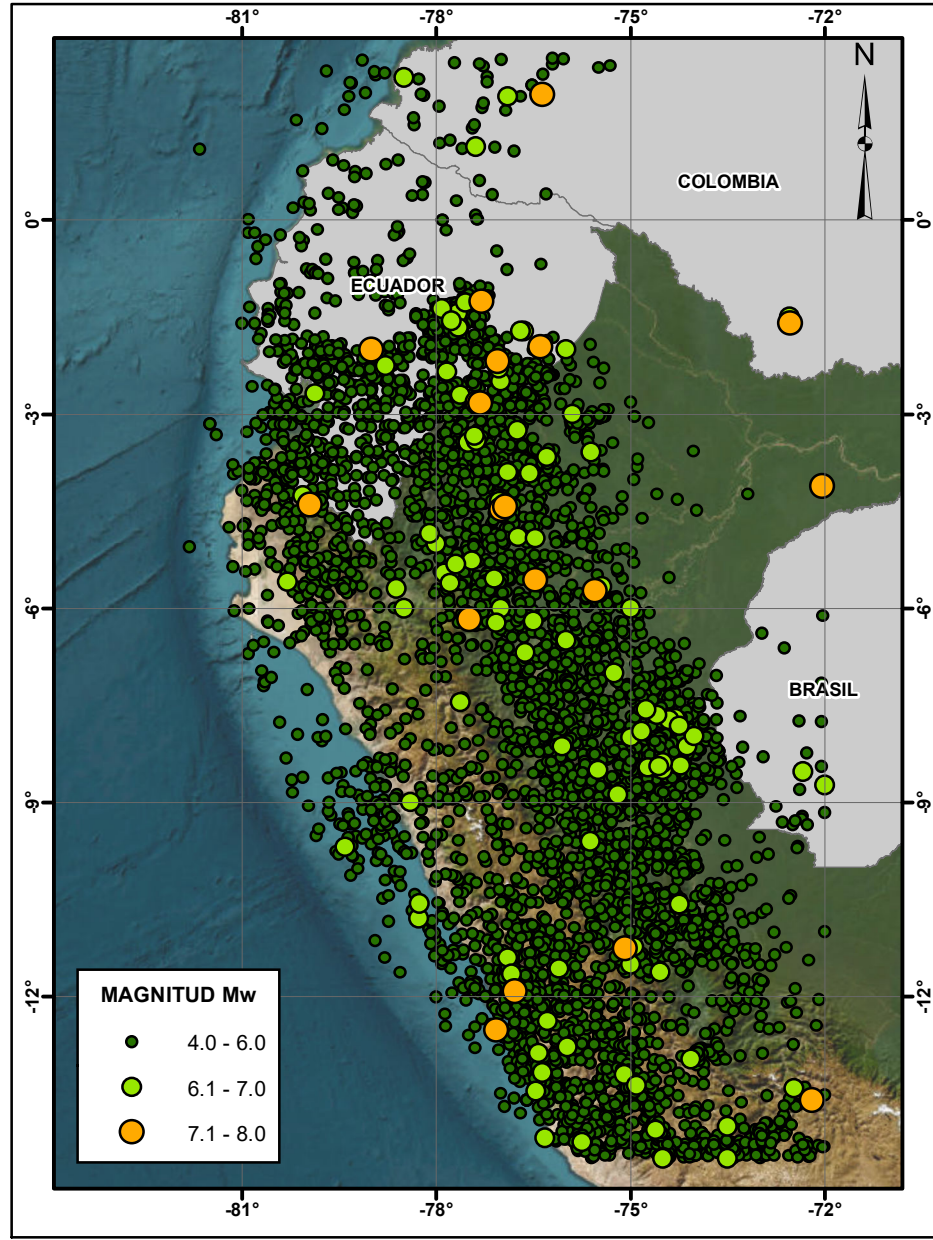
FUENTES SISMOGÉNICAS
Escala 1 / 13 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: FUENTES SISMOGÉNICAS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023	CÓDIGO M-02	

Anexo C: Eventos sísmicos magnitud de momento (Mw)



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

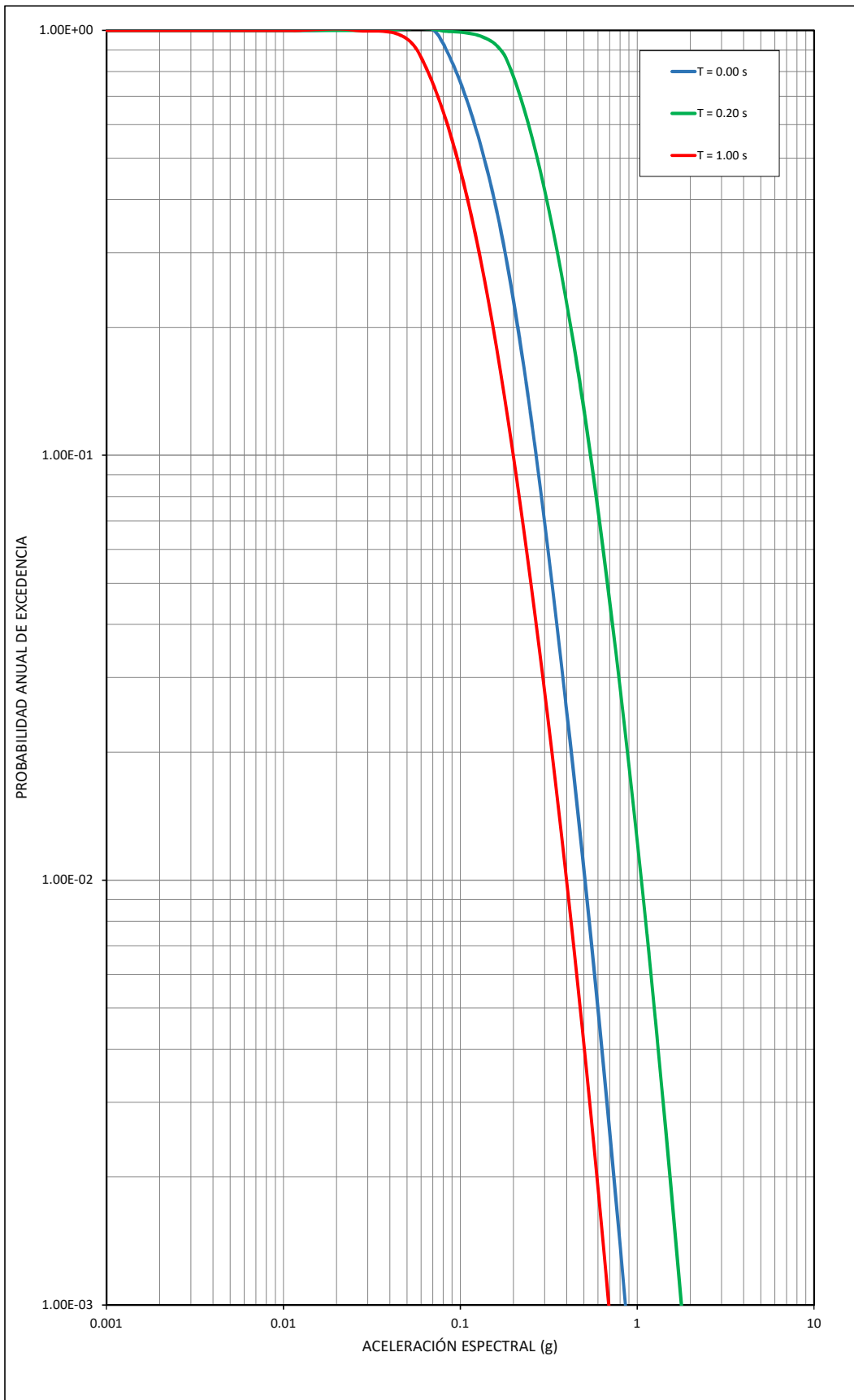


SISMOS INTERMEDIOS Y PROFUNDOS (h > 60 km)
Escala 1 / 13 000 000

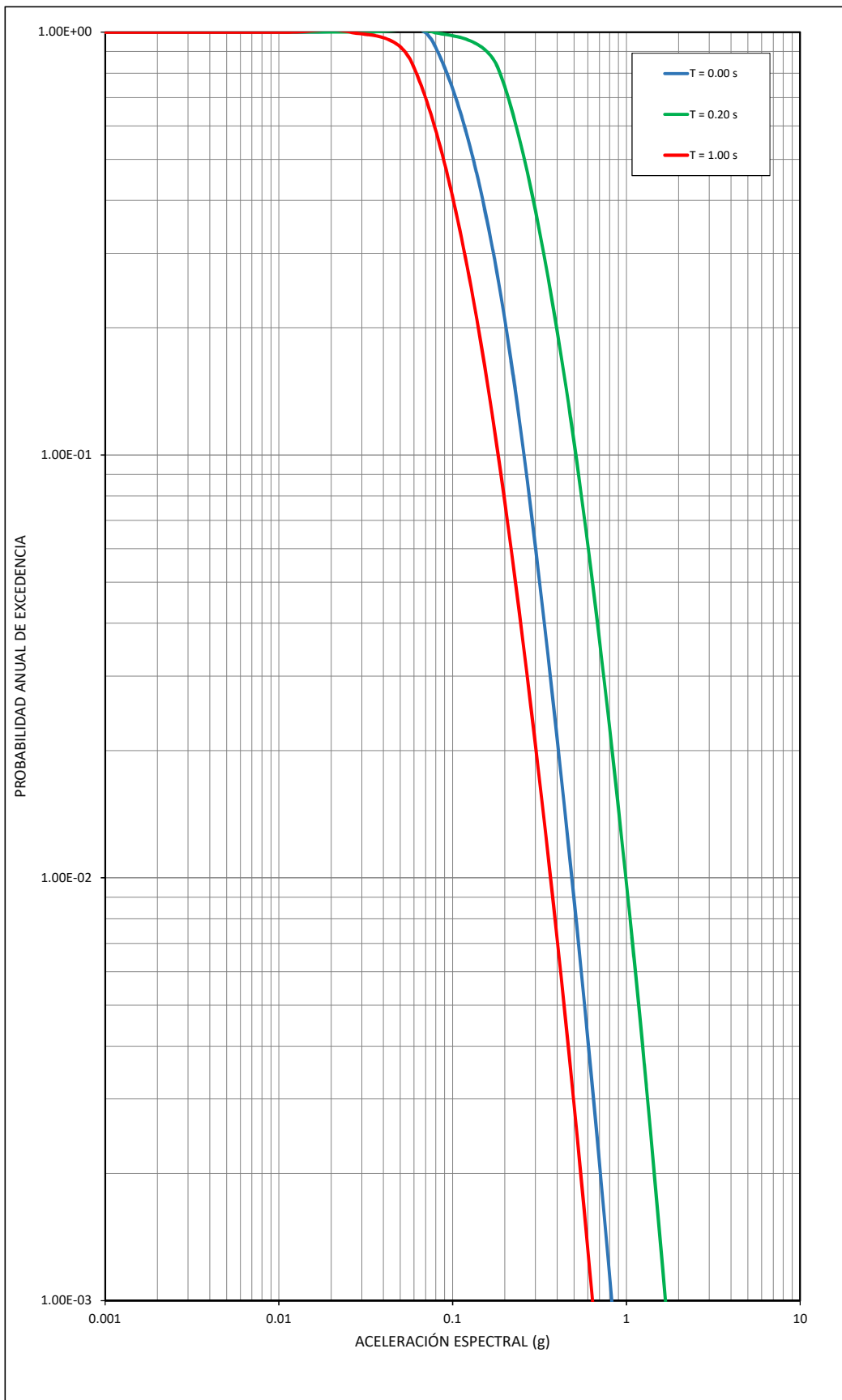
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: EVENTOS SÍSMICOS MAGNITUD MOMENTO	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023	CÓDIGO M-03	

Anexo D: Curvas de probabilidad anual de excedencia

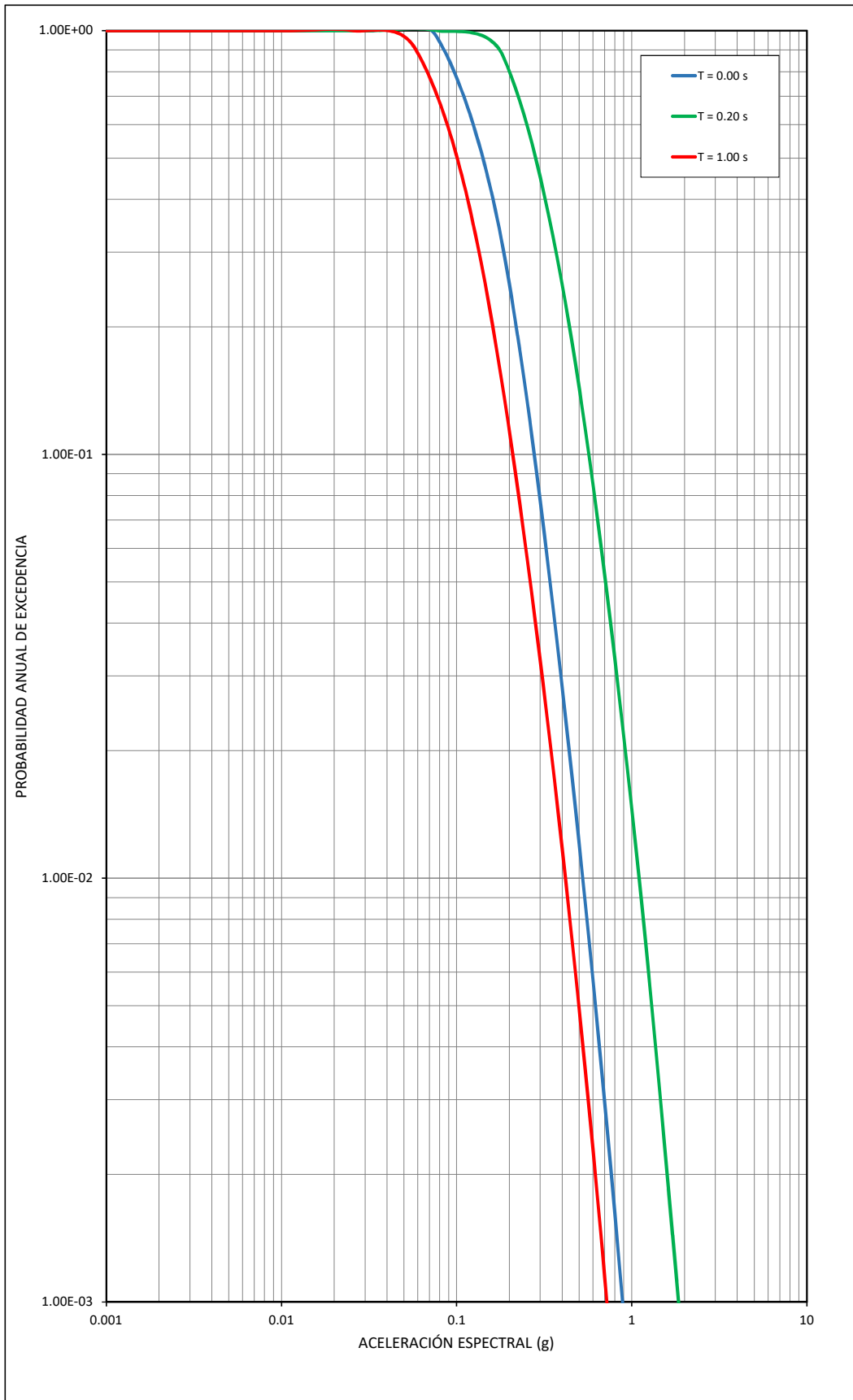
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: CHACHAPOYAS



