

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA-
REGIÓN SAN MARTÍN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE
PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

AUTOR:

Bach. BURGOS MEDINA LENER

ASESOR:

Dr. Ing. QUISPE MAMANI CRISPÍN ZENÓN

Cajamarca- Perú

2023



Universidad
Nacional de
Cajamarca
"Núcleo de la Universidad Peruana"



CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

La que suscribe, Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca certifica:

La originalidad de la tesis denominada **CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA - REGIÓN SAN MARTÍN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ**, realizada por el Bachiller en Ingeniería Geológica **Lener Burgos Medina**, de acuerdo al resultado del análisis reportado por su asesor Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani con el software antiplagio Urkund que indica **4% (cuatro por ciento)** de índice de similitud, asignándole el código D172605142

Se expide el presente certificado para los fines pertinentes.

Cajamarca, 07 de agosto del 2023

Cc.
Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Dra. Yvonne Katherine Fernández León
DIRECTORA

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Cajamarca, especialmente a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, a los docentes que imparten sus conocimientos y experiencias en las aulas, quienes se esfuerzan en formar profesionales competentes e influyentes en la mejora de nuestra Cajamarca y el país. A todas aquellas personas que sin su apoyo no hubiese podido lograr concretar mi formación profesional, mención especial al Dr. Zenón Quispe por su asesoría en la presente tesis.

DEDICATORIA

A mis padres Genaro y Angelica, a cada uno de mis hermanos y familiares, soportes fundamentales en mi desarrollo personal y profesional, quienes me impartieron valores y principios para lograr ser una persona de bien y que sin su apoyo incondicional el cumplimiento de mis metas se hubiera truncado.

LENER. B. M

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.1.1 Antecedentes Internacionales	4
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	6
2.1.3 Antecedentes Locales	8
2.2 BASES TEÓRICAS.....	8
2.2.1 Estructura Interna de la Tierra.....	8
2.2.1.1 CORTEZA	10
2.2.1.2 MANTO.....	11
2.2.1.3 NUCLEO.....	11
2.2.2 Tectónica de Placas.....	13
2.2.2.1 Límites Convergentes	13
2.2.2.2 Límites Divergentes	14
2.2.2.3 Límites Transformantes	15

	Pág.
2.2.3 Fuentes de Energía	17
2.2.3.1 Flujo de Calor en la Corteza	17
2.2.3.2 Convección del Manto	18
2.2.4 Fallas Geológicas	19
2.2.5 Formas de Propagación de Energía Sísmica	23
2.2.5.1 Ondas Sísmicas.....	23
2.2.6 Parámetros que Caracterizan los Sismos.....	29
2.2.6.1 Intensidad Sísmica	30
2.2.6.2 Magnitud Sísmica	32
2.2.6.3 Momento Sísmico	35
2.2.7 Estimación de Parámetros Sismológicos de las Fuentes	
Sismogénicas	36
2.2.7.1 Determinación de Magnitud Máxima y Mínima.....	36
2.2.7.2 Atenuación de Ondas Sísmicas.....	37
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	38
CAPÍTULO III	40
MATERIALES Y METODOS	40
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
3.1.1 Geográfica	40
3.1.2 Política	40
3.1.3 Accesibilidad.....	40
3.1.4 Clima y Precipitación	41
3.2 PROCEDIMIENTOS	41
3.2.1 Metodología	41
3.2.1.1 Población de Estudio	42
3.2.1.2 Muestra.....	42

	Pág.
3.2.1.3	Unidad de Análisis 42
3.2.2	Identificación de Variables 42
3.2.3	Técnicas 42
3.2.3.1	Etapa preliminar de Gabinete 42
3.2.3.2	Etapa de Campo..... 43
3.2.3.3	Etapa de procesamiento de la información..... 43
3.2.4	Instrumentos y Equipos 43
3.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 44
3.3.1	Falla de Shitari..... 44
3.3.2	Anticlinal Naranjos 45
3.4	MARCO ESTRATIGRÁFICO 46
3.4.1	Grupo Mitu (PET- m)..... 46
3.4.2	Grupo Pucará 47
3.4.2.1	Formación Chambará (Ts-ch)..... 47
3.4.2.2	Formación Aramachay (Ji-a) 48
3.4.2.3	Formación Condorsinga (Ji-c) 50
3.4.3	Formación Sarayaquillo (Js-s) 52
3.4.4	Grupo Oriente (Ki-o) 54
3.4.4.1	Formación Cushabatay (Ki-cu) 54
3.4.4.2	Formación Agua Caliente (Ki-ac)..... 54
3.4.5	Formación Chonta (Kis-ch) 55
3.4.6	Formación Cachiyacu (Ks-c)..... 55
3.4.7	Formación Ipururo (Nmp-i)..... 56
3.4.8	Depósitos aluviales (Q-al)..... 56
3.4.9	Depósitos fluviales (Q-fl)..... 57
3.4.10	Depósitos Coluviales (Q-cl) 58

	Pág.
3.5	MARCO TECTÓNICO 59
3.5.1	Placa de Nazca..... 59
3.5.2	Placa sudamericana 59
3.5.3	Cordillera Norte..... 61
3.6	FUENTES SISMOGÉNICAS 63
3.7	CARACTERIZACIÓN DE LA SISMICIDAD O DISTRIBUCIÓN DE LOS SISMOS EN LA REGIÓN SAN MARTÍN 67
3.8	TRATAMIENTO Y ANÁLIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... 71
3.8.1.	DETERMINACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO..... 72
3.8.2.	DETERMINACIÓN DE LA ACELERACIÓN SÍSMICA PROBABILÍSTICA 90
	CAPÍTULO IV..... 92
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... 92
4.1	ANÁLISIS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD 92
4.2	ANÁLISIS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO A LA MAGNITUD..... 94
4.3	ANÁLISIS SÍSMICO DE PROFUNDIDAD- MAGNITUD 94
4.4	ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD DE LOS EVENTOS SÍSMICOS RELACIONADOS CON LA DISTANCIA A LA FOSA 95
4.5	ANÁLISIS DE LAS INTENSIDADES MODELADAS DE ACUERDO A LAS MAGNITUDES REGISTRADAS 97
4.6	ANÁLISIS DE LAS ACELERACIONES MODELADAS DE ACUERDO A LAS MAGNITUDES REGISTRADAS 98
4.7	CONTRASTACIÓN DE LA HIPOTESIS 99

	Pág.
CAPÍTULO V	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1 CONCLUSIONES	100
5.2 RECOMENDACIONES.....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	102
ANEXOS	106

ÍNDICE DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1: Características de los Límites de Placas (Ambientes Geotectónicos)	17
Tabla 2. Ubicación política de la zona de Investigación	40
Tabla 3 Accesibilidad desde la Ciudad de Cajamarca hacia la provincia de Rioja	40
Tabla 4. Tabla climática realizada con datos históricos de 1991 - 2021	41
Tabla 5. Clasificación de la Investigación.....	41
Tabla 6. Variables de estudio.....	42
Tabla 7. Descriptores de la falla de Shitari.....	44
Tabla 9. Coordenadas de la fuente sismogénica cortical F-27.....	66
Tabla 10. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas definidas por Aguilar, Roncal & Piedra., (2017).	66
Tabla 11. Coordenadas de la fuente sismogénica Intraplaca F-13.	66
Tabla 12. Valores de Intensidad determinada de acuerdo a las Magnitudes registradas.....	97
Tabla 13. Aceleraciones Pico determinadas en relación a las magnitudes registradas.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura Interna de la Tierra donde muestra las características físicas de cada capa. Modificado de (Marshak & Van der Pluijm, 2004).....	9
Figura 2. Sección transversal que muestra el interior de la tierra. Tomado de (Lutgens & Tarbuck, 2005).	9
Figura 3. Diagramación esquemática de la corteza bajo los continentes y océanos e identificación de las capas (Sial y Sima) de la corteza continental. Modificado de (Read & Watson, 1973).....	10
Figura 4. Distribución porcentual de los elementos que componen la corteza terrestre.	11
Figura 5. Estructura interna de la Tierra. Modificado de (Marshak & Van der Pluijm, 2004).....	12
Figura 6. Variaciones en la velocidad de las ondas P y S con la profundidad, variaciones que determinan las características principales del interior de la Tierra (Lutgens & Tarbuck, 2005).	13
Figura 7. Margen continental activo, y proceso de formación del prisma de acreción (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	14
Figura 8. Proceso extensivo de apertura de rift y formación de corteza oceánica (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	15
Figura 9. Placas tectónicas que conforman la corteza terrestre y su comportamiento en sus límites (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	16
Figura 10. Gradiente geotérmica basado en datos Kent C. Condie (Lutgens & Tarbuck, 2005).	18
Figura 11. Modelo del flujo convectivo del manto (Lutgens & Tarbuck, 2005).	19
Figura 12. Geometría de una falla y origen de un sismo (Cahiari, 2008).	21
Figura 13. Bloque diagrama donde muestra los esfuerzos y el comportamiento de los bloques actuantes (Lutgens & Tarbuck, 2005).	21
Figura 14. Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla inversa (Lutgens & Tarbuck, 2005).	22

Figura 15. Desarrollo idealizado del proceso de cabalgamiento (Lutgens & Tarbuck, 2005).	22
Figura 16. Diagrama que ilustra el desplazamiento horizontal, evidenciando una falla de rumbo dextral (Lutgens & Tarbuck, 2005).	23
Figura 17. Principales ondas sísmicas con propósitos de ingeniería (Kuroiwa, 2002).	24
Figura 18. Sismograma donde se aprecia el intervalo de tiempo de llegada de la onda P y la onda S (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	24
Figura 19. Tipos de ondas de cuerpo o volumen y su movimiento característico (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	26
Figura 20. Componentes de la onda S (Herráiz, 1997)	27
Figura 21. Representación distancia-tiempo, utilizada para determinar el epicentro. (Lutgens & Tarbuck, 2005).	27
Figura 22. Tipos de ondas de superficiales y la forma de movimiento que propagan (Lutgens & Tarbuck, 2005).	28
Figura 23. Descripción de la localización de un evento sísmico.....	29
Figura 24. Mapa de Isosistas generadas con la información del sismo ocurrido en Moyobamba el 30 de mayo de 1990 (Cahuari, 2008)...	32
Figura 25. Determinación gráfica de la magnitud local de un sismo a partir de la amplitud y la distancia del foco a un sismógrafo Wood- Anderson (Lutgens & Tarbuck, 2005).....	34
Figura 26. Mapa Geológico del anticlinal Naranjos. (Chumpitaz, Chacaltana, & Valdivia, 2015).	46
Figura 27. Estratigrafía del Grupo Pucará de la sección del río Utcubamba (Prinz, 1985).....	52
Figura 28. Esquema de los dos tipos de subducción en el Perú (subhorizontal y normal) y ubicación de la dorsal de Nazca.....	60
Figura 29. Cordilleras que conforman los andes peruanos.	62
Figura 30. Fuentes sismogénicas de subducción interfase y corticales	64
Figura 32. Fuentes sismogénicas de subducción de Intraplaca.	65
Figura 35. Esquema de los tipos de sismos que ocurren en zonas de convergencia de placas: Placas de Nazca y Sudamericana.	68

Figura 36. Ocurrencia de sismicidad superficial o cortical en el norte del Perú desde 1960, de acuerdo al catálogo sísmico actualizado en 2022.	69
Figura 37. Sismicidad intermedia en el norte del Perú desde 1960, de acuerdo al catálogo sísmico actualizado.	70
Figura 38. Estaciones de monitoreo cercanas a la Provincia de Rioja.....	71
Figura 39. Curvas de isovalores estimadas para el sismo registrado 08/06/1990 a las 20:14 a 3Km al E de la ciudad de Rioja de magnitud 5.5 Mw a 25.6km de profundidad. Generando intensidades de VI MMI al sur de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI en la parte central donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.....	72
Figura 40. Curvas de isovalores estimadas para el sismo registrado 05/04/1991 a la 00:01 a 20Km al NW de la ciudad de Segunda Jerusalén de magnitud 5.5 Mw a 24.1km de profundidad. Generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al límite Oeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.....	73
Figura 41. Curvas de Isovalores estimadas para el sismo registrado el 09/08/1982 a las 23:51, magnitud 5.5 Mw a 33km de profundidad, epicentro a 71Km al N de la ciudad de Segunda Jerusalén. Generando Intensidades de V MMI cerca al epicentro y de IV MMI al extremo Este de Rioja donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones. y valores de aceleración de hasta 2% en sentido longitudinal de la gran parte de la provincia.	74
Figura 42. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 19/05/1979 a las 20:43, magnitud 5.7 Mw a 33km de profundidad, epicentro a 5 Km al SE del Poblado de Churuja. Donde las intensidades generadas son de V MMI cerca al epicentro y de IV	

	MMI en el extremo Oeste de Rioja donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.	75
Figura 43.	Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 30/05/1990 a las 11:49, magnitud 5.7 Mw a 21.5 km de profundidad, epicentro a 6 Km al NE de la ciudad de Rioja generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al Noroeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.....	76
Figura 44.	Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 20/06/1968 a las 19:26, magnitud 5.7 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 31 Km al N de la ciudad de Segunda Jerusalén generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al Noroeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.....	77
Figura 45.	Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 15/08/1975 a las 19:53, magnitud 5.7 Mw a 123 km de profundidad, epicentro a 47 Km al SW de la ciudad de Lagunas generando intensidades de V MMI al Este de Rioja, que puede ser sentido por todas las personas, atenuándose hasta IV MMI en la parte central donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.....	78
Figura 46.	Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 10/09/2016 a las 05:08, magnitud 6.1 Mw a 121 km de profundidad, epicentro a 51 Km al N de la ciudad de Moyobamba, generando intensidades de IV MMI, interpretado como un movimiento moderado que puede ser sentido por las personas que están en el interior de las edificaciones.....	79
Figura 47.	Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 16/04/1953 a las 19:02, magnitud 6.1 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 52 Km al SW de la ciudad de Barranca generando	

intensidades de VI MMI en el epicentro pero que se atenúan hasta valores de 3.5 al Oeste de Rioja, interpretado como sacudidas ligeras que pueden ser sentidas en los niveles superiores de las edificaciones..... 80

Figura 48. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 20/03/1972 a las 02:33, magnitud 6.4Mw a 55 km de profundidad, epicentro a 10 Km al NE den la ciudad de Saposoa generando intensidades de VI MMI en el epicentro hasta IV MMI en la parte central de Rioja donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones..... 81

Figura 49. Curvas de Isovalores estimados para el sismo registrado el 12/04/1963 a las 21:20, magnitud 6.5 Mw a 119.8 km de profundidad, epicentro a 17 Km al NE de la ciudad de Tabalosos, generando intensidades de V MMI en el epicentro hasta IV MMI en la parte norte de Rioja donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones. 82

Figura 50. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 04/04/1991 a las 10:23, magnitud 6.5 Mw a 20.7 km de profundidad, epicentro a 4Km al NE de la ciudad de Rioja, generando intensidades de 6.5 en el epicentro, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta IV MMI donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones..... 83

Figura 51. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 29/05/1990 a las 21:34, magnitud 6.6 Mw a 24 km de profundidad, epicentro a 6Km al SE de la ciudad de Segunda Jerusalén, generando intensidades de VI MMI en el epicentro siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas..... 84

Figura 52. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 19/06/1968 a las 03:13, magnitud 6.8 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 46 Km al NE de Segunda Jerusalén,

generando intensidades de VI siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes, atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas..... 85

Figura 53. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 18/05/2010 a las 23:15, magnitud 6 Mw a 132 km de profundidad, epicentro a 83 Km al NE de Yambrasbamba, generando intensidades de IV, sentido en la provincia de Rioja con intensidad de III MMI, descrito como un movimiento ligero que puede ser sentido por algunas personas en el interior de las edificaciones..... 86

Figura 54. Curva de isovalores estimados para el sismo registrado el 12/04/1983 a las 7:07, magnitud 7 Mw a 104.2 km de profundidad, epicentro a 92 Km al NE de La Peca, generando intensidades de V al norte y IV MMI al sur de la provincia de Rioja, descrito como un movimiento sentido por toda la población..... 87

Figura 55. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 04/04/1991 a las 23:19, magnitud 7.1Mw a 19.8 km de profundidad, epicentro a 11 Km al NE de Rioja, generando intensidades de VI al Sur de la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose con dirección al Sur hasta IV MMI donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones..... 88

Figura 56. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 25/09/2005 a las 20:55, magnitud 7.5 Mw a 115 km de profundidad, epicentro a 39 Km al NW de Yurimaguas, generando intensidades de VI hasta la parte central de la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes atenuándose hacia el Oeste hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas..... 89

Figura 57. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 28/11/2022 a las 05:52, magnitud 7.5 Mw a 126 km de profundidad, epicentro a 43 Km al NW de Barranca, generando intensidad de

VI en toda la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes.	90
Figura 58. Valores de aceleración espectral obtenidas en el programa R-CRISIS.....	91
Figura 59. Ubicación de la sección A-B en el Norte del Perú, tomado para analizar el proceso de subducción de acuerdo a la sismicidad registrada.	96

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Cm	: Centímetros
CISMID	: Centro de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres.
IGP	: Instituto Geofísico del Perú
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
Km	: Kilómetros
Mb	: magnitud de ondas de volumen
MI	: Magnitud Local
MMI	: Escala de intensidad de Mercalli Modificada
Mo	: Momento sísmico
Ms	: Magnitud de ondas superficiales
Mw	: Magnitud de momento.
PGA	: Aceleración Pico del Terreno.
Pág	: Página
RSN	: Red Sismológica Nacional
S	: segundo
USGS	: Servicio Geológico de Estados Unidos
NO	: Nor Oeste
SE	: Sur Este
NE:	: Nor Este
SO	: Sur Oeste

RESUMEN

La investigación expone las características sismológicas de la provincia de Rioja-región San Martín las cuales determinan su ubicación en la zona 3 del mapa de peligro sísmico probabilístico del Perú, teniendo como objetivo llevar a cabo la caracterización sismológica de la provincia de Rioja a partir de la compilación y análisis de datos sísmicos desde 1960 hasta 2022, definiendo así valores de aceleración e intensidad, empleando para ello el método de análisis-síntesis, y teniendo como base fundamental de la investigación los estudios de peligro sísmico nacional realizados por el IGP, data sísmica de USGS-IGP y estudios geológicos locales, específicamente, el análisis de los datos sismológicos del catálogo sísmico, fuentes sismogénicas generadoras de la sismicidad en la región San Martín y alrededores, así como la ubicación de sismos superficiales las cuales pueden ser relacionados a fallas sismogénicas no visibles en superficie. Concluyendo que los elementos influyentes en la sismicidad local son las placas de Nazca y sudamericana que derivan en las fuentes sismogénicas F-27, F-13 responsables de la sismicidad cortical e intraplaca intermedia respectivamente y el sistema de fallas activas de Shitari, siendo generadores de sismos de magnitud menor o igual a 7.5Mw con profundidades de hasta 292km, intensidades máximas de VI MMI y aceleraciones de 20% y 341 cm/s² que sufrió y/o que podría sentir el territorio Riojano, destacando la zona sur de la provincia como el área con mayor sismicidad registrada.

Palabras clave: Sismología, Placas Tectónicas, Intensidad, Magnitud, Aceleración Pico.

ABSTRACT

The research exposes the seismological characteristics of the province of Rioja - San Martín region which determine its location in zone 3 of the probabilistic seismic hazard map of Peru, with the objective of carrying out the seismological characterization of the province of Rioja from the compilation and analysis of seismic data from 1960 to 2022, thus defining acceleration and intensity values, using the analysis-synthesis method for this, and having as a fundamental basis of the investigation the national seismic hazard studies carried out by the IGP, data USGS-IGP seismic and local geological studies, specifically, the analysis of seismological data from the seismic catalog, seismogenic sources generating seismicity in the San Martín region and surroundings, as well as the location of surface earthquakes which can be related to faults They cannot be seen on the surface. Concluding that the predominant elements in the local seismicity are the Nazca and South American plates that derive from the seismogenic sources F-27, F-13 responsible for the intermediate crustal and intraplate seismicity respectively and the Shitari active fault system, being generators of earthquake of magnitude less than or equal to 7.5Mw with depths of up to 292km, maximum intensities of VI MMI and accelerations of 20% and 341 cm/s² that the Riojan territory suffered and/or could feel, highlighting the southern area of the province as the area with the highest recorded seismicity.