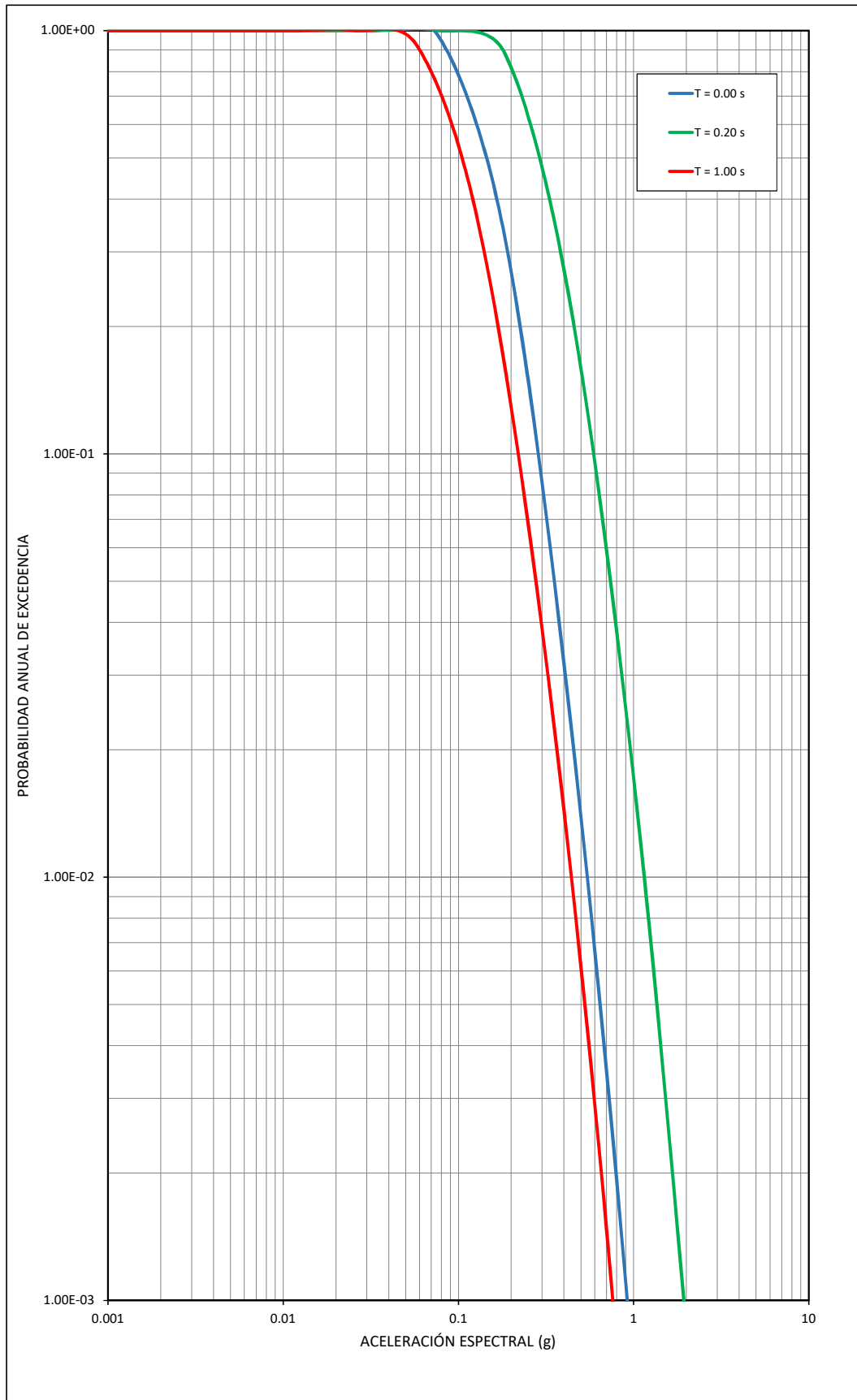
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: BAGUA



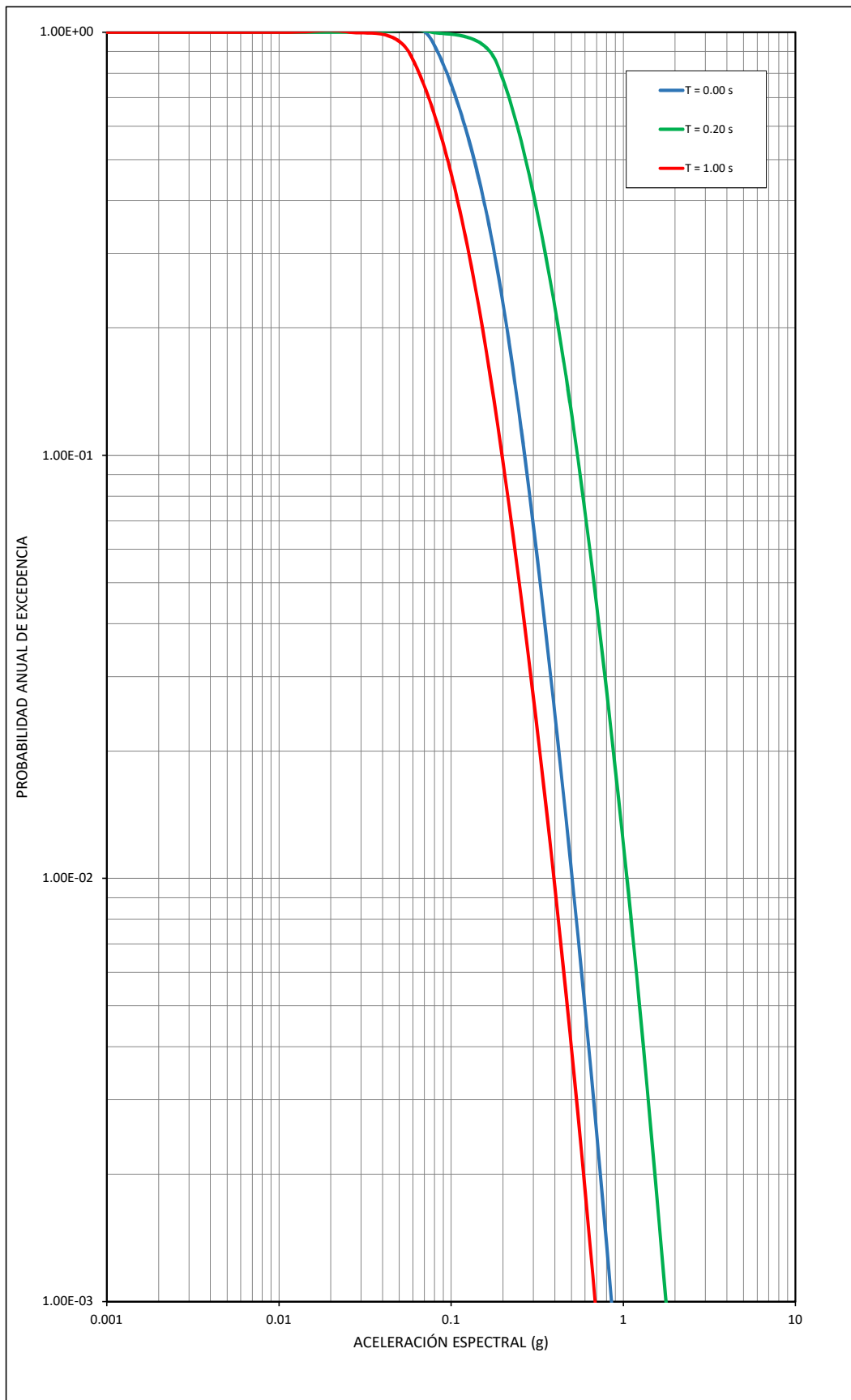
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: JUMBILLA



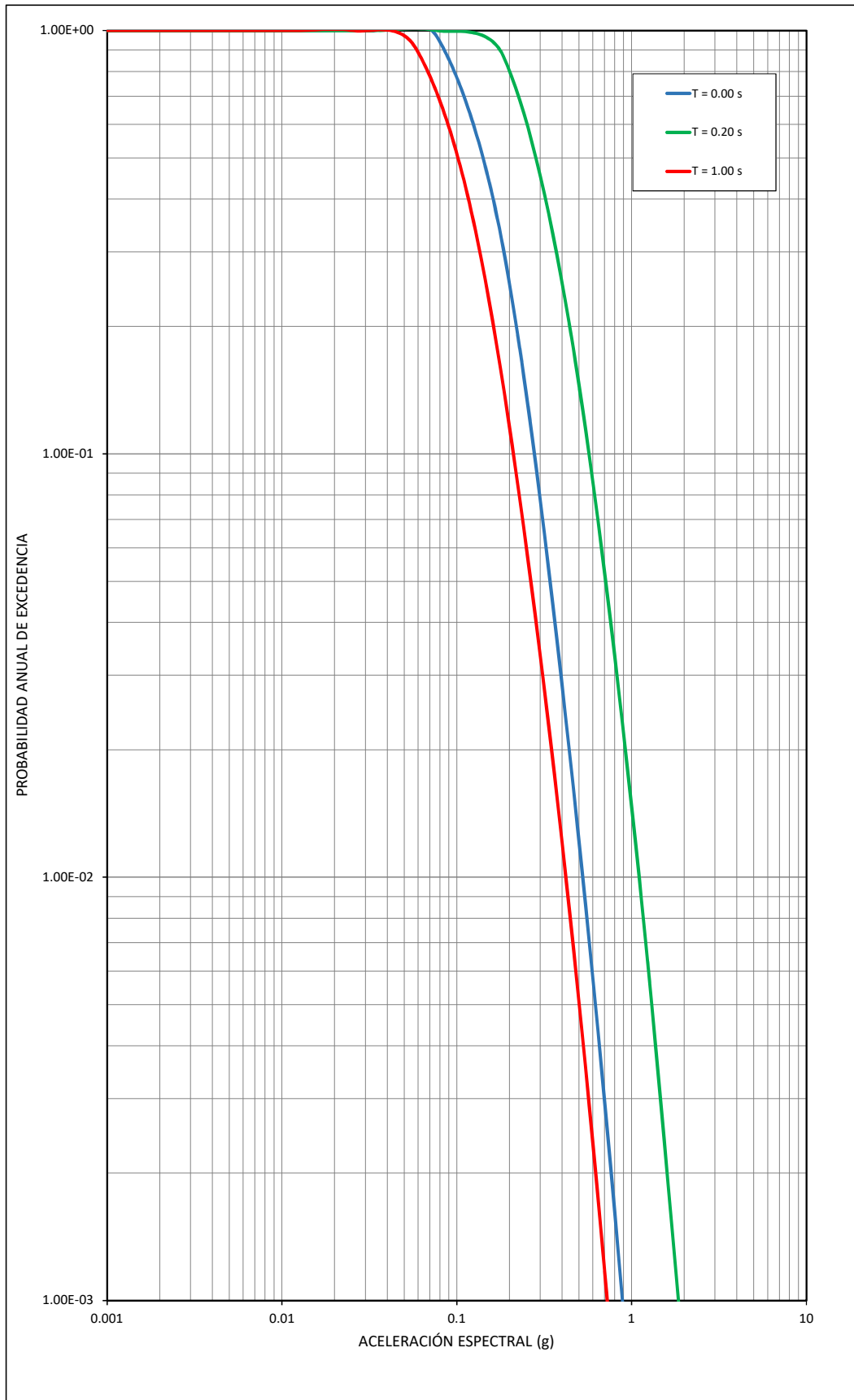
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: SANTA MARÍA DE NIEVA



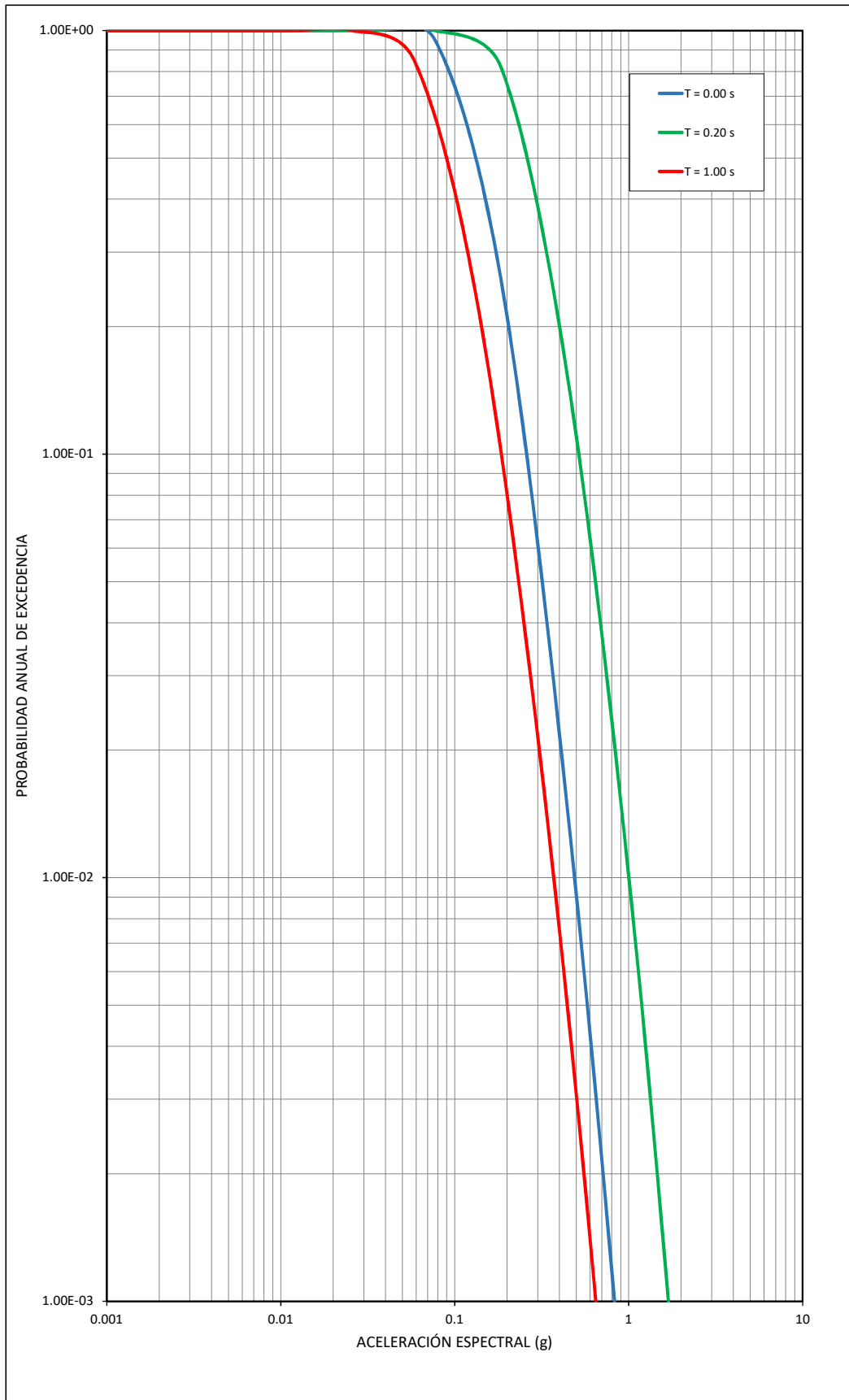
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: LÁMUD



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



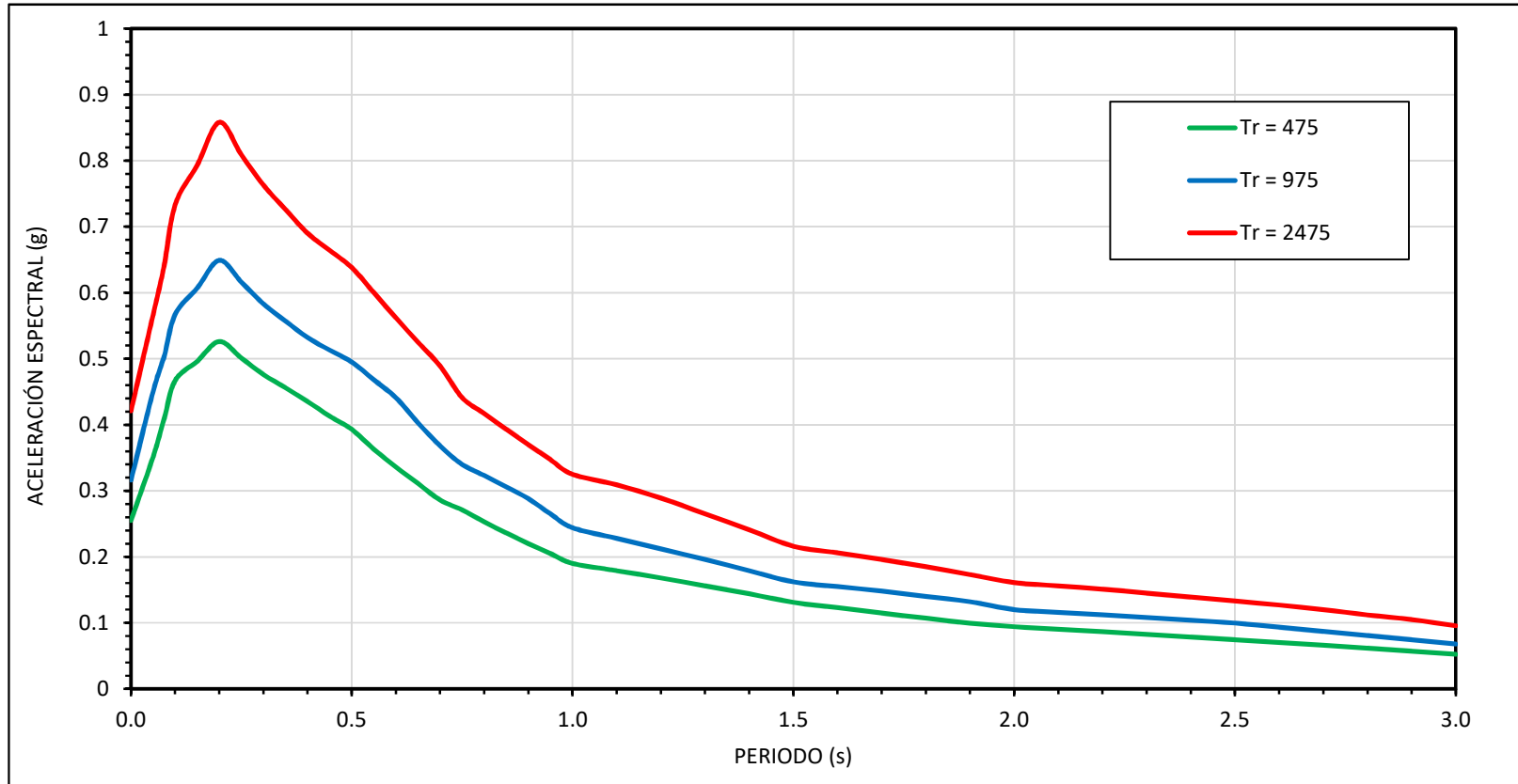
CURVAS DE PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA PARA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN 50 AÑOS
ZONA: BAGUA GRANDE