Keywords: Seismology, Plate Tectonics, Intensity, Magnitude, Peak Acceleration.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La geodinámica interna que modela la corteza terrestre es un conjunto proceso donde el movimiento de grandes masas litosféricas (placas tectónicas) origina cadenas montañosas (orogénesis) y con ello la deformación y fractura la corteza terrestre (Herráiz, 1997) pudiendo considerar como fuente primaria de la generación de sismos. Además, se considera como fuente sismogénica secundaria la actividad de las fallas geológicas regionales.

En Sudamérica, la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana dio origen a la cordillera de los andes, este proceso de subducción tiene una velocidad estimada de 6-8cm/ año (Veloza, Styron, & Taylor, 2012), generando gran actividad sísmica a consecuencia de esta dinámica.

El 11 de marzo del 2011 en Japón, ocurrió un sismo de 9.0 en la escala de Richter, provocando cuantiosas pérdidas; 18426 víctimas, entre muertos y desaparecidos. En el Perú el sismo de 15 de agosto del 2007, con epicentro a 40 km al oeste de la ciudad de Pisco, es uno de los sismos recientes más devastadores, del cual aún no se ha podido recuperar la población.

En el 2021 han ocurrido 834 sismos de los cuales el 0.12% fueron de intensidad mayor a 6Mw, cabe mencionar el sismo ocurrido el 28 de noviembre del mismo año, con epicentro a 98 km al Este de Santa María de Nieva, que representó el sismo de mayor grado (7.5Mw), con daños materiales en infraestructuras arquitectónicas y viales, esto indica que; caracterizar el comportamiento sísmico de la provincia de Rioja, es de vital importancia, así como de todo el territorio peruano. Surgiendo la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las características sismológicas de la provincia de Rioja- región San Martín comprendida en la zona 3 del mapa de peligro sísmico del Perú?, partiendo de la hipótesis que la provincia de Rioja- región San Martín, se caracteriza por estar propensa a sismos superficiales e intermedios (hipocentro menor a 350 Km) y de magnitud menor a

7.5 Mw debido a su ubicación entre la cordillera oriental y central de los andes del norte del Perú lo que determina una Zona 3 de acuerdo al mapa de Peligro sísmico probabilístico para el Perú.

La finalidad de la investigación, es contribuir con información sismo- tectónica; específicamente; las características y el potencial sísmico del sistema de fallas Rioja-Moyobamba para analizar su importancia en la Provincia de Rioja frente a la ocurrencia de sismos de magnitudes menores e iguales 7.5Mw, y con ello realizar la zonificación de acuerdo a los valores de aceleración y en consecuencia el comportamiento sísmico de la Provincia de Rioja.

La investigación tiene como objetivos; investigar y analizar la geología de la provincia de Rioja y su historial sísmico, identificar y caracterizar las fuentes sismogénicas en el área de estudio y determinar valores de aceleración sísmica para la provincia de Rioja.

La descripción de los capítulos los se muestra a continuación.

Capítulo I referido a la introducción de la investigación, al planteamiento del problema, formulación, justificación y los objetivos propuestos.

El capítulo II se desarrolla el marco teórico donde se sintetiza los antecedentes y los trabajos anteriores, además de los fundamentos o bases teóricas para la investigación.

El capítulo III concierne a materiales y métodos describiendo la ubicación de la investigación, caracterización geológica, geotectónica tomando como base los registros sísmicos, sismicidad histórica e instrumental, además de la interacción de las variables como elementos constituyentes para la investigación con un análisis descriptivo para la muestra y unidad de análisis; así mismo, la metodología, para la recopilación de datos en función a las variables, para ello se evalúa las fuentes sismogénicas, evaluando parámetros como la magnitud, frecuencia e intensidad.

En el capítulo IV se presenta el análisis y discusión de resultados del procesamiento de la data obtenida y comparada con trabajos anteriores relacionados a la investigación, logrando la contrastación de la hipótesis en concordancia con los objetivos propuestos anteriormente.

Capítulo V corresponde a las conclusiones y recomendaciones las cuales responden a los objetivos planteados, logrando mostrar la geología y las estructuras sismogénicas que determinan el comportamiento sísmico de la provincia de Rioja y generar el mapa de isoaceleraciones, continuando con las referencias bibliográficas de acuerdo con las normas IICA/CATIE, para finalmente concluir con los anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Alonso (2016), Evolución Tectónica y Estructural de la Zona de Falla de El Salvador: Aplicaciones a la Amenaza Sísmica, donde se analiza la evolución morfológica de la zona de falla el salvador y su análisis cinemático, determinada como una falla de rumbo dextral perteneciente al arco volcánico centroamericano que está sometida a esfuerzos de deformación y que reflejan la alta sismicidad asociada, con magnitudes mayores a 7Mw.

Alfonso et al. (2013), en su investigación denominada: Caracterización sísmológica de la Provincia de Matanzas; en la cual se determina el riesgo sísmico de acuerdo al valor de aceleración sísmica propuesto a partir de la información geológica, tectónica y sísmológica, con la finalidad de llevar a cabo construcciones sísmo resistentes y analizar la vulnerabilidad de las estructuras actuales. se logra determinar dos tipos de sismicidad, de acuerdo a la ubicación de la isla de Cuba respecto a las placas tectónicas, sismicidad en el límite de 'placas, de alta frecuencia y magnitudes mayores a 7 Mw y una sismicidad intraplaca poco frecuente y de magnitudes máximas de 6.2 Mw.

Chunga et al. (2019), realizó el estudio denominado Caracterización de Fallas Geológicas Capaces de Generar Terremotos Corticales en el Golfo de Guayaquil-Ecuador, dónde identifica que en el territorio ecuatoriano los sismos de moderada a alta intensidad, relacionados a fallas corticales, son poco frecuentes, llegando a registrarse 28 sismos en 363 años (1653-2016) con magnitudes de 5.5 Mw-7.8 Mw. Para la investigación se analizó 40 fallas, submarinas y continentales, capaces de deformar la superficie y generar sismos de Mw comprendidas entre 6 y 8.2, además de valores de PGA entre 0.41g- 0.50

g con un tiempo de recurrencia menor a 15 años, además en su análisis ha identificado 3 categorías de fallas capaces, siendo verdadera I, deducible II e incierta o hipotética III.

Huamán (2019), realizó el estudio: Evaluación de la amenaza sísmica y estructuras sismogénicas para la ciudad de Esmeraldas, costa norte de Ecuador; siendo una zona fuertemente sísmica, identifica frente a la ciudad de Esmeraldas el registro de uno de los sismos más fuertes en el mundo (8.8Mw), sismo que acompañado de otros premonitores generaron el derrumbe de 30 casas.

Según la IAEA, que considera una falla potencialmente activa, aquella que ha presentado desplazamientos superficiales en los últimos 30 mil años, en la investigación, se ha logrado identificar 38 fallas activas con potencial sísmico y capaces de generar sismos de $6.0 \leq Mw \leq 7.2$ y aceleraciones en roca de 0.26g a 0.42 g.

Marcano (2016), Metodología para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa desencadenados por la sismicidad; en la cual se realiza zonificación de los sectores expuestos a movimientos de masa como consecuencia de la actividad sísmica, determinando que, el área de interés esta susceptible a deslizamientos producto de la recurrente actividad sísmica y a la inestabilidad de su topografía, siendo más afectadas las áreas menos pobladas, también identificó zonas urbanas con alta amenaza a la remoción de masas.

Ochoa et al. (2014), Clasificación de Severidad de un Evento Sísmico en base a la Relación Magnitud-Distancia. En la investigación se plantea determinar la magnitud de un evento sísmico a partir de la distancia y velocidad registrados en una estación haciendo uso del método de Kernel (algoritmo), para ello se utilizó 986 eventos con magnitudes mayores a 3 y registrados entre el 2003 y 2008 generando una respuesta de la medida de la intensidad 20 segundos después de sucedido el evento, útil para generar un sistema de alerta temprana.

Porras et al. (2016), Sismicidad en Costa Rica Durante el 2015, recopila y analiza los datos de la red sismológica Nacional en el año 2015, siendo la data de 6987 eventos de los cuales solo 13 fueron de magnitud mayor a 5 Mw, eventos que en su mayoría fueron superficiales, dicha sismicidad está controlada

por fallas locales y regionales (61%) y por la actividad tectónica de la placa de cocos (37%). De acuerdo a la distribución geográfica, la mayor concentración sísmica se encuentra en la cordillera volcánica de Guanacaste y según sus intensidades, se identificaron sismos de intensidad máxima de V (MMI).

Salcedo y Pérez (2016), Caracterización Sismotectónica de la Región del Valle de Cauca y Zonas Aledañas a Partir de Mecanismos Focales de Terremotos, en donde se analiza 49 sismos superficiales e intermedios de magnitud $M_w \geq 4,8$ ocurridos entre 1978 al 2010, asociados mayormente a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana, concluye en la identificación de 4 ambientes geotectónicos con sus características propias de deformación y 3 fuentes sismogénicas, la trinchera, la zona de Benioff y las fallas regionales como los sistemas de fallas romeral y Cauca que como consecuencia determinan una zona sísmica importante ya que pueden llegar a generar sismos con magnitudes mayores a 6.5 M_w .

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Barreto (2019), en sus tesis: Análisis probabilístico de peligro sísmico para el diseño de una presa de enrocado en Huancavelica, en la investigación el autor busca determinar valores de demanda sísmica par el diseño de la estructura a ser construida y para ello utiliza la metodología de Cornell 1968 y aplicando el software CRISIS 2015, para el cálculo de los valores de los coeficientes de diseño sísmico bajo el enfoque de los artículos Ruiz et al.,(2011) y Martínez et al.,(2011) y los acelerogramas sintéticos se generaron con la herramienta SEISMOSOFT. Como resultado, determinó que el área donde se realizara la fundación no sería afectada por sismos relevantes, debido a encontrarse distante a fallas sísmicas potenciales, a pesar de ello, se pudo obtener demandas sísmicas y acelerogramas para tiempos de retorno de 475 años que tendrían comportamiento similar con tiempos de retorno de 2475 años.

Roncal (2017), desarrolló la tesis: Determinación del Peligro Sísmico en el Territorio Nacional y Elaboración de Aplicativo Web. Teniendo como finalidad realizar la evaluación probabilística del peligro sísmico en el territorio nacional a nivel de roca y realizar el análisis comparativo con los espectros de diseño establecidos en la norma de diseño E.030, 2016, para ello utilizó data actualizada

hasta el 2016 y el modelo Gutenberg -Richter considerando el método de ajuste de máxima verosimilitud. Llegando a concluir que la sismicidad en el Perú está controlada por la subducción de la placa de Nasca bajo la placa Sudamericana, generando eventos sísmicos de interfase o interplaca e intraplaca y sismos corticales. Además, identifica 29 fuentes sismogénicas regionales que representan a los eventos sísmicos de interfase, intraplaca superficial e intermedia y corticales.

Tavera et al. (2014), la dirección de sismología del Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la evaluación de peligro sísmico probabilístico en el Perú haciendo uso de eventos sísmicos para el periodo de 1960 al 2012 agenciándose de la base de datos de los catálogos del IGP, (USGS) y de Engdahl y Viseñor, (2002). Para ello aplicó la metodología propuesta por Esteva (1968), Cornell (1968) y el programa de cómputo CRISIS (2007). Este estudio comprendió el desarrollo de 33 fuentes sismogénicas con una única geometría de subducción, basadas en un análisis de distribución de hipocentros. El IGP definió mapas de isoaceleraciones espectrales para 10 % de probabilidad de excedencia en 50 y 100 años de exposición a nivel de PGA, con el fin de actualizar la actual norma de diseño sismorresistente E.030, 2016.

Tavera y Cuya (2017), Estimación del riesgo por exposición a partir de mapas de isosistas en Perú, desarrollado por el IGP (Instituto Geofísico del Perú), donde se evalúa la posibilidad de la ocurrencia de sismos de gran magnitud en el Perú, teniendo como premisa que los sismos son cíclicos en el tiempo y que podría estimarse el número de poblaciones afectadas al repetirse un evento de acuerdo al mapa de isosistas, para ello toma 12 registros sísmicos, los mas fuertes para el norte, centro y sur del Perú, además define 3 fuentes sismogénicas, la superficie de contacto entre placas, la deformación superficial de la corteza y la deformación interna de la placa de Nazca.

Torres (2021), Análisis de la Actividad Sismovolcánica en el Complejo Volcánico Nevado Coropuna y Alrededores Durante el Periodo mayo 2018- abril 2020. Realizó el análisis de datos obtenidos en 5 estaciones de banda ancha, obteniendo 8066 sismos de magnitud menor a 3.8 Mw, clasificándolos en volcano-Tectónicos, Largo Periodo y Tremor que representan la mayor parte de

la actividad sísmica local, siendo la fuente sísmica las fallas normales activas que tienen dirección paralela a al sistema de fallas dominantes de los andes.

2.1.3 Antecedentes Locales

Martínez et al. (2006), en su investigación denominada Mapa de Peligros de la Ciudad de Rioja, determina que los sismos en la región San Martín son de origen tectónico, ocasionados por el movimiento orogénico del proceso de formación de la Cordillera de los Andes, que activan las fallas geológicas superficiales y/ o recientemente formadas dando origen a sismos con profundidades hipocentrales mayores de 33km que generan sismos de intensidad VI – VII en la escala de Mercalli. Además, debido a la inexistencia de volcanes se descarta que la génesis de los sismos sea consecuencia de la actividad volcánica.

En la investigación se determina que la sismicidad de la ciudad de Rioja está relacionada con las fallas geológicas superficiales de Angaiza y de Pucatambo (sismos superficiales que empezaron a manifestarse desde 1968), uno de ellos tuvo lugar el 25 de setiembre de 2005.

Romero et al. (2016), Gestión de Riesgos de Desastres de la ciudad de Nueva Cajamarca, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín. En el estudio se logra determinar que la ciudad de Nueva Cajamarca se caracteriza por su alta actividad sísmica, lo que determina que está expuesta a riesgo alto, todo esto condicionado por la ubicación geográfica que corresponde a la zona 03 según la zonificación sísmica probabilística para el territorio peruano.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Estructura Interna de la Tierra

Con el surgimiento de la sismología como ciencia se pudo determinar indirectamente de qué elementos y como está conformada el interior de la tierra; emitiendo y analizando el comportamiento de ondas sísmicas generadas en superficie que se propagan en interior de la tierra, variado su comportamiento de acuerdo al material que atraviesan; determinándose que está formada por tres grandes capas, corteza, manto y núcleo (Herráiz, 1997).

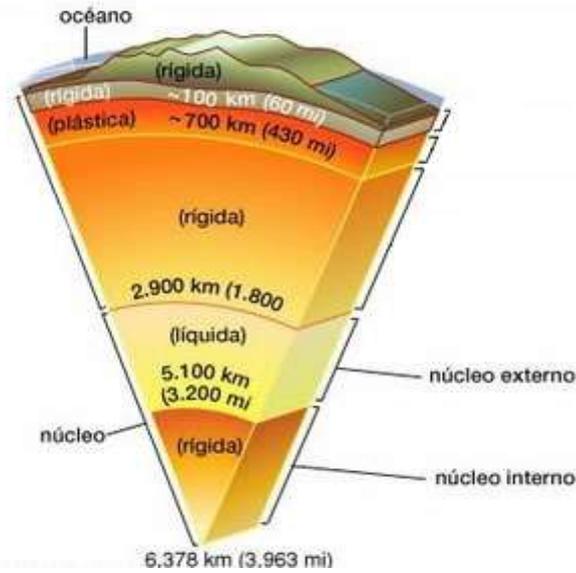


Figura 1. Estructura Interna de la Tierra donde muestra las características físicas de cada capa. Modificado de (Marshak & Van der Pluijm, 2004).

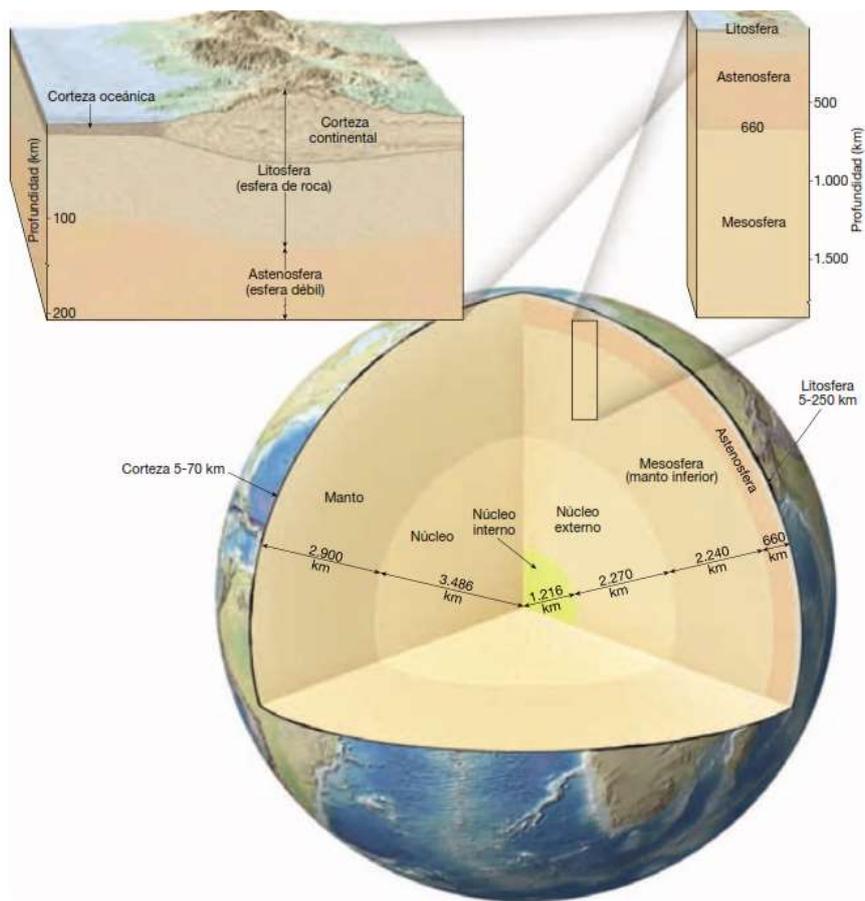


Figura 2. Sección transversal que muestra el interior de la tierra. Tomado de (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.1.1 CORTEZA

Es la capa superficial más explorada, que constituye el 1% del volumen, su espesor varía de 70 km en los continentes y 10 km en los océanos, limitado del manto por la discontinuidad de Mohorovicic. Se habla de corteza continental y corteza oceánica que difieren en composición; en la corteza continental se puede diferenciar; una capa superficial constituida por sedimento suelto, una capa intermedia constituida por silicatos de aluminio (SIAL) y la capa inferior conformada por silicatos de magnesio (SIMA), estas dos últimas separadas por la discontinuidad de Conrad (Lutgens & Tarbuck, 2005).