Anexo E: Espectros de peligro uniforme

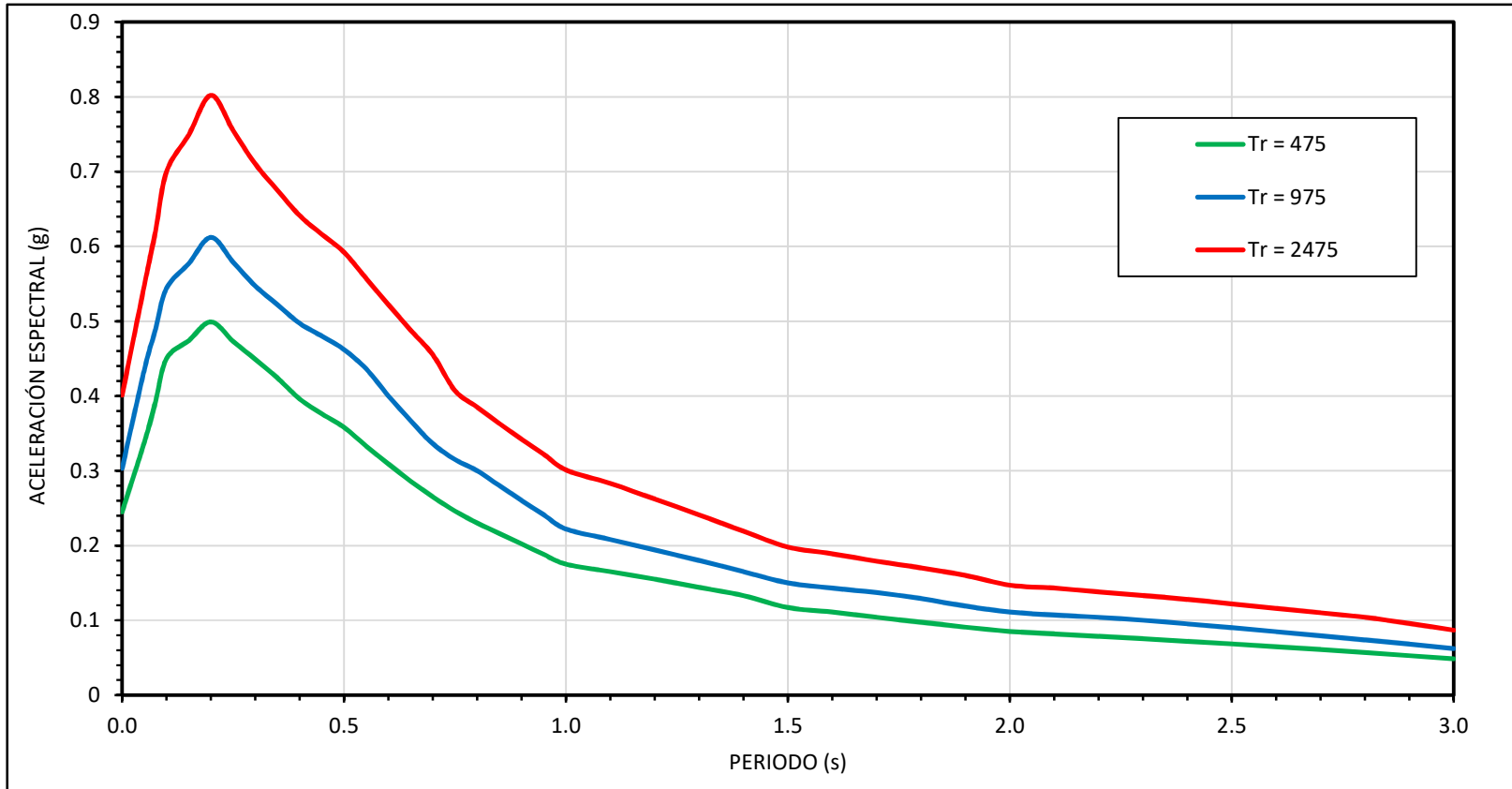
ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - CHACHAPOYAS



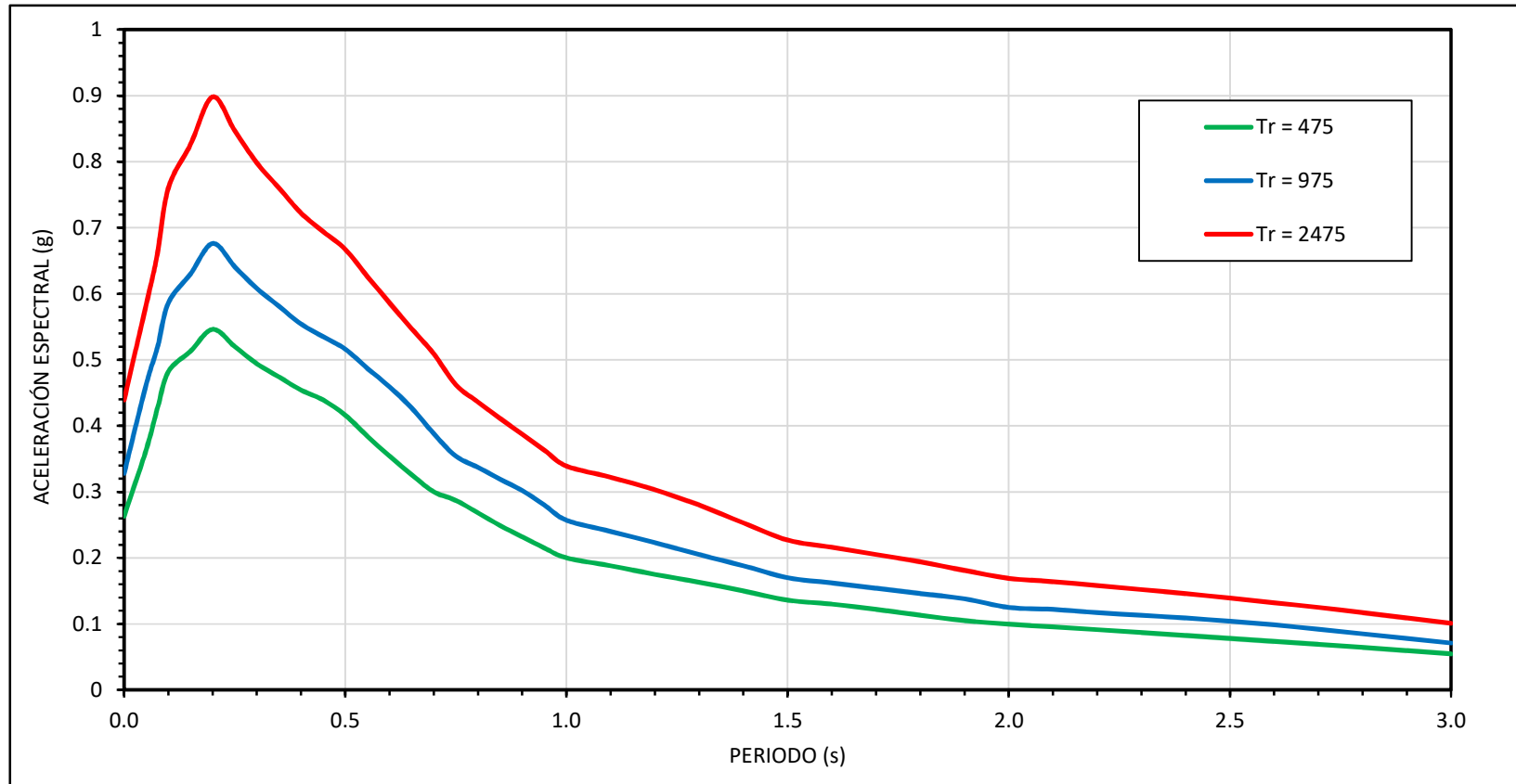
ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - BAGUA

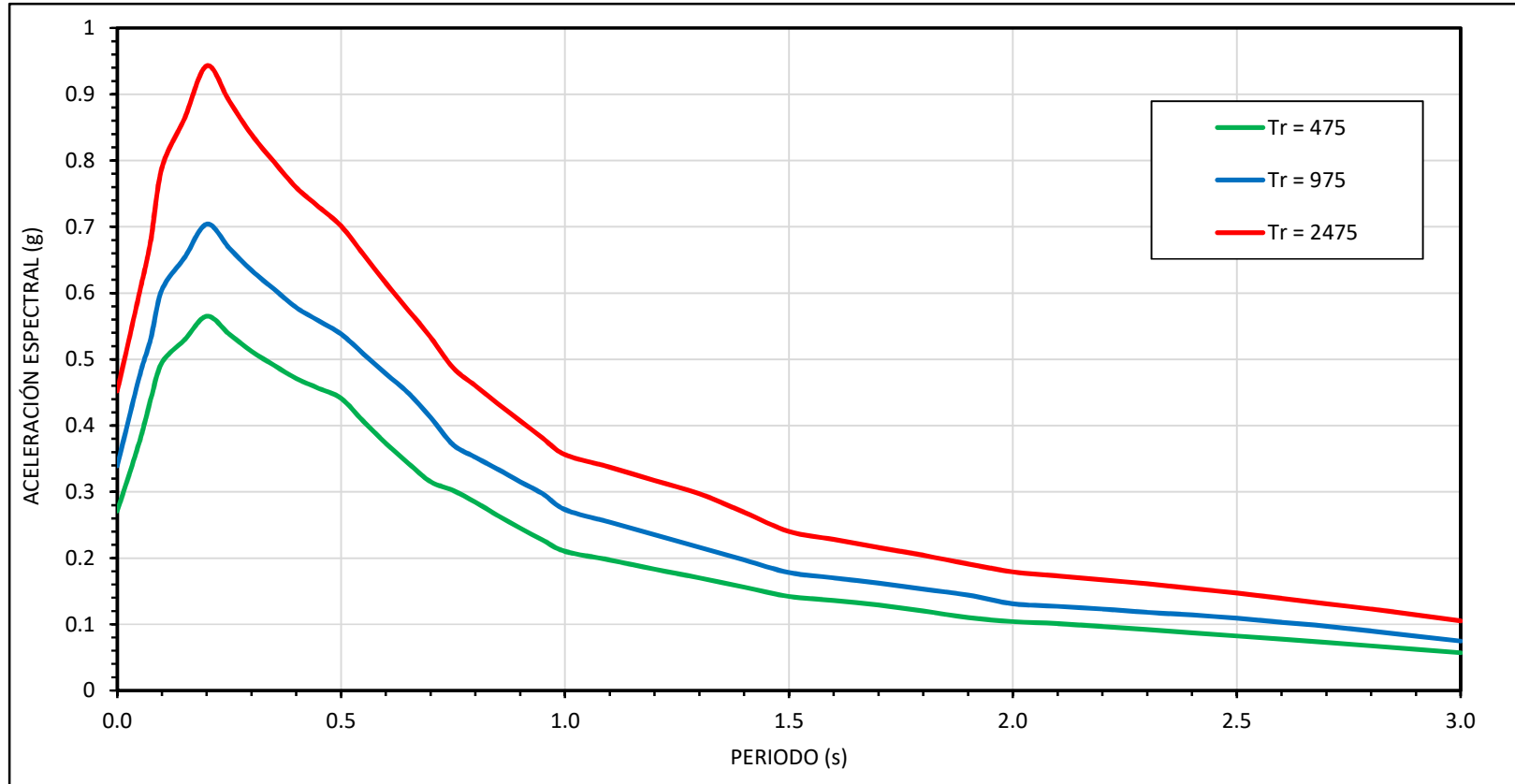


ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - JUMBILLA

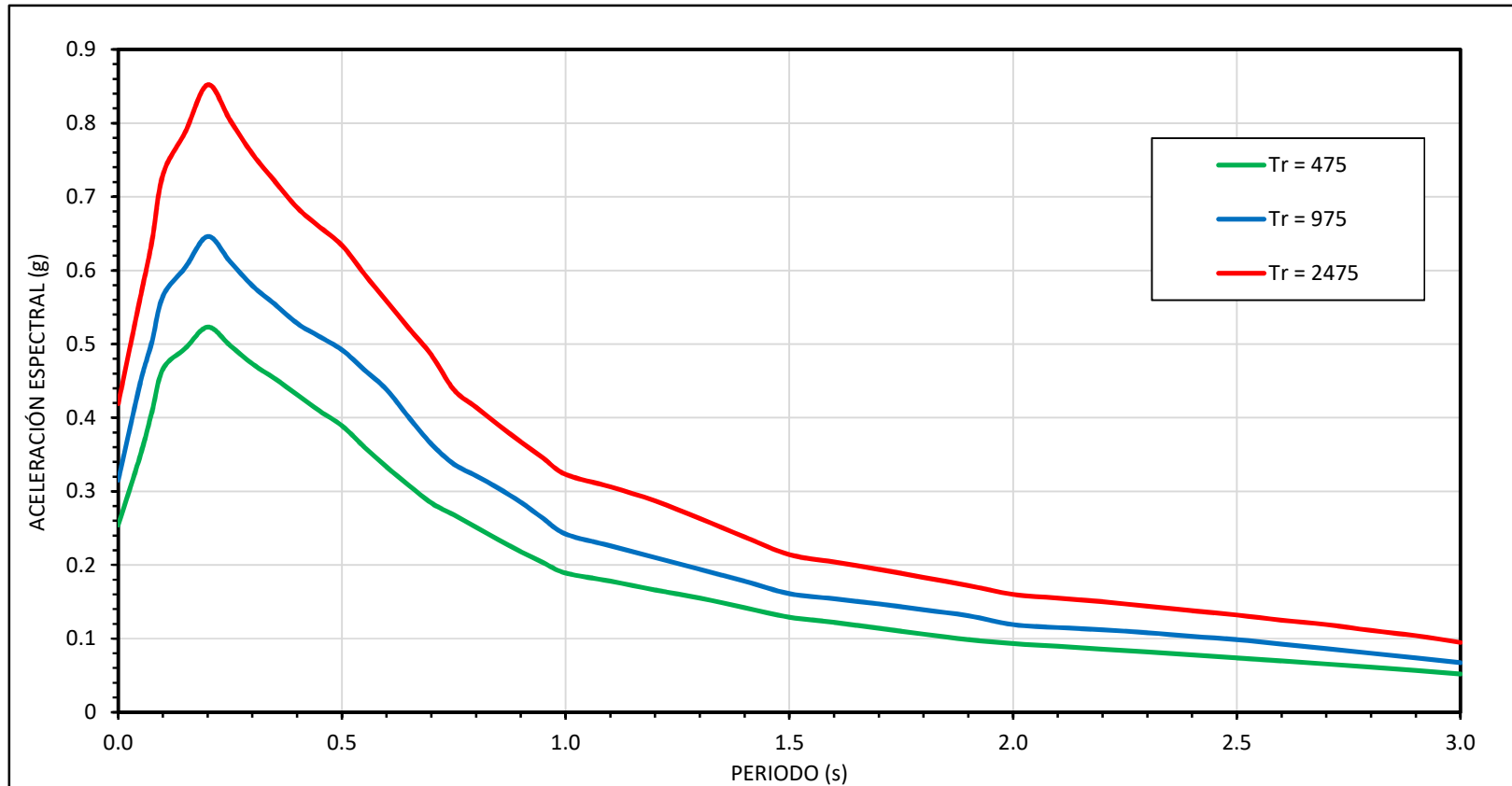


ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - SANTA MARÍA DE NIEVA

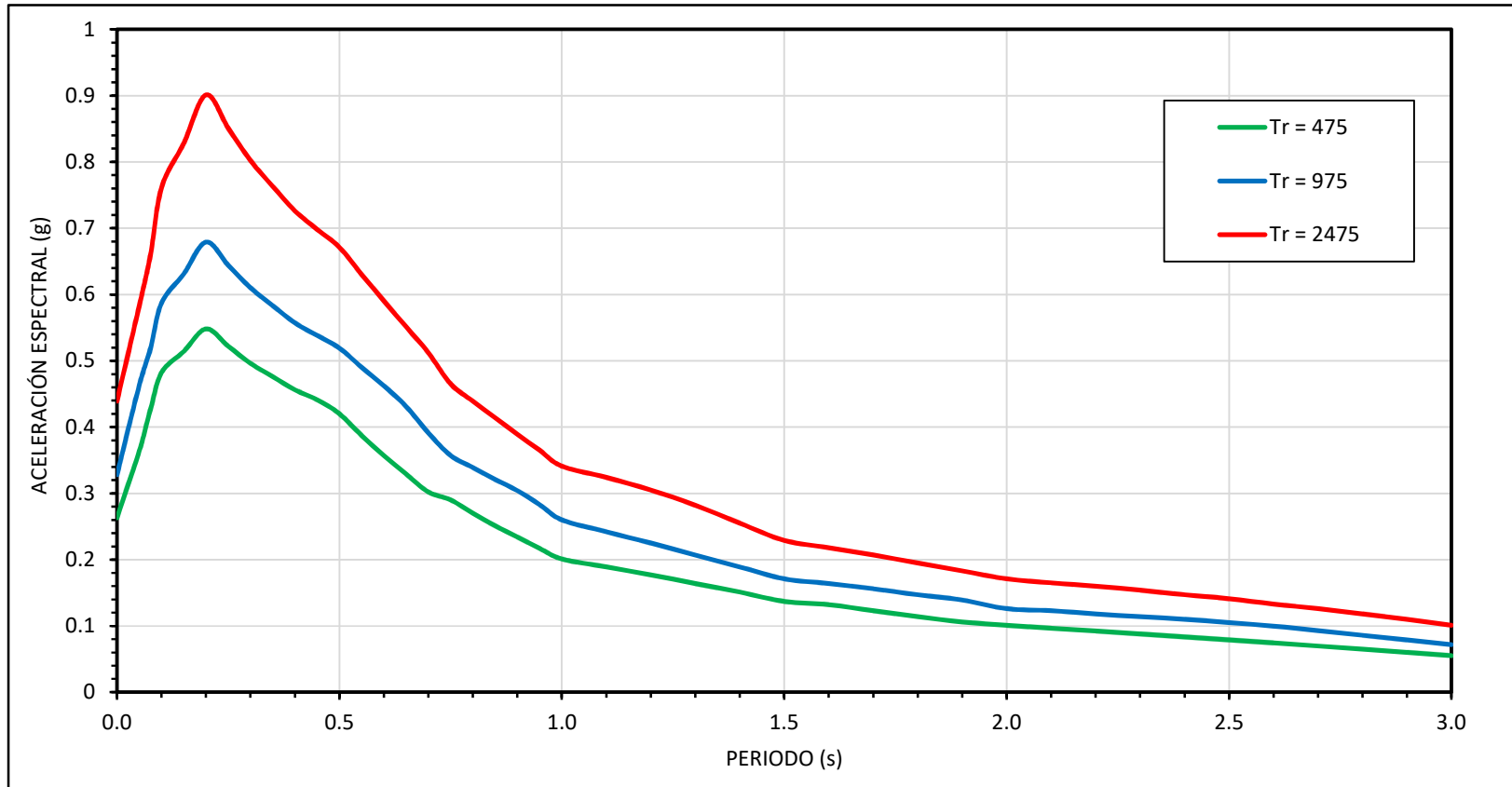


ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - LÁMUD

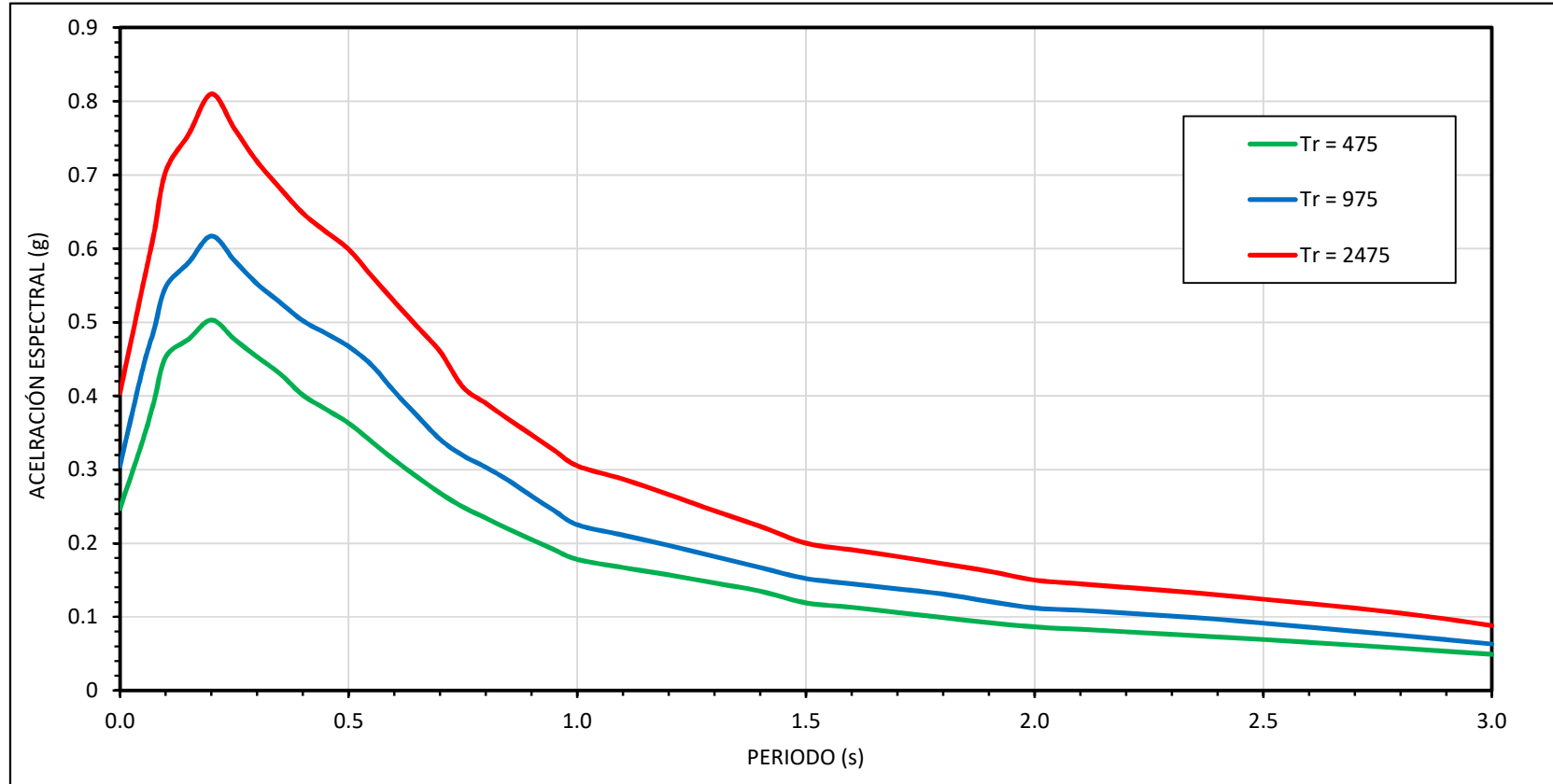


ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B
Tiempo de Exposición de 50 años - SAN NICOLÁS



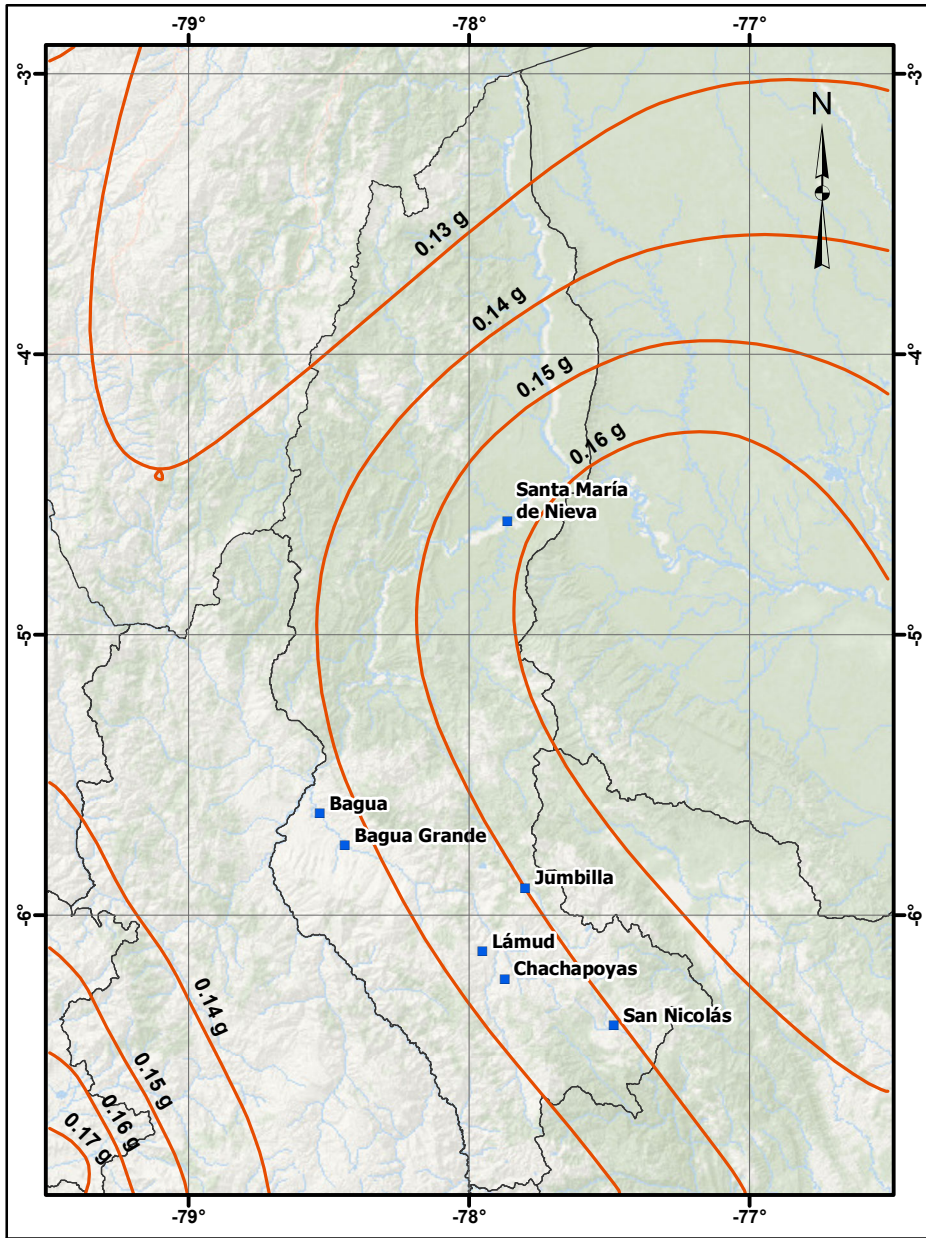
ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME - SUELO TIPO B

Tiempo de Exposición de 50 años - BAGUA GRANDE

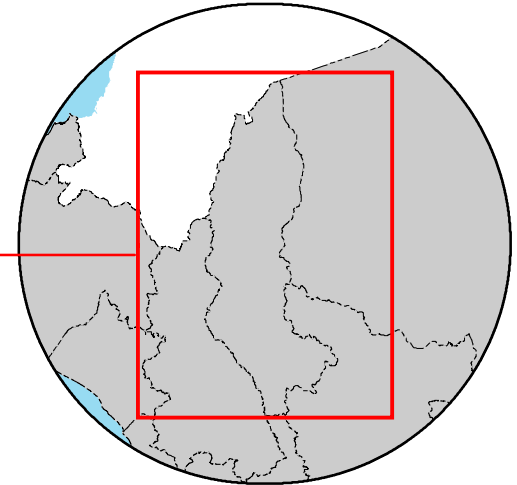


Anexo F: Mapas de isoaceleraciones espectrales

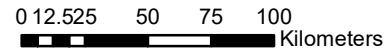
Anexo F.1: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 100$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

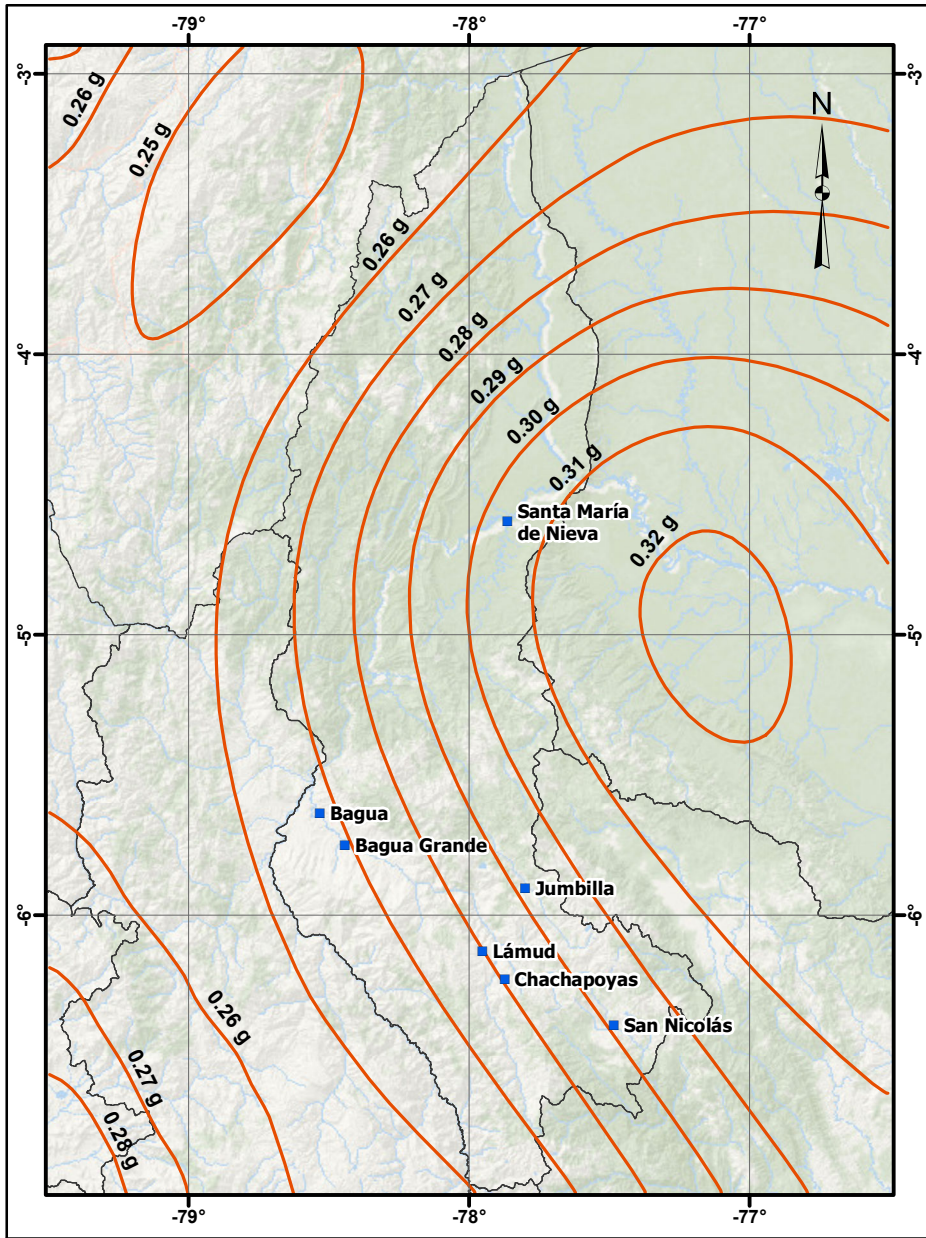
Periodo estructural T = 0.00 s (PGA)