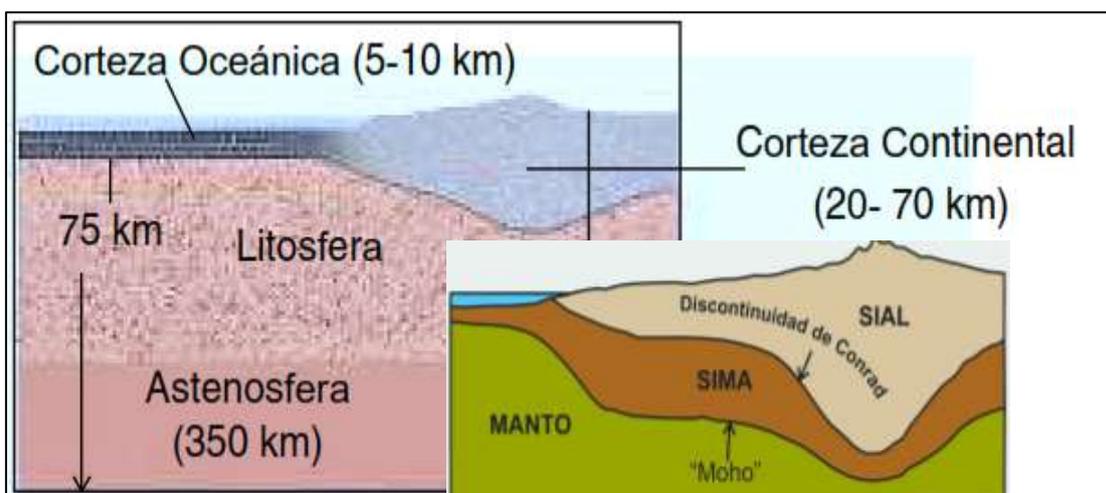


Figura 3. Diagramación esquemática de la corteza bajo los continentes y océanos e identificación de las capas (Sial y Sima) de la corteza continental. Modificado de (Read & Watson, 1973).

De los cerca de 2000 minerales reconocidos que existen (Hurlbut, 1981), 22 de ellos los encontramos formando parte de la corteza, la composición puede resumirse con pocos elementos, hierro, oxígeno, silicio y magnesio, que representan alrededor de 92% del planeta, constituido por un núcleo de hierro y un manto de silicatos de magnesio.

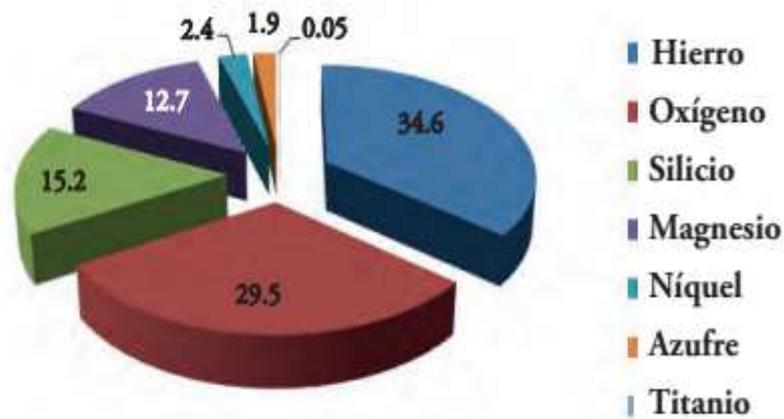


Figura 4. Distribución porcentual de los elementos que componen la corteza terrestre. Modificado de (Marshak & Van der Pluijm, 2004).

2.2.1.2 MANTO

El manto es la capa intermedia con un espesor de 2900 km, dividida en manto superior y manto inferior el primero menos denso que el segundo y separados por la discontinuidad de Repetti a los 700 km de profundidad. El manto superior está compuesto de rocas ultramáficas y tiene una densidad de 3.3 g/cm³, mientras que el manto inferior tiene una densidad de 5.5 g/cm³, compuesto de rocas silicatadas y óxidos densos (Marshak & Van der Pluijm, 2004). El manto está delimitado del núcleo por la discontinuidad de Gutenberg- wiechert, ubicada a los 2900km de profundidad, esta capa es la fuente generadora de la energía responsable de la expansión de los fondos oceánicos, la orogénesis y los terremotos de mayor magnitud.

Formando parte del manto superior, entre los 100 y 350 km se encuentra la Astenosfera, identificada a partir de una variación negativa de las ondas internas (P y S), ésta capa se caracteriza por ser menos viscosa y más densa que la Litosfera, debido a que los minerales que la componen se encuentran cerca de su temperatura de fusión dándole el comportamiento de una capa blanda (Croneis, 1994).

2.2.1.3 NUCLEO

Es la capa más interna de la tierra que representa el 16% del volumen y el 32% de su masa, comprende desde los 2900 km hasta los 6378 km de profundidad y

está formado principalmente por hierro y níquel que conforman un núcleo externo líquido con densidad de 10 a 12 g/cm³ que comprende hasta los 5150Km en donde no se propagan las ondas S y separado del núcleo interno mediante la discontinuidad de Lehmann (Marshak & Van der Pluijm, 2004).

El núcleo interno se extiende desde los 5150Km hasta el centro de la tierra, 6378 Km, caracterizado por ser sólido con alta rigidez y densidad entre 13.3 a 13.6 g/cm³.

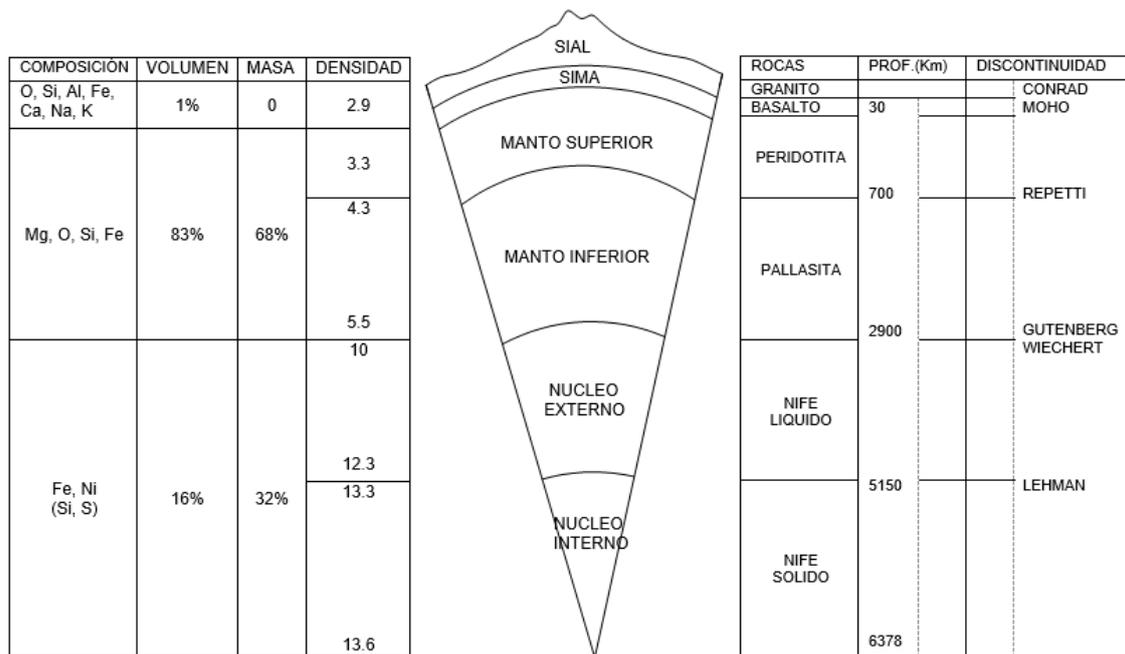


Figura 5. Estructura interna de la Tierra. Modificado de (Marshak & Van der Pluijm, 2004).

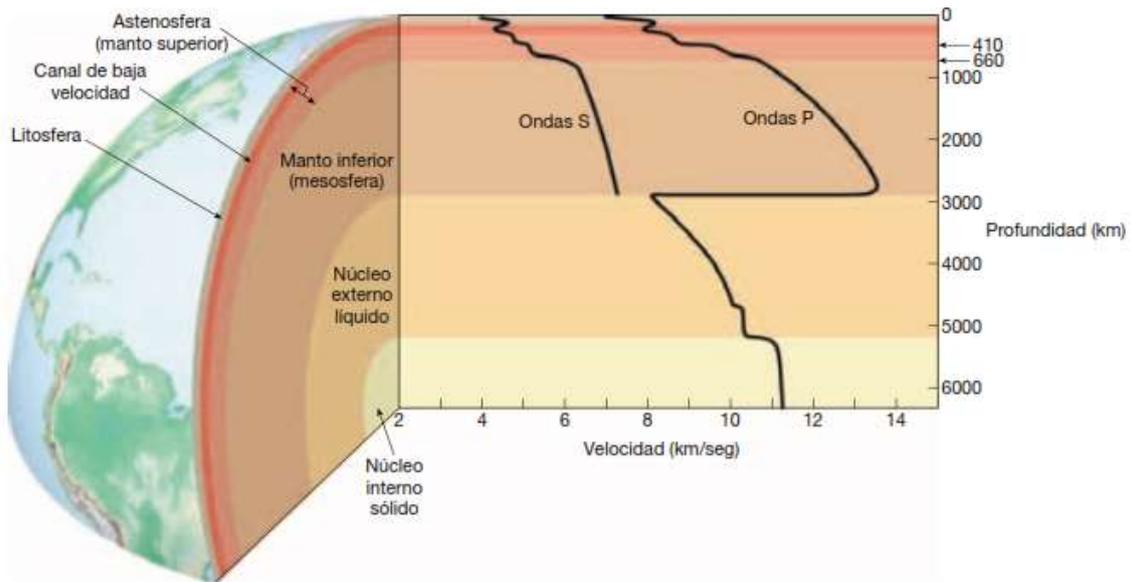


Figura 6. Variaciones en la velocidad de las ondas P y S con la profundidad, variaciones que determinan las características principales del interior de la Tierra (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.2 Tectónica de Placas

Teoría que surge de la unión de conceptos que explican el movimiento de la litosfera, como la deriva continental y la expansión de los fondos oceánicos. La tectónica de placas sostiene que la litosfera, manto superior y la corteza suprayacente, está dividida en fragmentos llamadas placas tectónicas, de espesor variable, en los océanos y continentes. El comportamiento dinámico, se da porque la litosfera se sostiene sobre una capa de manto superior, astenosfera superior, que por la presión y temperatura a la que se encuentran tiene un comportamiento plástico, provocando que la litosfera se separe de la astenosfera (Herráiz, 1997).