Periodo de retorno Tr = 100 años

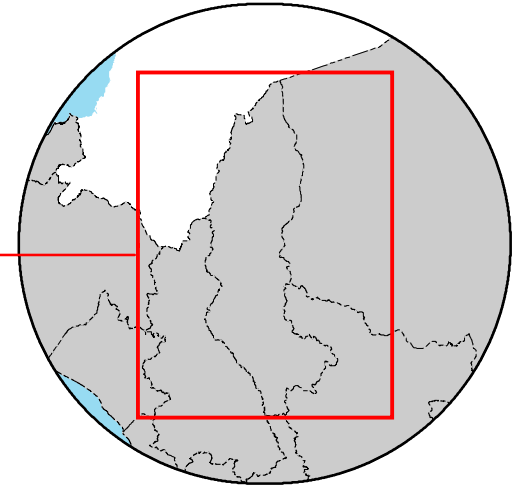


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

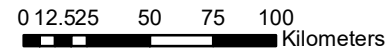
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.00 s (PGA) Tr = 100 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-04		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

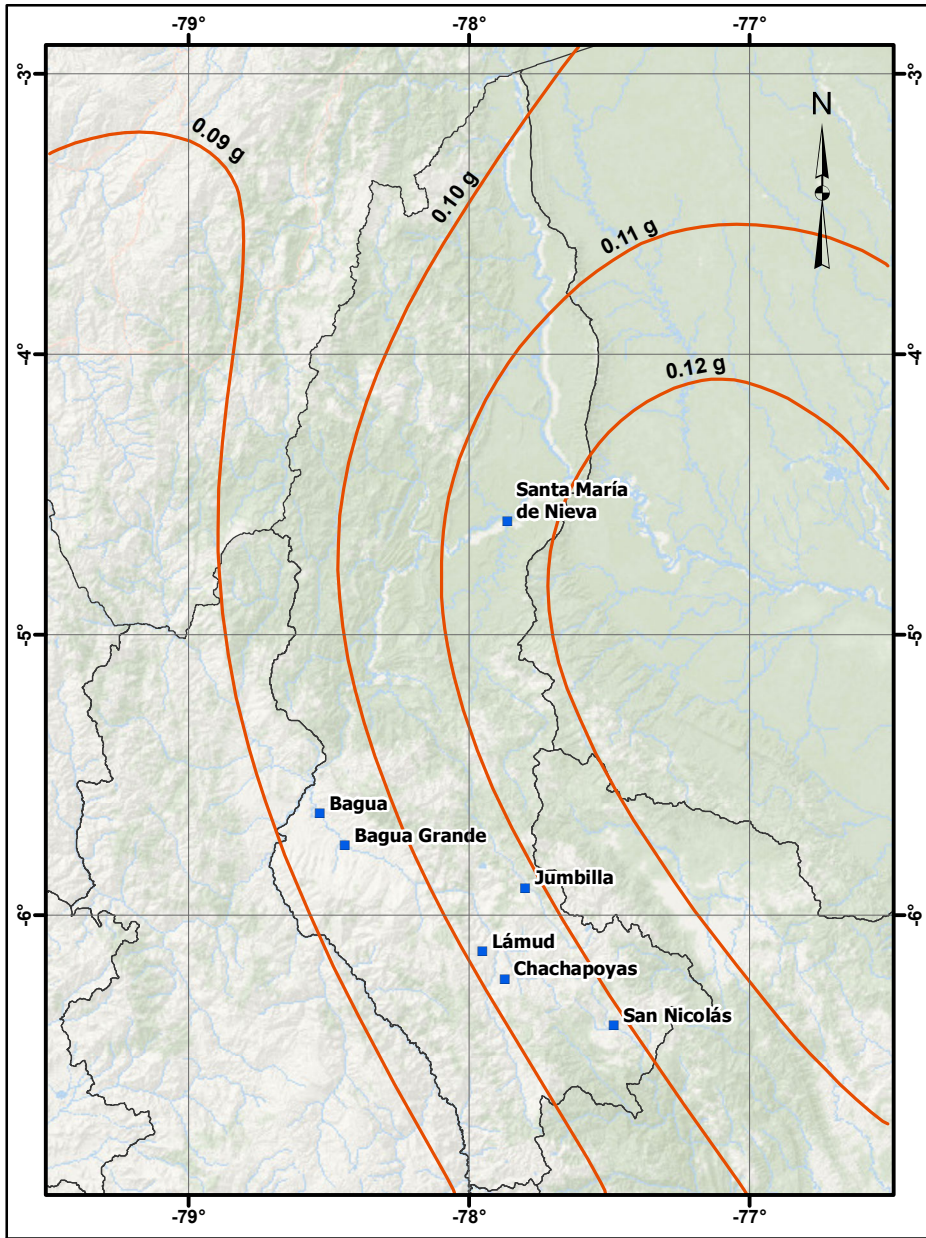
Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$

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

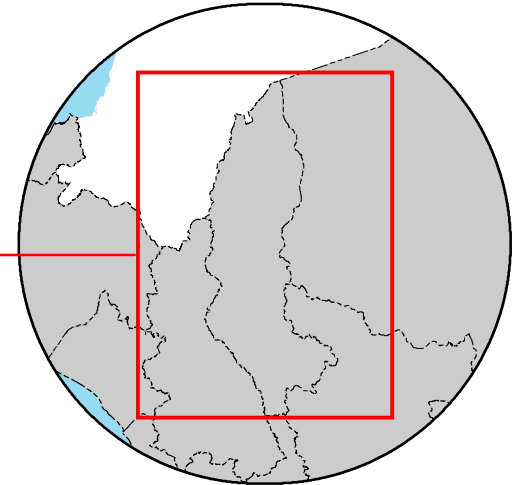


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

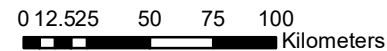
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.20 s Tr = 100 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS			FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-05



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

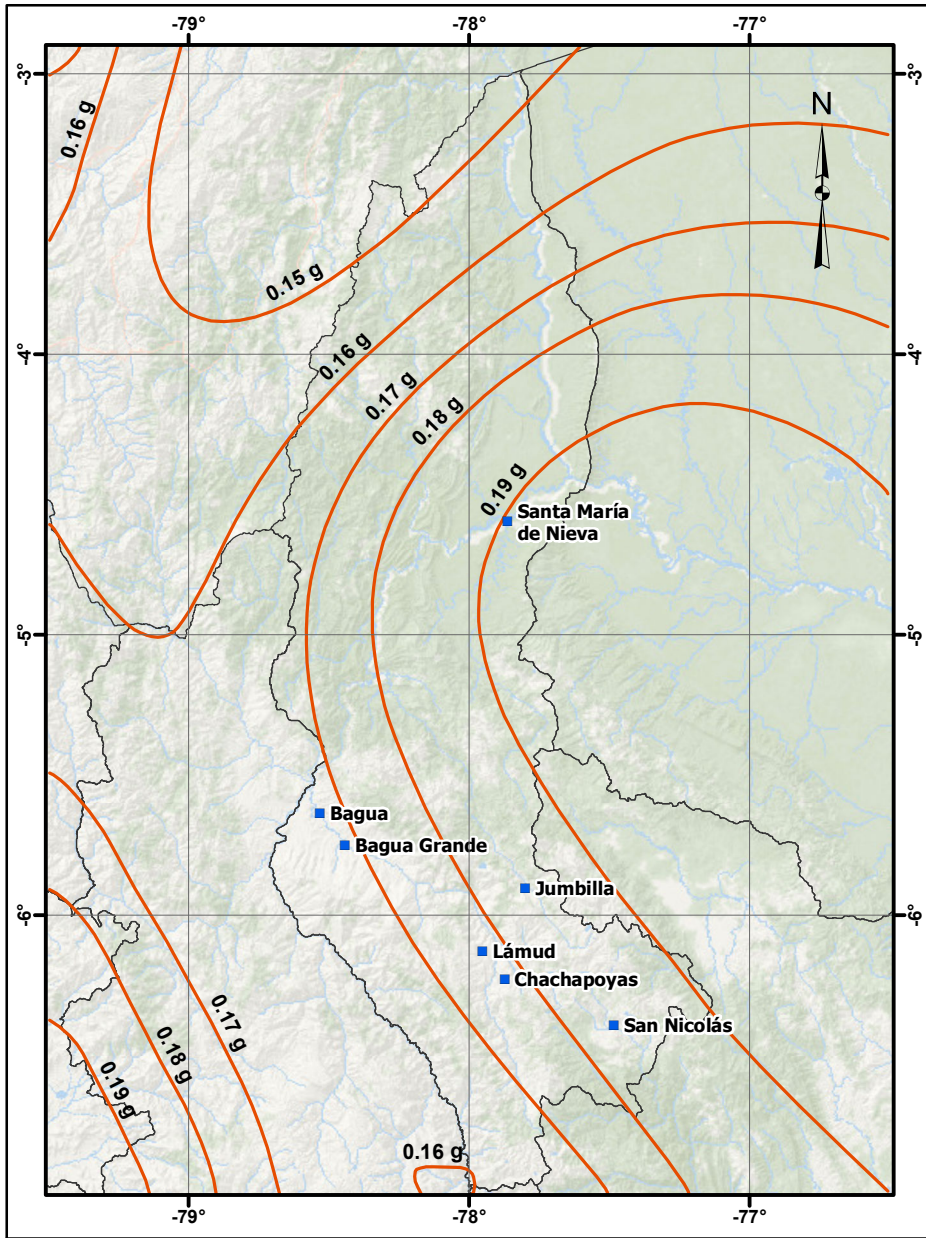
Periodo estructural T = 1.00 s
Periodo de retorno Tr = 100 años



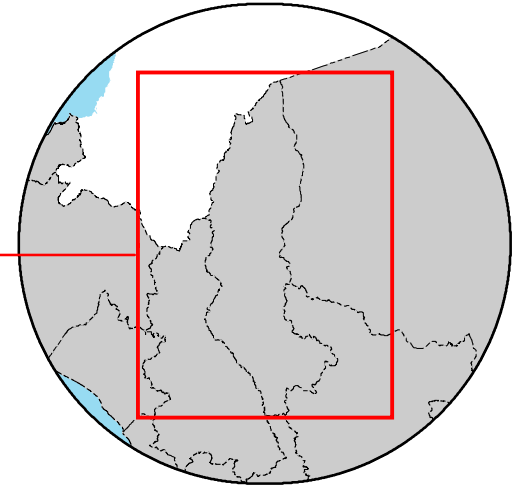
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 1.00 s Tr = 100 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-06		

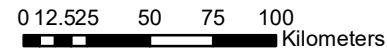
Anexo F.2: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 145$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

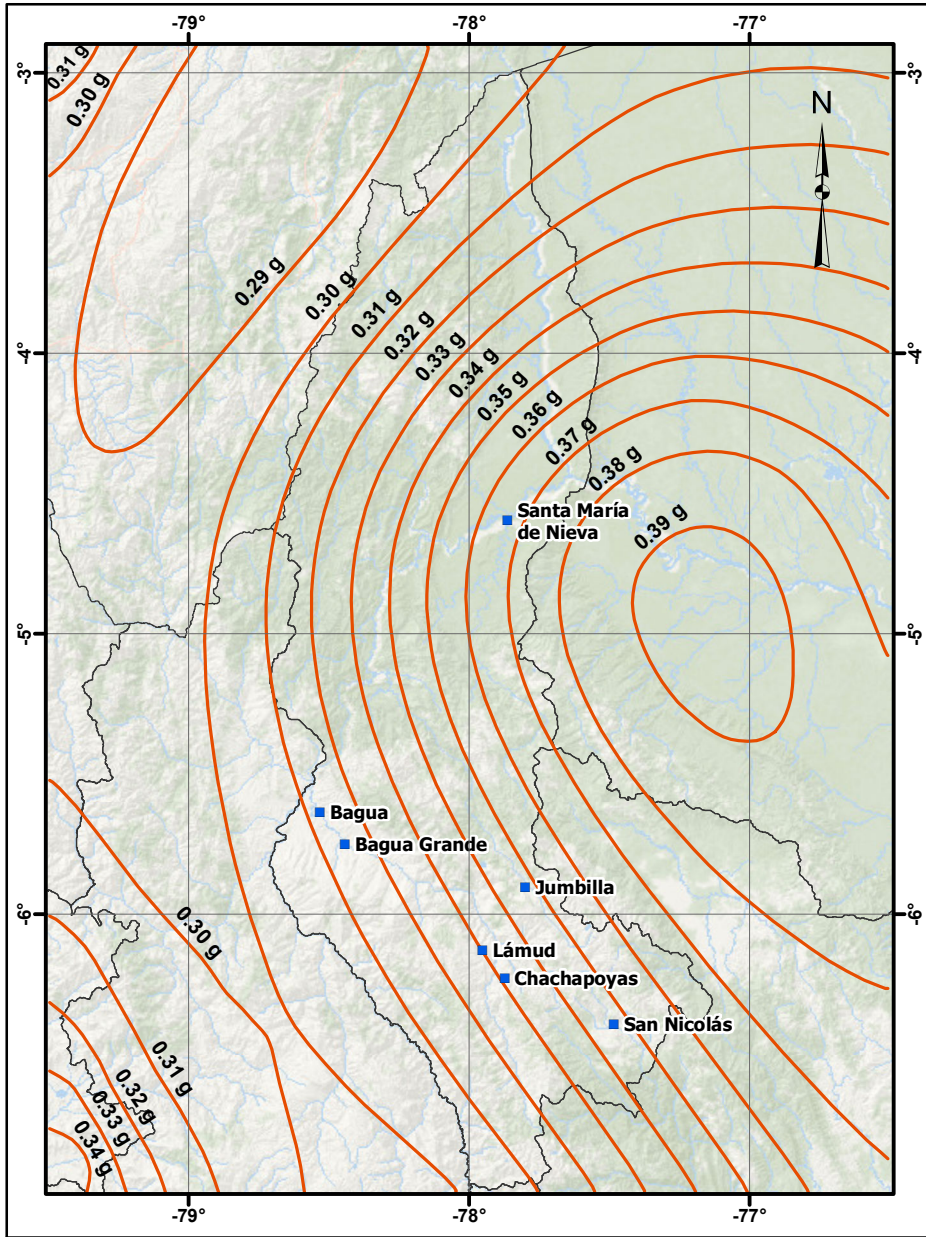
Periodo estructural T = 0.00 s (PGA)

Periodo de retorno Tr = 145 años

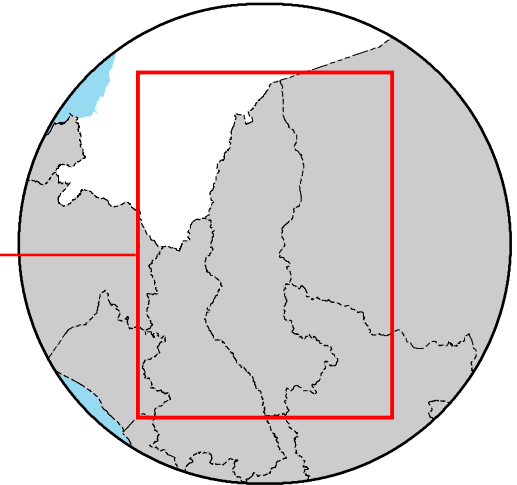


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

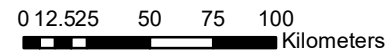
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.00 s (PGA) Tr = 145 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-07		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