Esta teoría es el sustento de la ocurrencia de los sismos, sosteniendo que se originan por las fuerzas que provocan los movimientos de las placas tectónicas cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas (Herráiz, 1997), evidenciado en los eventos sísmicos que tienen lugar en los bordes de dichas placas hasta profundidades superiores a 300km

2.2.2.1 Límites Convergentes

También llamados bordes activos, son las zonas en las que tiene lugar el contacto de dos placas, ya sea continental- continental, continental- oceánica u oceánica -oceánica donde se puede producir el fenómeno de subducción cuando

la placa oceánica se introduce por debajo de la corteza continental debido a su mayor densidad generando vulcanismo, metamorfismo, sismicidad, formación de montañas, fallamiento y plegamiento.

Con este fenómeno se explica la generación de sismos de profundidad variable desde unos pocos kilómetros, cercanos a la costa, hasta más de 500 km, en el continente y de magnitudes variables (Herráiz,1997). En el Perú tiene comportamiento variable, en el norte y centro del Perú tiene lugar con un ángulo de buzamiento de 25° aproximadamente, mientras que en el Sur supera los 30° realizándose a una velocidad de 6 a 8 cm/año (Veloza et al., 2012).

Cuando convergen dos placas continentales y debido a que presentan características físicas similares (baja densidad), no se produce subducción sino colisión, tal es el caso de la formación de la cadena del Himalaya, originada por el contacto entre una parte de la placa Indo-Australiana y la placa Eurasiática, y que además genera gran actividad sísmica (Herráiz,1997).

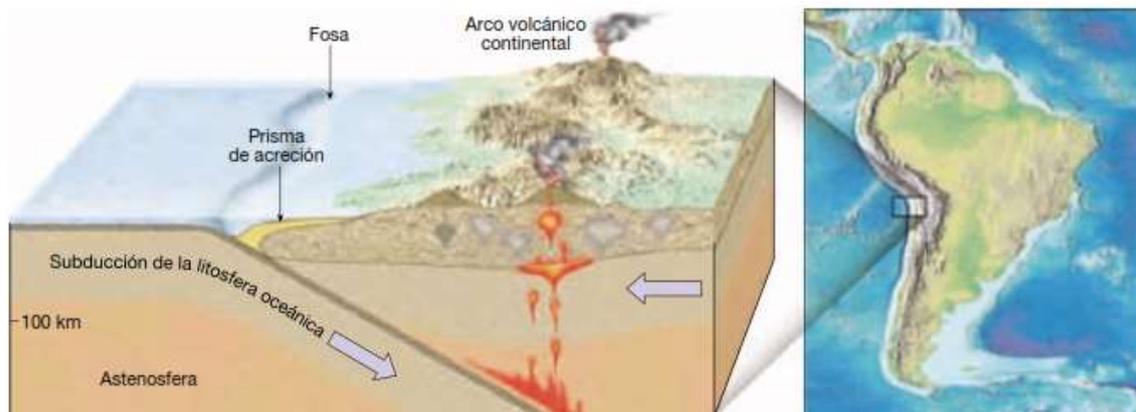


Figura 7. Margen continental activo, y proceso de formación del prisma de acreción (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.2.2 Límites Divergentes

Los límites divergentes son zonas de expansión donde se crea corteza a lo largo de las dorsales oceánicas, se trata de la separación de las placas debido a las fuerzas de convección que se generan y propagan desde el manto (Herráiz, 1997).

La actividad sísmica que se genera en este proceso tectónico es de moderada magnitud y con profundidades hipocentrales inferiores a 60 km (sismos superficiales).

Para que la superficie de la tierra no aumente, es necesario que existan procesos de destrucción de litosfera para compensar el material creado en las dorsales

oceánicas, este mecanismo compensador ocurre en los márgenes convergentes (Herráiz,1997).

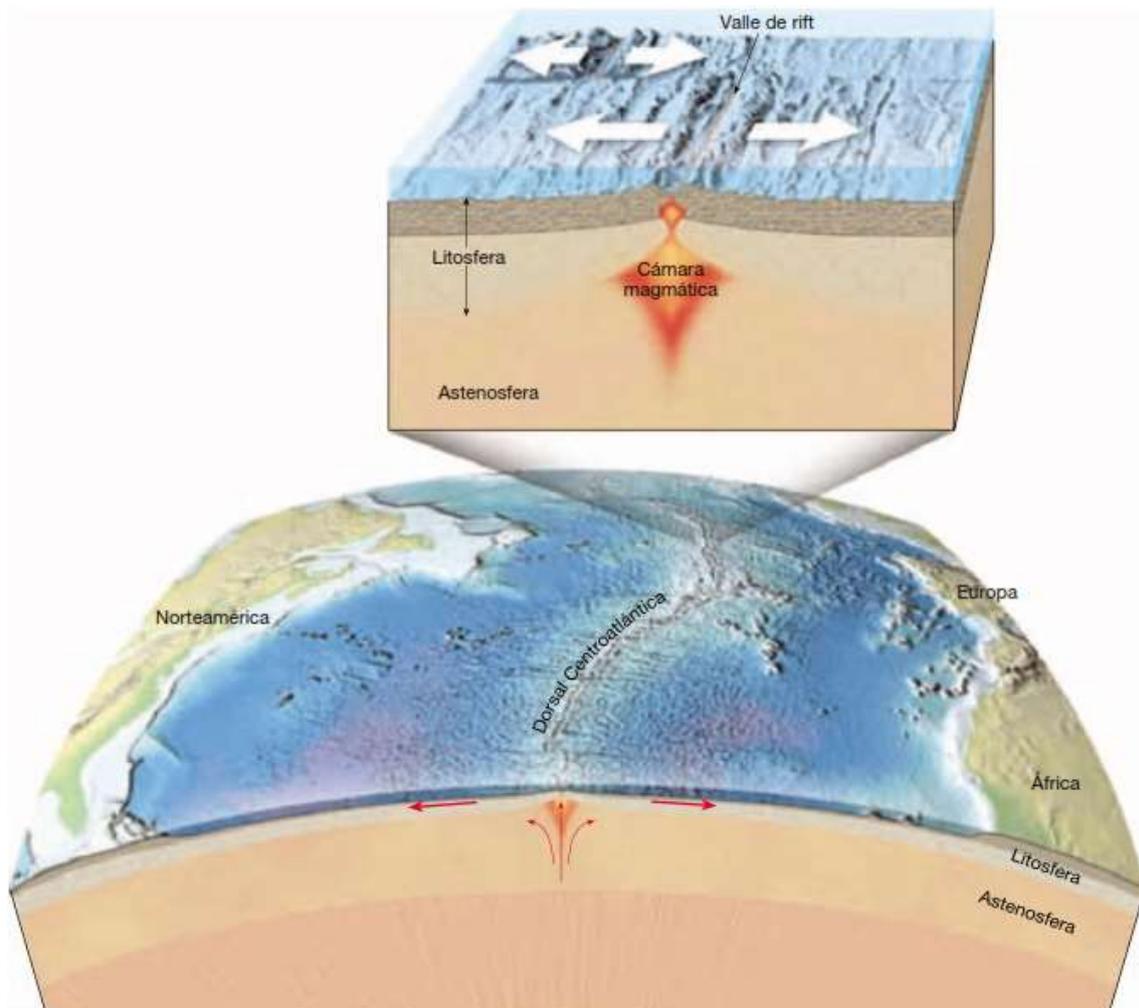


Figura 8. Proceso extensivo de apertura de rift y formación de corteza oceánica (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.2.3 Límites Transformantes

Llamados márgenes de deslizamiento o de fractura y están determinados por fallas de rumbo. En estos bordes no existe destrucción ni creación de corteza, y el desplazamiento es horizontal entre placas.

Los límites transformantes están asociados a la generación de sismicidad superficial (15-20 km) pero de elevada magnitud, un ejemplo de ello es la falla de San Andrés (California), ubicada entre las placas del Pacífico y de Norteamérica donde se estima un desplazamiento de rumbo dextral y ocurre con una velocidad aproximada de 3 cm/año. En esta zona tiene una dinámica, la placa de Norteamérica se desplaza hacia el sur y la placa del Pacífico al norte (Herráiz,1997).

En los límites de las placas ocurren alrededor del 95% de los sismos y el 5% ocurre en las placas, denominados sismos intraplaca. Estos eventos sísmicos, sobre todo los que se originan en la zona más interna de las placas, ocurren en zonas de fragilidad, en las que se liberan los esfuerzos que han sido generados en los bordes de la placa y transmitidos a través de ella (Herráiz, 1997).

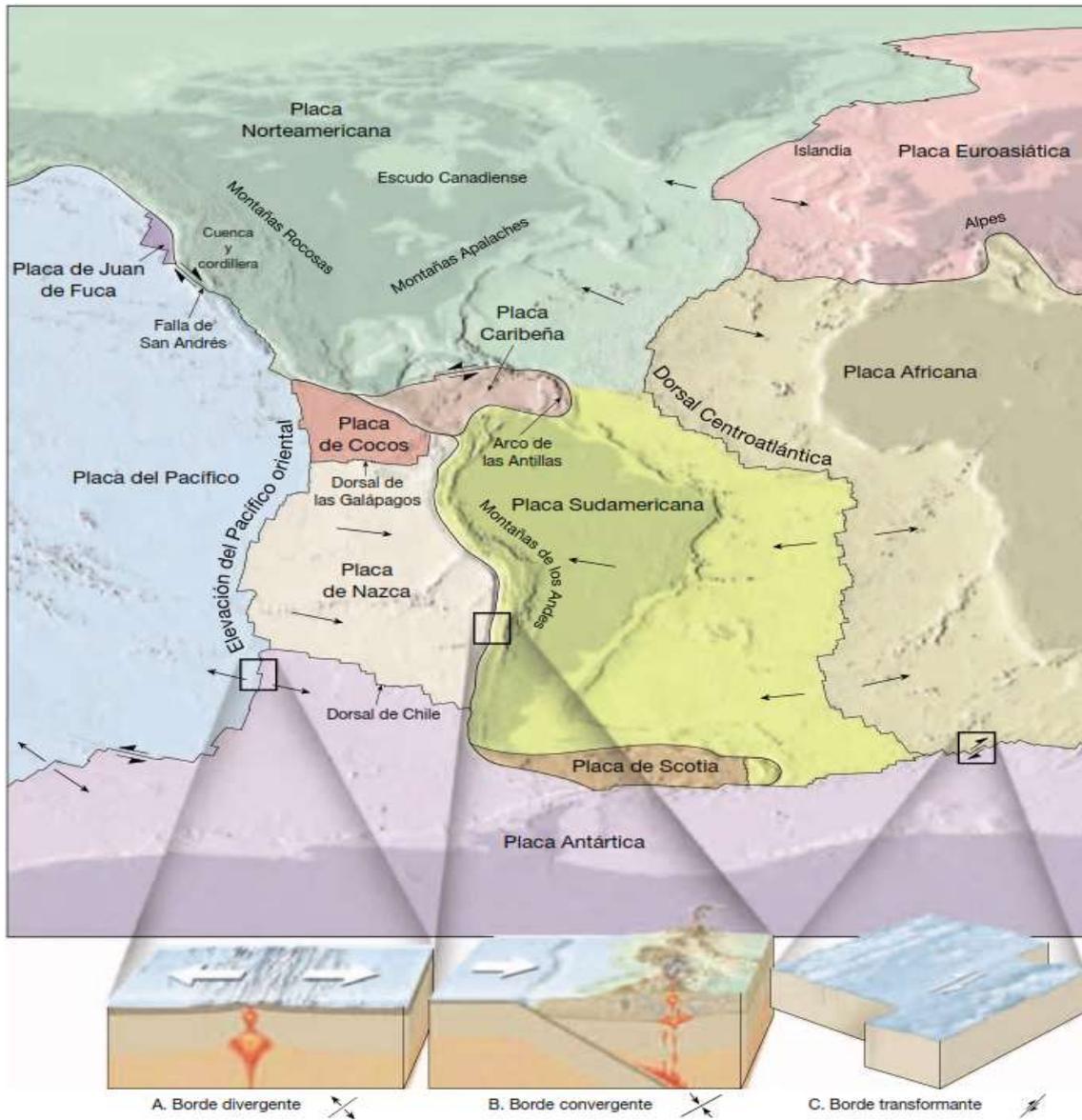


Figura 9. Placas tectónicas que conforman la corteza terrestre y su comportamiento en sus límites (Lutgens & Tarbuck, 2005).

Tabla 1: Características de los Límites de Placas (Ambientes Geotectónicos)

TIPO DE MARGEN	DIVERGENTE	CONVERGENTE	TRANSFORMANTE
MOVIMIENTO	Extensión	Subducción	Desplazamiento lateral
EFECTO	Constructivo (se crea litósfera)	Destruccion (se destruye litósfera)	Conservativo (ni se destruye ni se crea litósfera)
TOPOGRAFÍA	Dorsal/ Rift	Fosa y/o cordillera de plegamiento	Poco destacable
VULCANISMO	Si (basalto)	Si (andesitas)	No
SÍSMICIDAD	Si (de foco somero)	Si (de foco somero intermedio y profundo)	Si (de foco somero)

Fuente: Modificado de (Thompson & Turk, 1997).

2.2.3 Fuentes de Energía

2.2.3.1 Flujo de Calor en la Corteza

En la corteza, el calor se transfiere por el proceso de conducción que es la transferencia de calor a través de un cuerpo, dicho proceso, en el caso de las rocas corticales, ocurre a un ritmo relativamente lento, comportandose la corteza como un aislante termico, explicando el gradiente geotermico variable de la corteza, estimado en 20 °C a 30 °C por kilómetro (Tarbuck y Lutgens,2005). Sin embargo, en el manto y el núcleo la velocidad de propagacion es mucho menor. La velocidad con la cual se transfiere el calor depende del espesor de las capas, a lo largo de las dorsales, donde la corteza tiene sólo unos pocos kilómetros de grosor, la velocidad de flujo del calor es mas elevada, mientras que en los escudos el flujo de calor es bajo; esto debido a que la litosfera es mas gruesa y cumple la funcion de aislante.

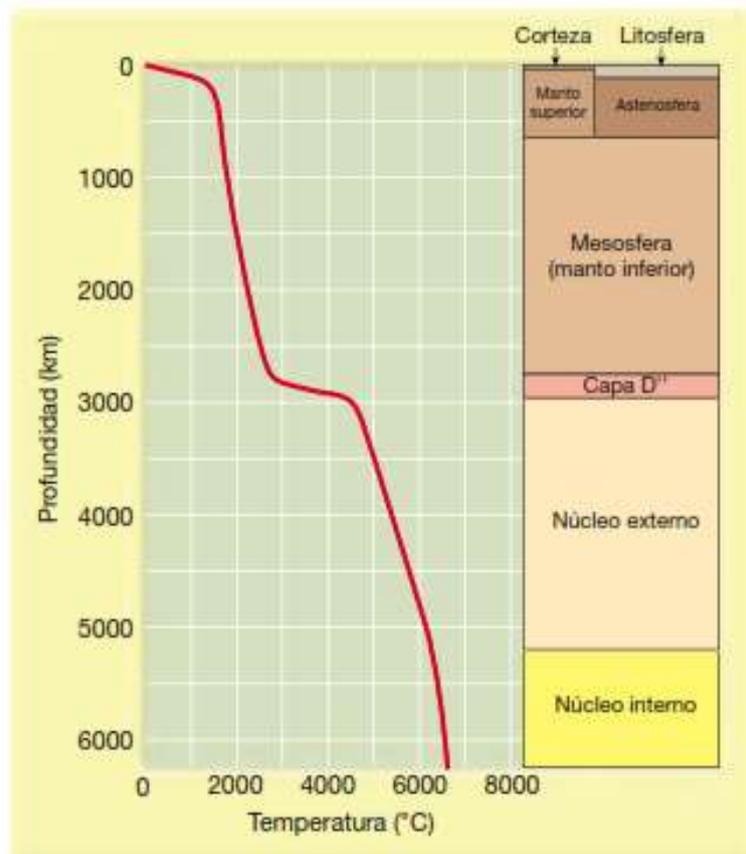


Figura 10. Gradiente geotérmica basado en datos Kent C. Condie (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.3.2 Convección del Manto

La convección es la transferencia de calor mediante el movimiento o circulación en una sustancia, por lo tanto, se infiere que las rocas del manto tienen el comportamiento de un fluido. El flujo convectivo del manto es el proceso por el cual las rocas calientes menos densas ascienden y el material más frío y más denso desciende, siendo el proceso responsable del movimiento de las placas tectónicas.

Recordemos que las plumas calientes se generan en el límite manto-núcleo, desde donde ascienden lentamente hacia la superficie, mientras que el flujo descendente se origina en los bordes convergentes, donde están siendo subducida litósfera densa y fría, algunos estudios indican que este material denso y frío llega hasta el límite núcleo-manto.

De acuerdo con estudios geológicos indican que el manto se comportara como un sólido bajo ciertas condiciones y como un fluido bajo otras, es decir tiene comportamiento plástico. Cuando un material de comportamiento plástico se

somete a esfuerzos breves, como los producidos por las ondas sísmicas, se comporta como un sólido elástico. Sin embargo, en respuesta a esfuerzos aplicados durante períodos muy largos, el material llega a fluir, explicando que las ondas S pueden propagarse a través del manto, aunque esta capa rocosa sea capaz de fluir. Debe entenderse que el manto está compuesto por roca sólida caliente, que bajo presiones de confinamiento extremas, es capaz de fluir.

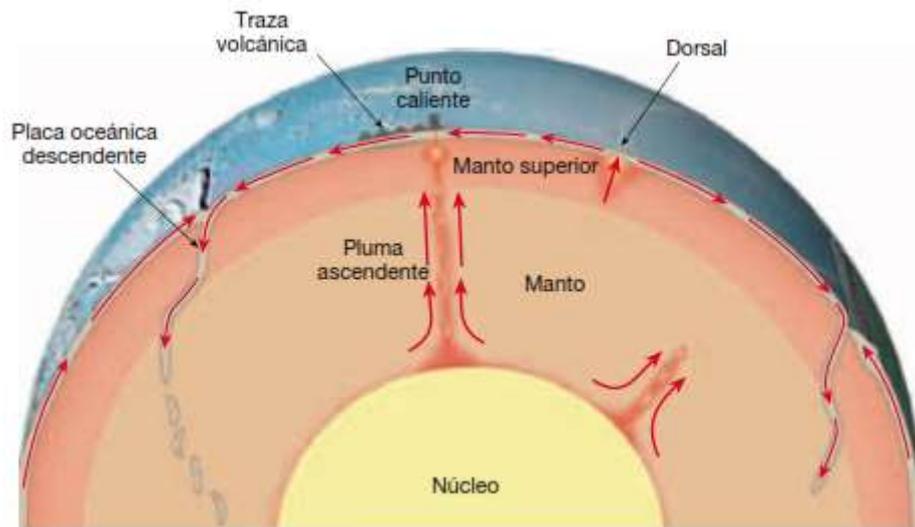


Figura 11. Modelo del flujo convectivo del manto (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.4 Fallas Geológicas

Las fallas son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable, (Lutgens & Tarbuck, 2005) pueden ser dimensionalmente pequeñas, donde se puede apreciar estratos desplazados en metros, denominadas fallas locales y de extensiones macro, denominadas fallas regionales, que tienen desplazamientos kilométricos, siendo más fáciles de identificar a partir de fotografías aéreas que a nivel del suelo.

Los movimientos súbitos a lo largo de las fallas son causantes de sismicidad. Sin embargo, la gran mayoría de las fallas son inactivas y, por tanto, solo son la evidencia de una deformación antigua. Para la IAEA (Agencia Internacional de Energía Nuclear) una falla, es sísmicamente activa cuando presenta evidencias que ha generado al menos un sismo en los últimos 10000 a 35000 años. Para la comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (USNRC), analizando puntualmente la falla de San Andrés, consideran una falla activa cuando cumple las siguientes características:

- Ha registrado un movimiento en la superficie o cerca de ella en los últimos 35000 años.
- Existe constancia instrumental de la ocurrencia de sismos relacionados con la falla.
- La falla tiene relación con fallas potenciales que cumplen las dos características anteriores.

Se suele denominar falla potencialmente activa aquélla que no presentan muestras de actividad actual, pero que por sus características o por indicios de ruptura en una etapa de esfuerzos anterior, pueden actuar como fallas activas (Herráiz, 1997).