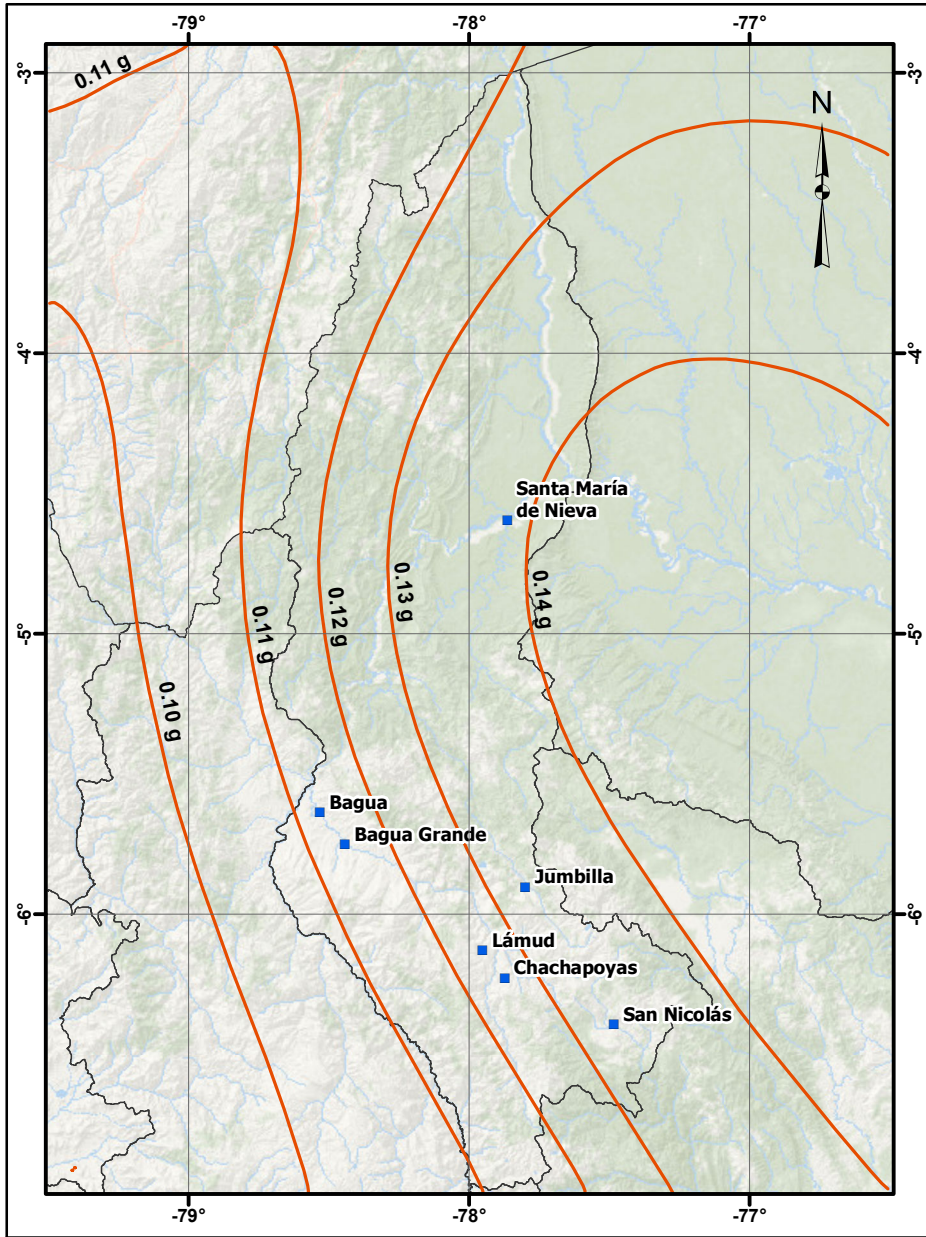
Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$

Periodo de retorno $T_r = 145 \text{ años}$

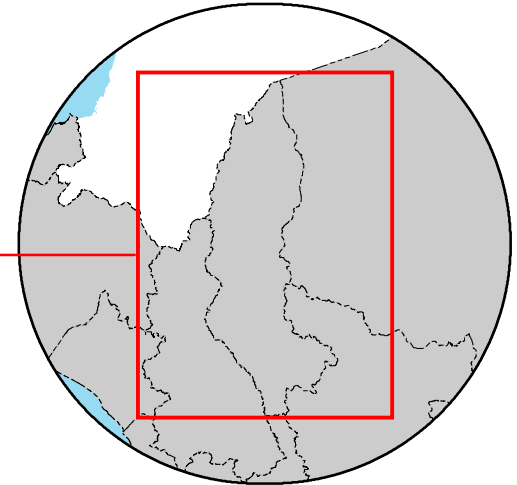


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

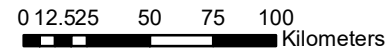
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.20 s Tr = 145 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS		FECHA JULIO-2023	CÓDIGO M-08



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

Periodo estructural $T = 1.00 \text{ s}$

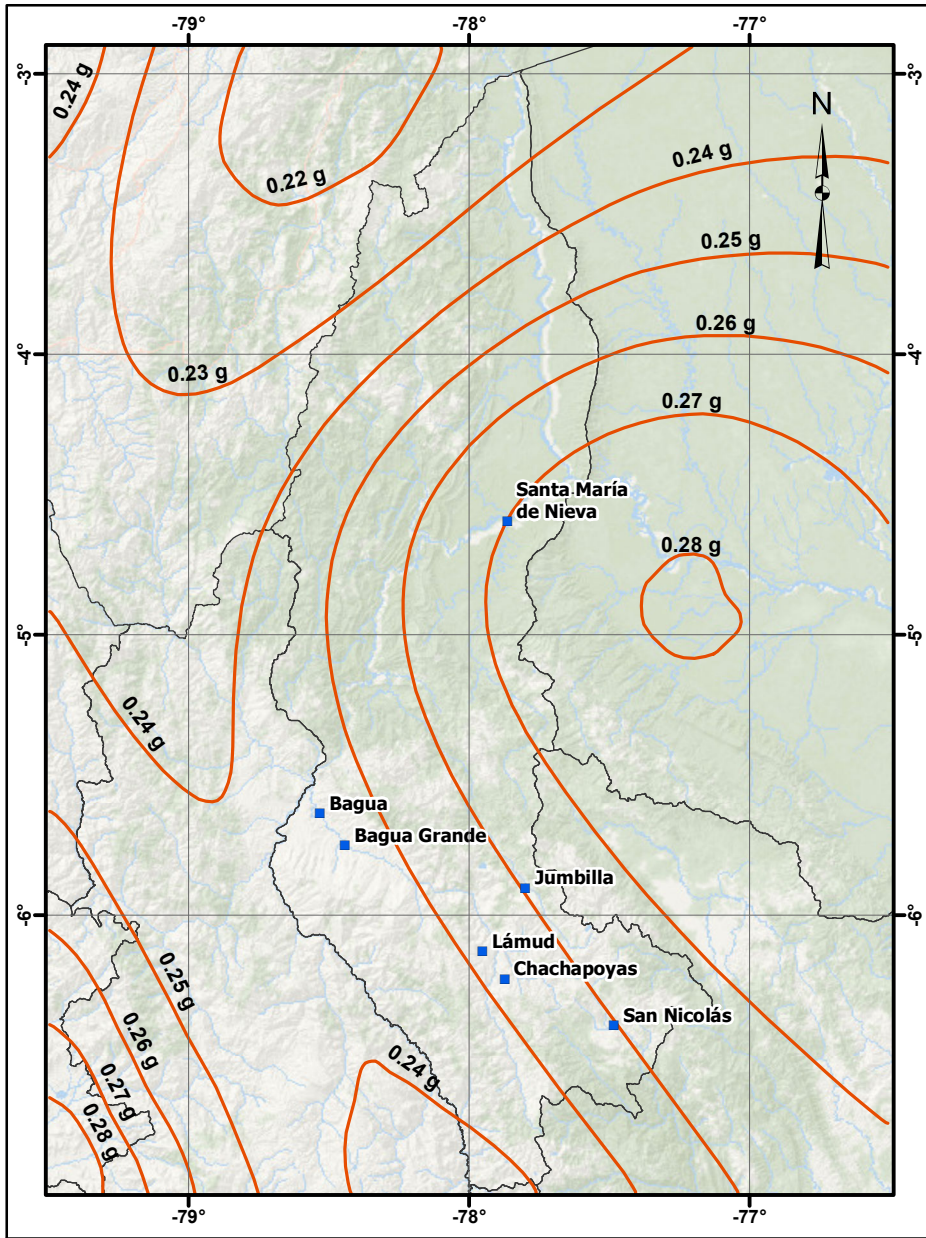
Periodo de retorno $T_r = 145 \text{ años}$



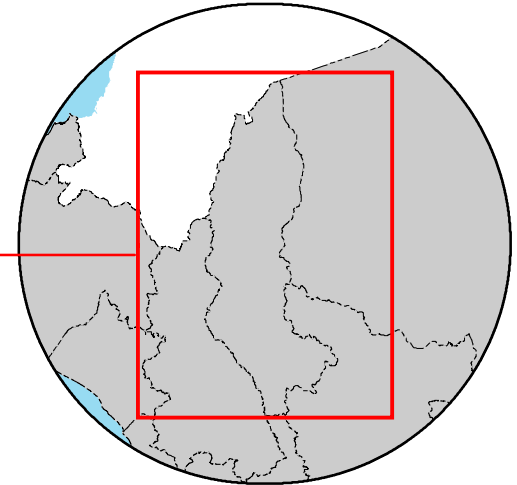
MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 1.00 s Tr = 145 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS			FECHA JULIO-2023

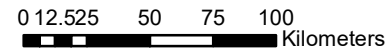
Anexo F.3: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 475$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

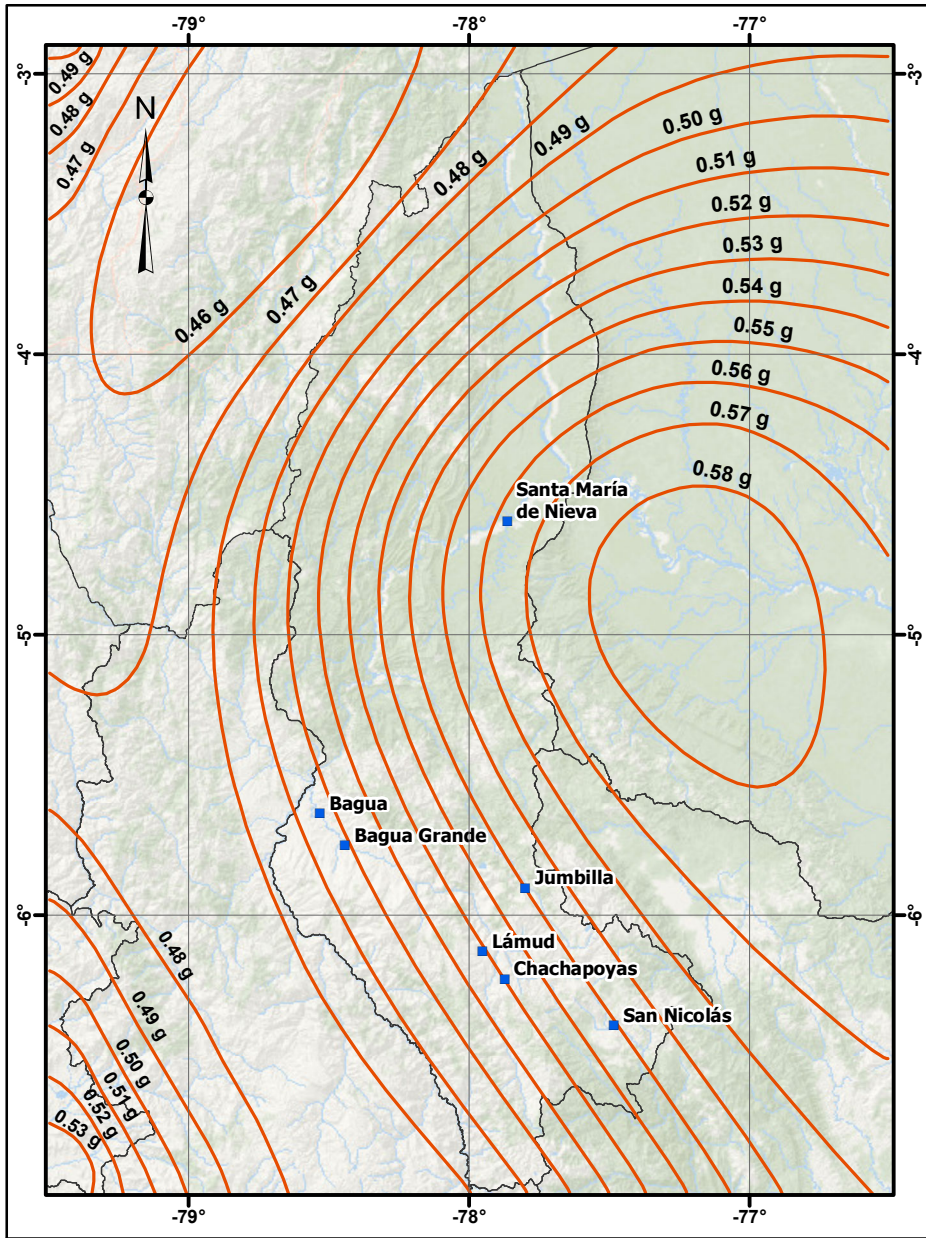
Periodo estructural $T = 0.00 \text{ s}$ (PGA)

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

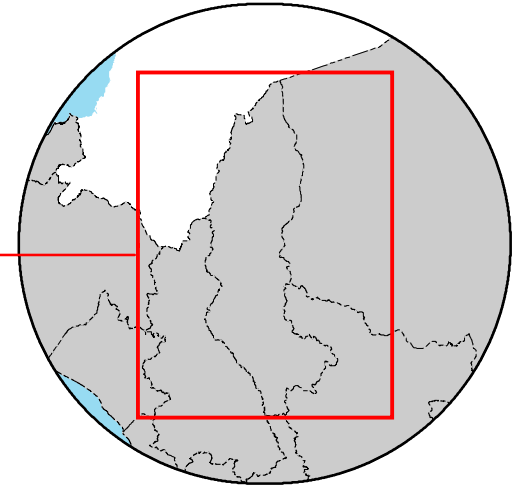


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.00 s (PGA) Tr = 475 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-10		



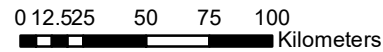
PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

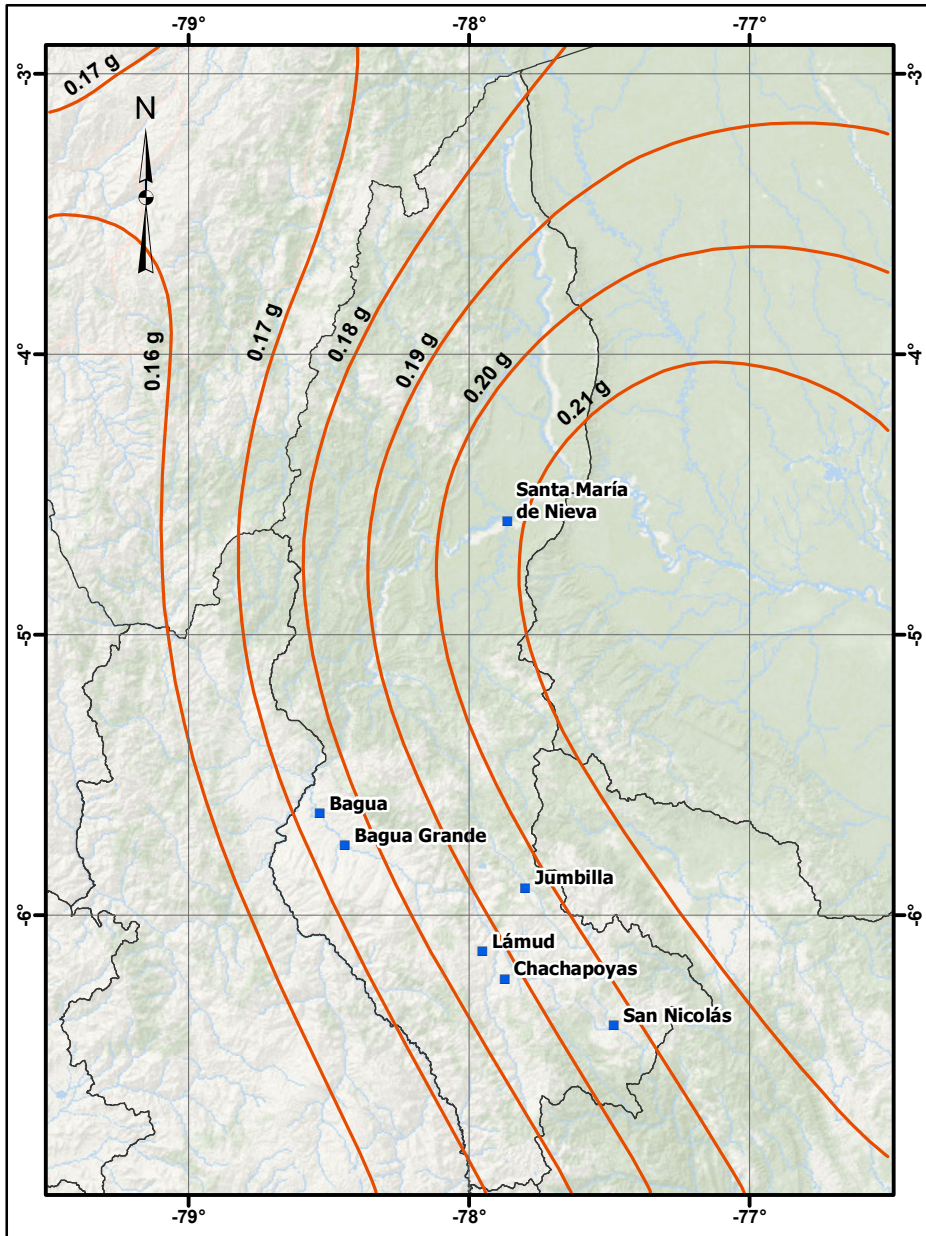


MAPA DE ISOACELERACIONES ESPECTRALES SUELO TIPO B (ROCA)

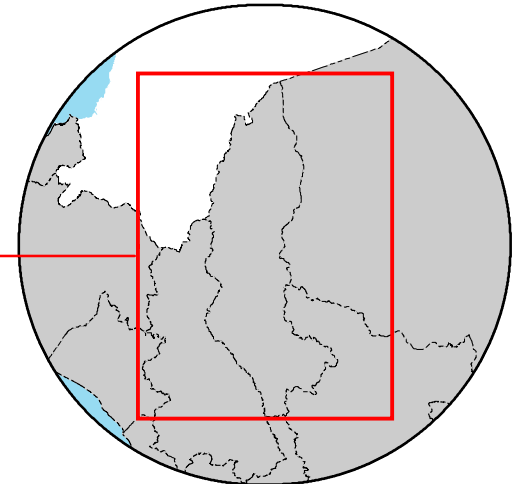
Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$

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

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR:	Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA:	SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS:	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO:	ISOACELERACIONES	TAMAÑO:	A4
	APROBADO POR:	Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA:	Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS			T = 0.20 s Tr = 475 AÑOS	FECHA	JULIO-2023	CÓDIGO



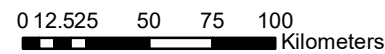
PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



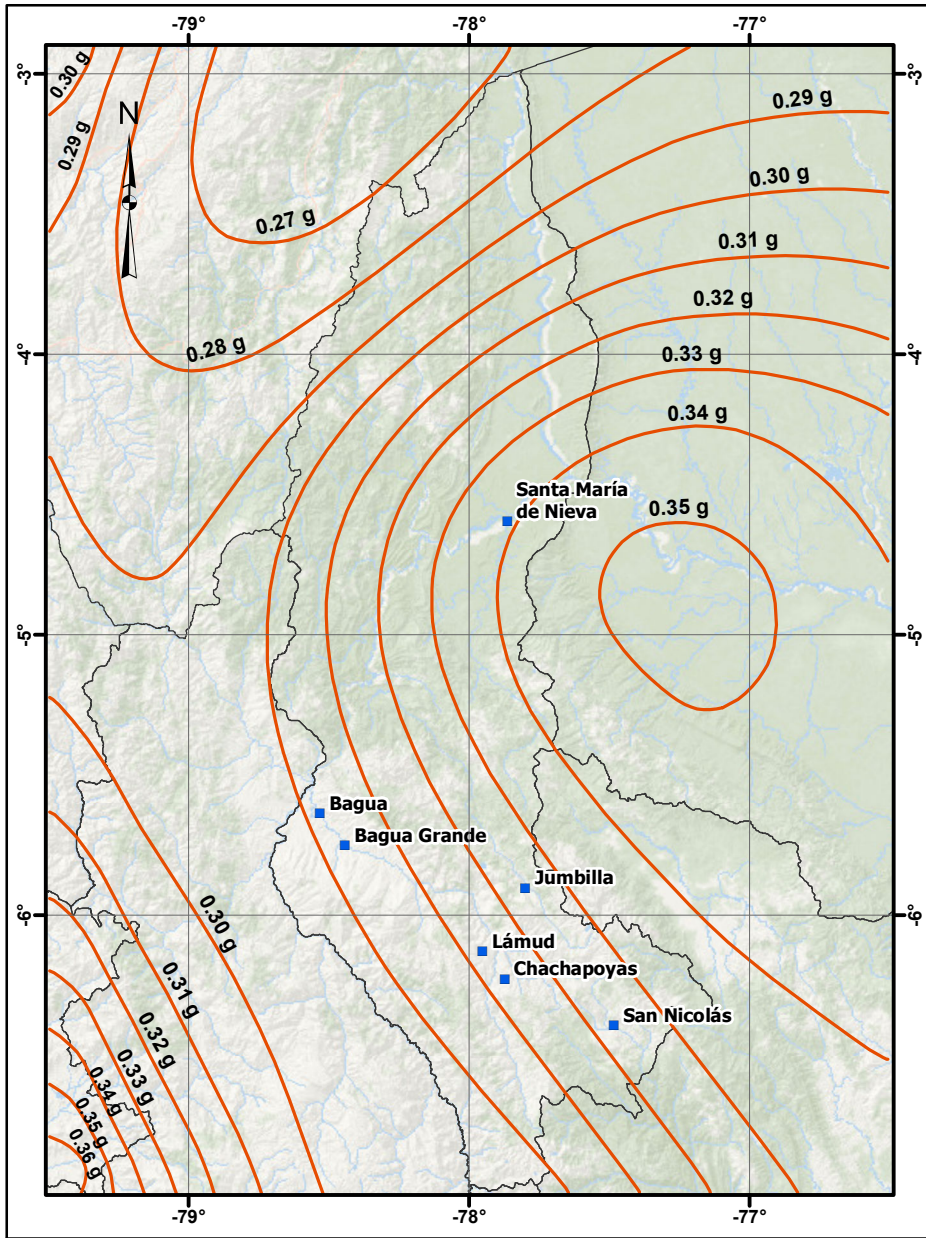
**MAPA DE ISOACELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)**

Periodo estructural $T = 1.00 \text{ s}$

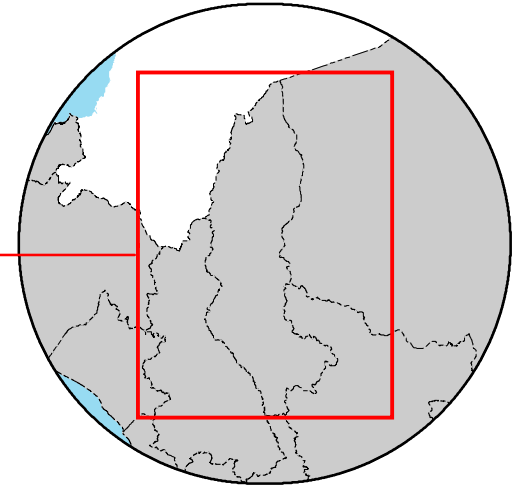
Periodo de retorno $T_r = 475 \text{ años}$

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 1.00 s Tr = 475 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS			FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-12

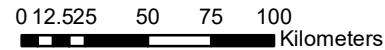
Anexo F.4: Isoaceleraciones espectrales $T_r = 975$ años



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

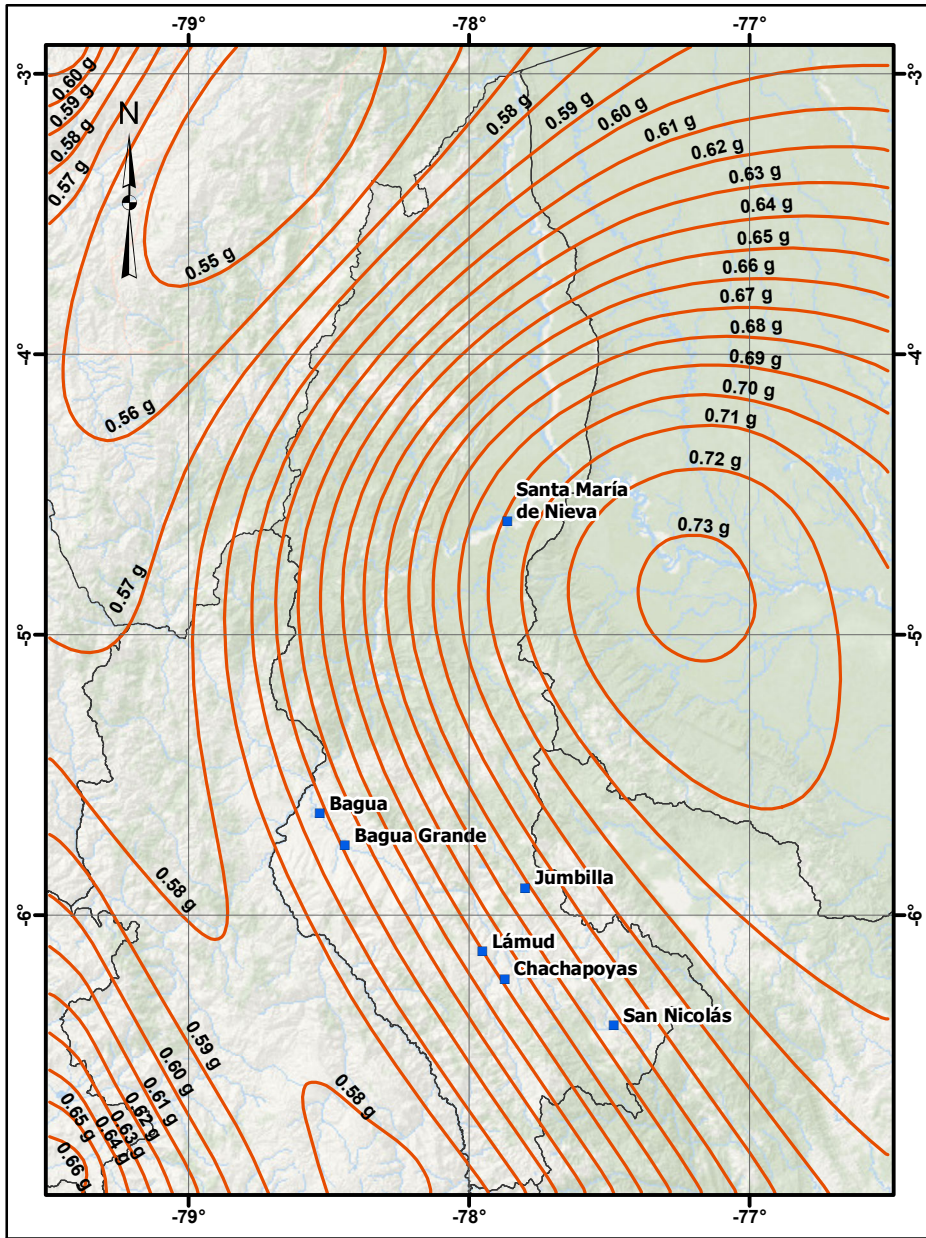
Periodo estructural T = 0.00 s (PGA)

Periodo de retorno Tr = 975 años

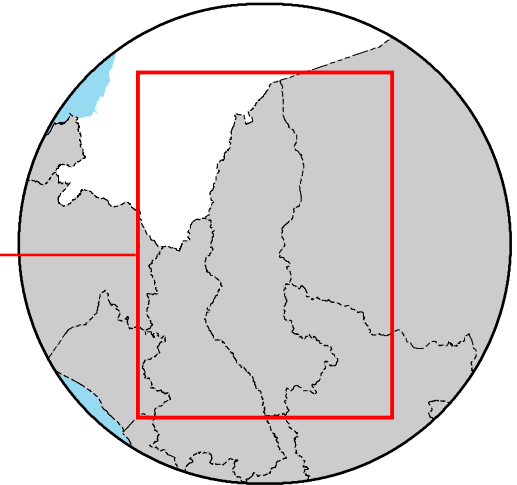


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

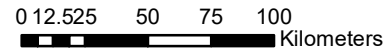
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0.00 s (PGA) Tr = 975 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-13		



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

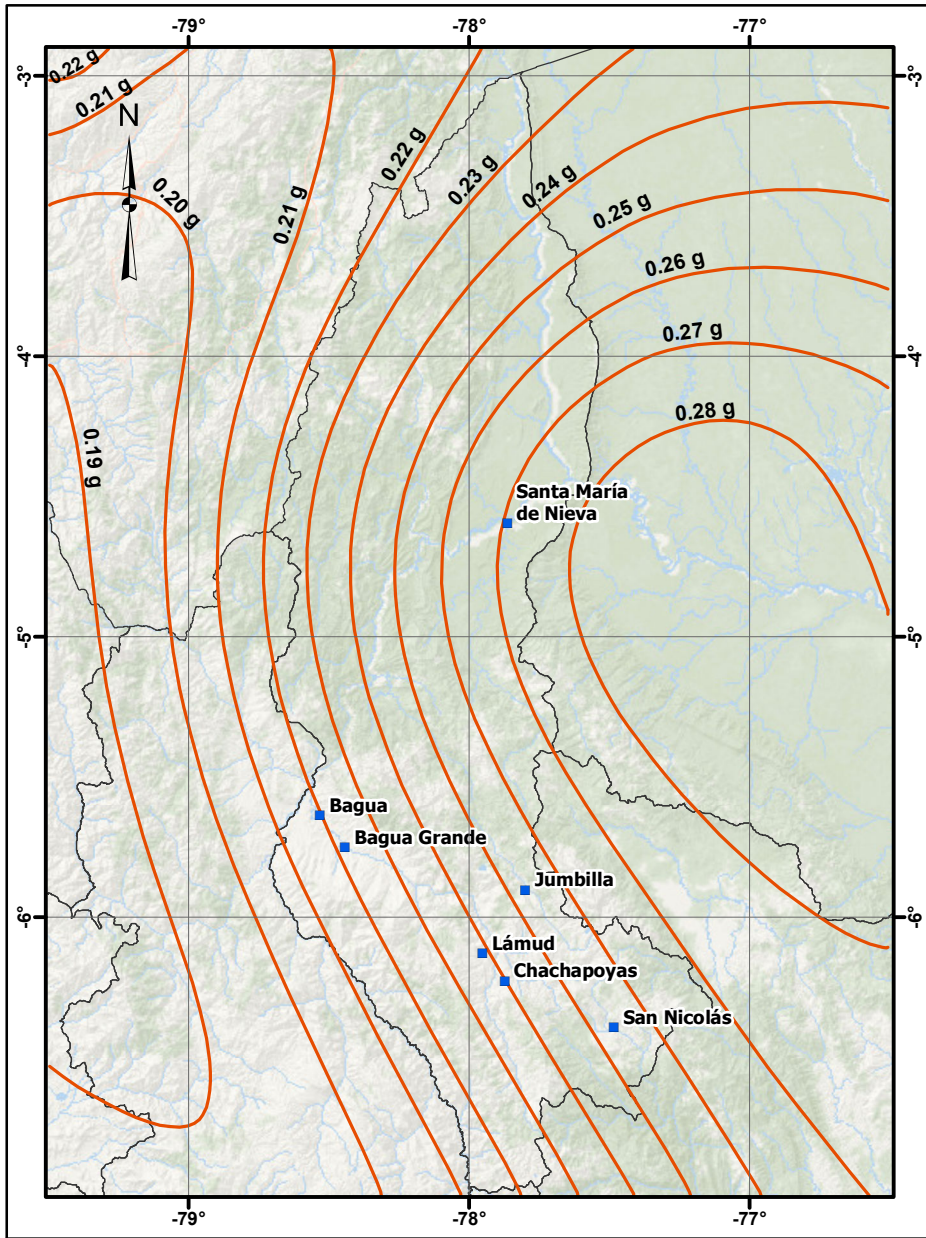
Periodo estructural $T = 0.20$ s

Periodo de retorno $T_r = 975$ años

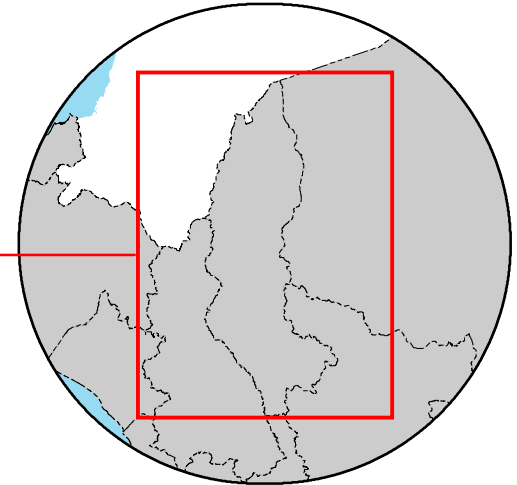


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS:	PLANO:	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	ISOACELERACIONES T = 0.20 s Tr = 975 AÑOS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-14



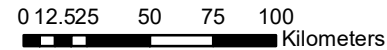
PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



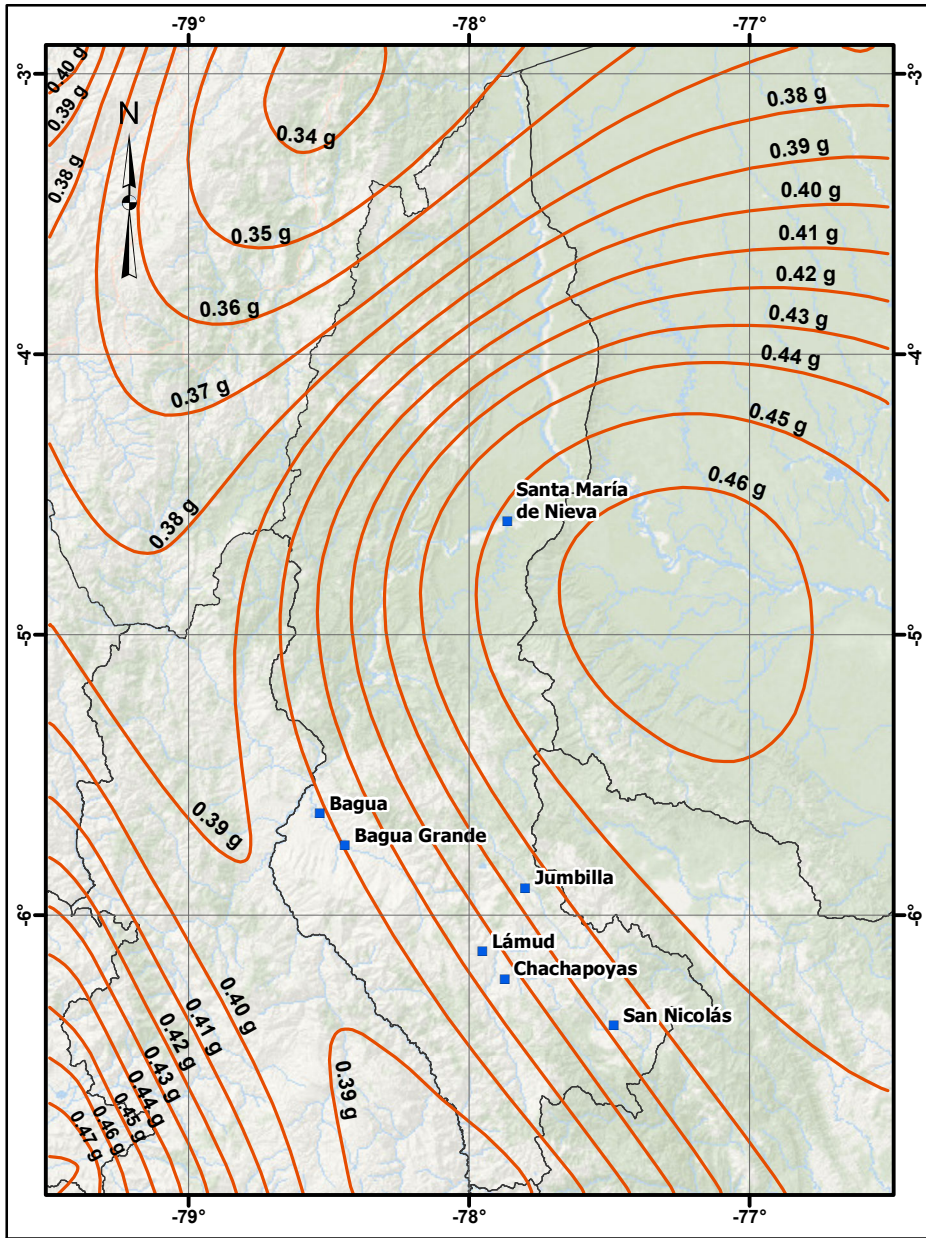
**MAPA DE ISOACELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)**

Periodo estructural T = 1.00 s

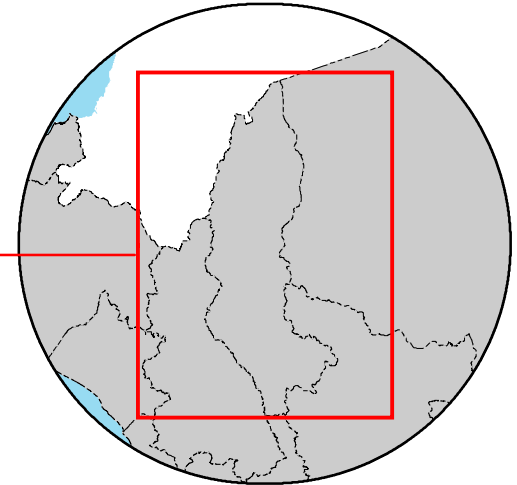
Periodo de retorno Tr = 975 años

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 1.00 s Tr = 975 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-15		

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



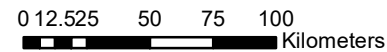
PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000

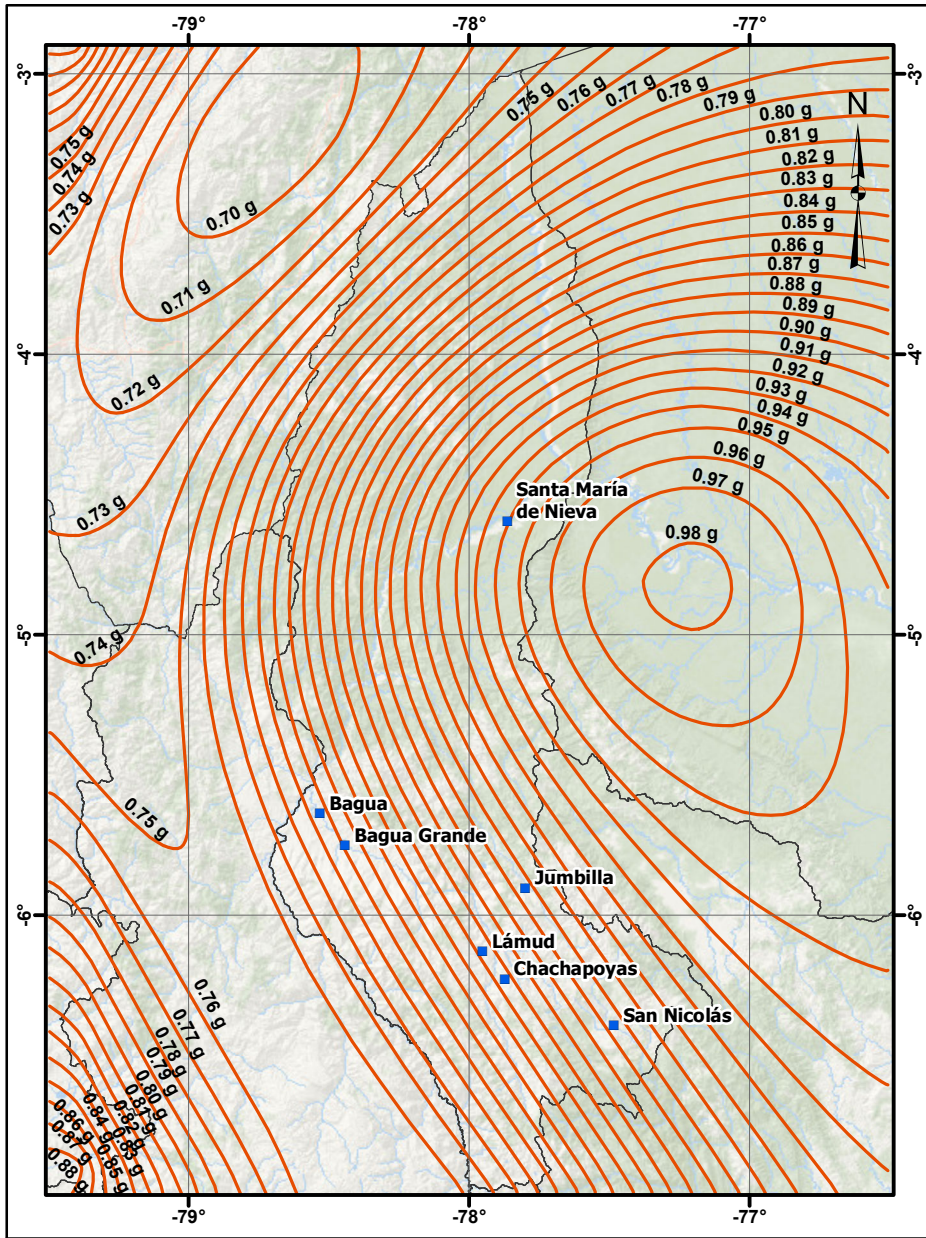


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

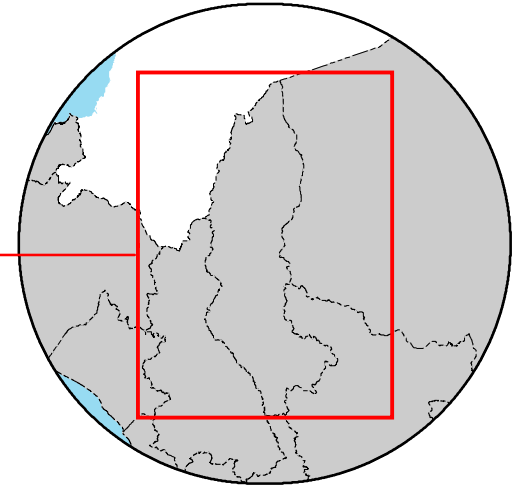


**MAPA DE ISOACELERACIONES
ESPECTRALES SUELO TIPO B
(ROCA)**
Periodo estructural $T = 0.00 \text{ s (PGA)}$
Periodo de retorno $Tr = 2475 \text{ años}$

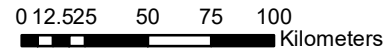
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 0,00 s (PGA) Tr = 2475 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS		FECHA JULIO-2023	CÓDIGO M-16



PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



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

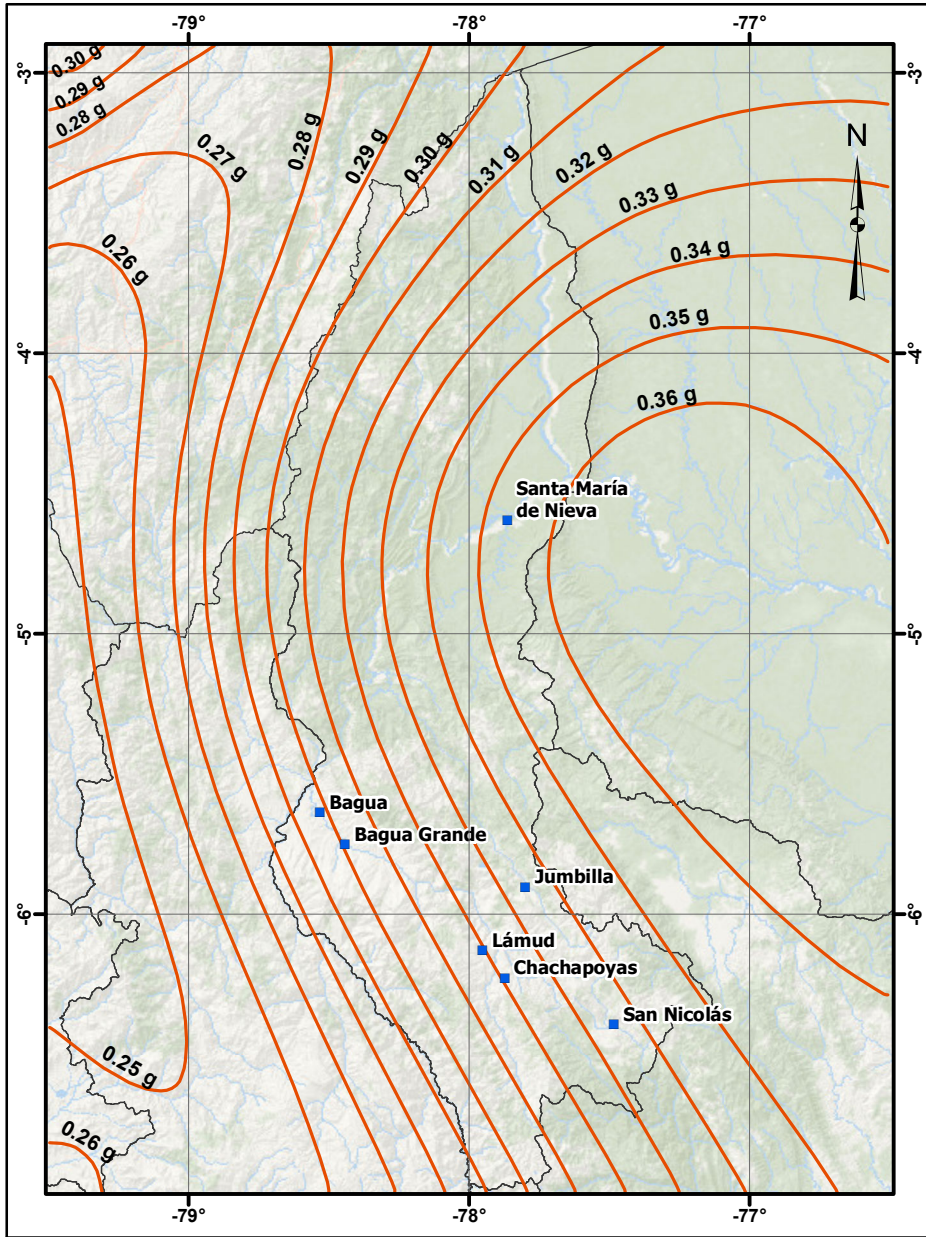
Periodo estructural $T = 0.20 \text{ s}$

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

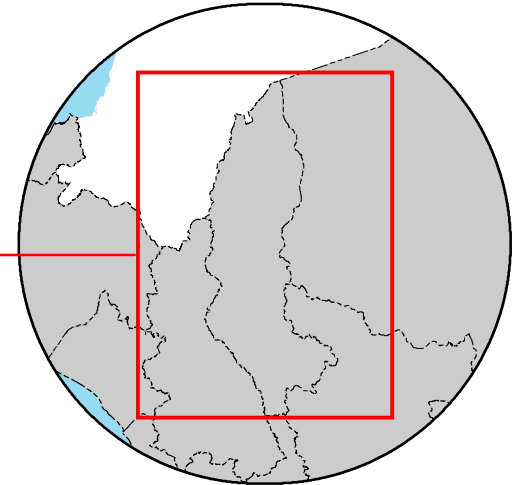


MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS:	PLANO:	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	ISOACELERACIONES T = 0.20 s Tr = 2475 AÑOS	FECHA JULIO-2023 CÓDIGO M-17



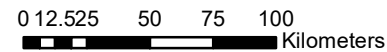
PLANO DE UBICACIÓN
Escala 1 / 3 000 000



PLANO DE LOCALIZACIÓN
Escala 1 / 10 000 000



MAPA DE UBICACIÓN
Escala 1 / 30 000 000



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

Periodo estructural $T = 1.00 \text{ s}$

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

UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA - AMAZONAS	ELABORADO POR: Bach. MIGUEL ANGEL RIVERA ROJAS	NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS DATUM WGS84	TESIS: EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL PELIGRO SÍSMICO DE LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ	PLANO: ISOACELERACIONES T = 1.00 s Tr = 2475 AÑOS	TAMAÑO: A4
	APROBADO POR: Ing. DANIEL VILLA ABANTO	REFERENCIA: Esri, Maxar, GeoEye Esri, Airbus DS, USGS		FECHA JULIO-2023	CÓDIGO M-18