En algunas superficies de falla, las estrías de falla, producto del deslizamiento proporcionan información de la dirección del desplazamiento más reciente a lo largo de la falla.

Las siguientes características nos permiten describir una falla Geológica:

- Plano de falla: Plano o superficie a lo largo de la cual se desplazan los bloques de la falla.
- Bloque Techo: También llamado Bloque Superior, es el bloque que queda por encima del plano de falla.
- Bloque Muro o piso: También llamado Bloque Inferior.
- Salto de falla: Es el desplazamiento entre dos puntos que anteriormente estaban unidos antes de producirse la fractura.
- Dirección o Rumbo: Ángulo que forma el plano de falla con la línea horizontal contenida con el eje norte-sur.
- Buzamiento: Ángulo que forma el plano de falla con un plano horizontal.
- Dirección del Buzamiento: Ángulo que forma la línea de máxima pendiente con el norte geográfico.

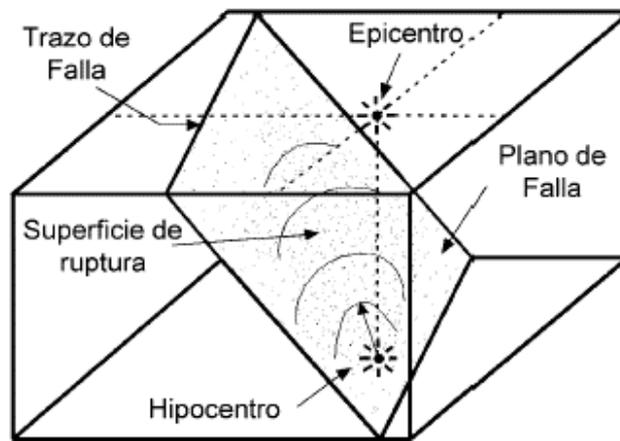


Figura 12. Geometría de una falla y origen de un sismo (Cahiari, 2008).

Las fallas se clasifican por sus movimientos relativos, que pueden ser horizontales, verticales u oblicuos.

2.2.4.1 Falla Normal

Fallas con desplazamiento vertical que son producidas por esfuerzos tensionales, donde el bloque techo baja respecto al bloque muro, suelen variar en ángulo de buzamiento $0^\circ < \delta < 90^\circ$ que generalmente va disminuyendo con la profundidad.

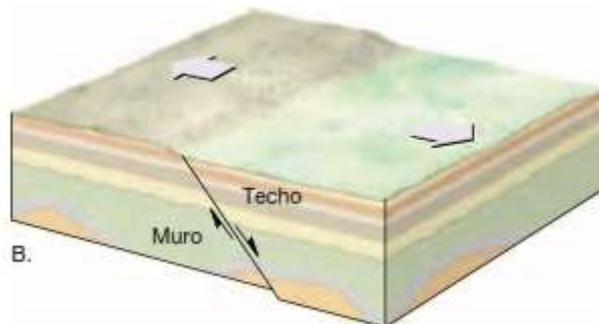


Figura 13. Bloque diagrama donde muestra los esfuerzos y el comportamiento de los bloques actuantes (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.4.2 Falla Inversa

También consideradas fallas de desplazamiento vertical, donde el bloque techo asciende respecto del bloque muro debido a que son generadas por esfuerzos compresionales, suelen tener buzamientos mayores a 45° y cuando son menores toman el nombre de cabalgamientos (Lutgens & Tarbuck, 2005).

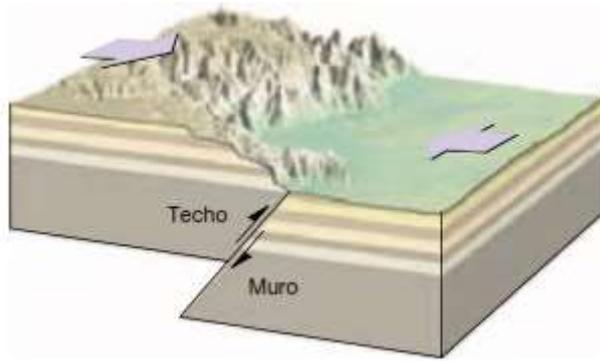


Figura 14. Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla inversa (Lutgens & Tarbuck, 2005).

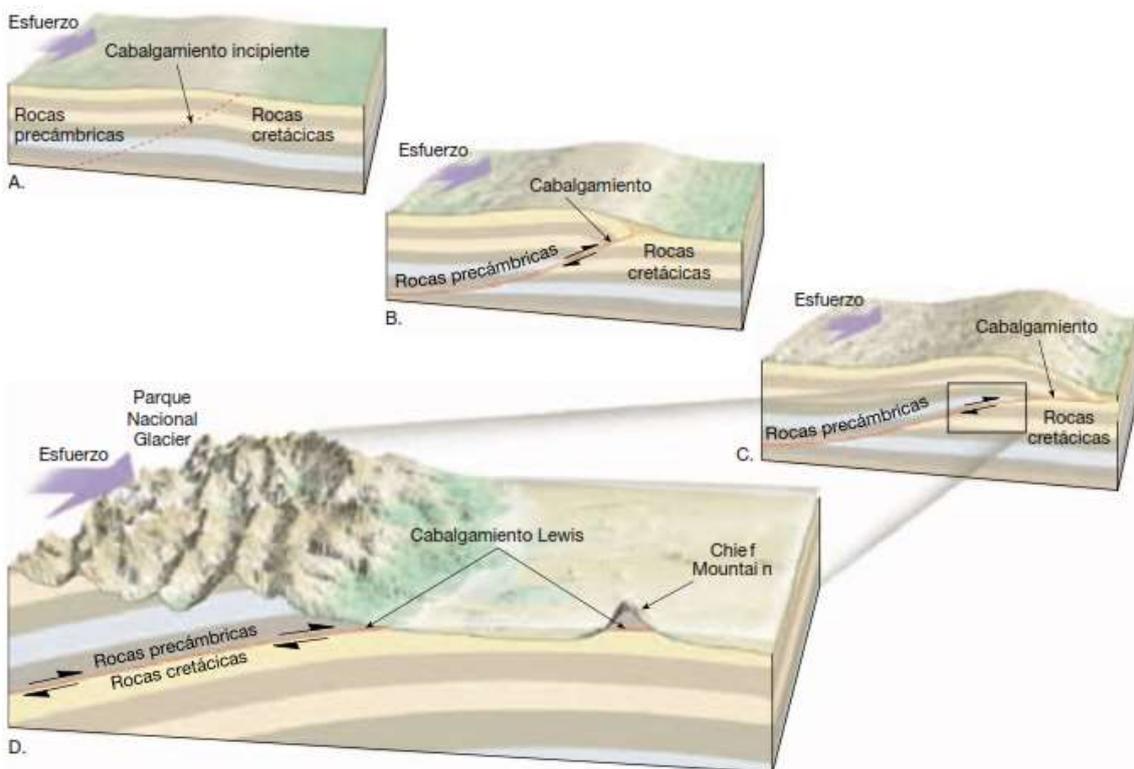


Figura 15. Desarrollo idealizado del proceso de cabalgamiento (Lutgens & Tarbuck, 2005).

Según Herráiz, (1997) la longitud de la falla se relaciona directamente con la magnitud de los terremotos que puede generar y con el tiempo que dura la ruptura.

2.2.4.3 Falla de Rumbo

Son fallas de desplazamiento horizontal en donde los bloques tiene movimiento paralelo a la dirección de la falla. En este tipo de falla, existen dos subtipos,

lateral izquierdo (o sinestral) y lateral derecho (o dextral), que dependen de la dirección en la que se observa a través del plano de falla.

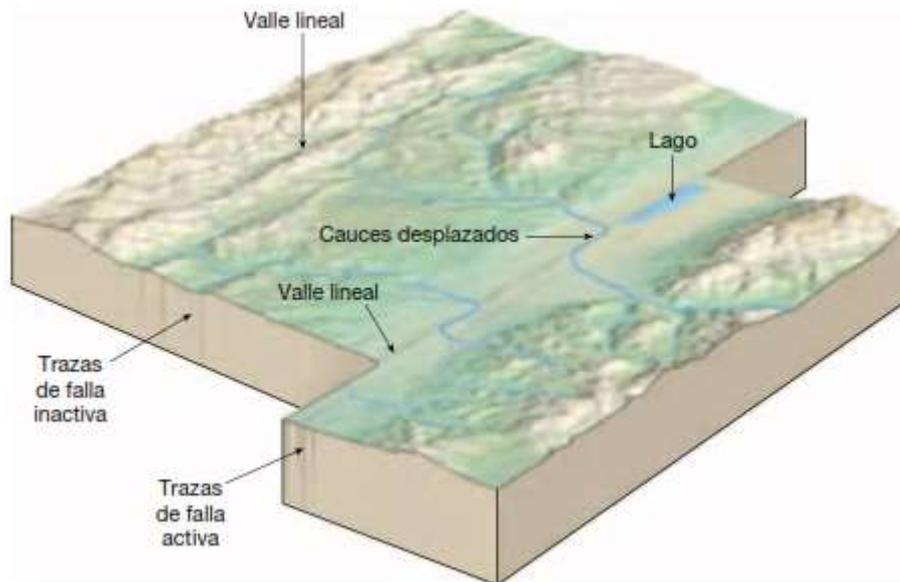


Figura 16. Diagrama que ilustra el desplazamiento horizontal, evidenciando una falla de rumbo dextral (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.5 Formas de Propagación de Energía Sísmica

2.2.5.1 Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son energía elástica liberada cuando los esfuerzos de deformación superan la resistencia de la roca, que desde el foco o hipocentro se irradia en todas las direcciones (Lutgens & Tarbuck, 2005). Existen dos tipos de ondas sísmicas, las ondas de cuerpo o de volumen, las cuales son generadas en el hipocentro y viajan a través de las capas internas hasta la superficie y las ondas superficiales, que viajan desde el epicentro a una estación sísmica, donde existen equipos de registro llamados sismógrafos que plasman la llegada de las ondas sísmicas en gráficos denominados sismogramas.

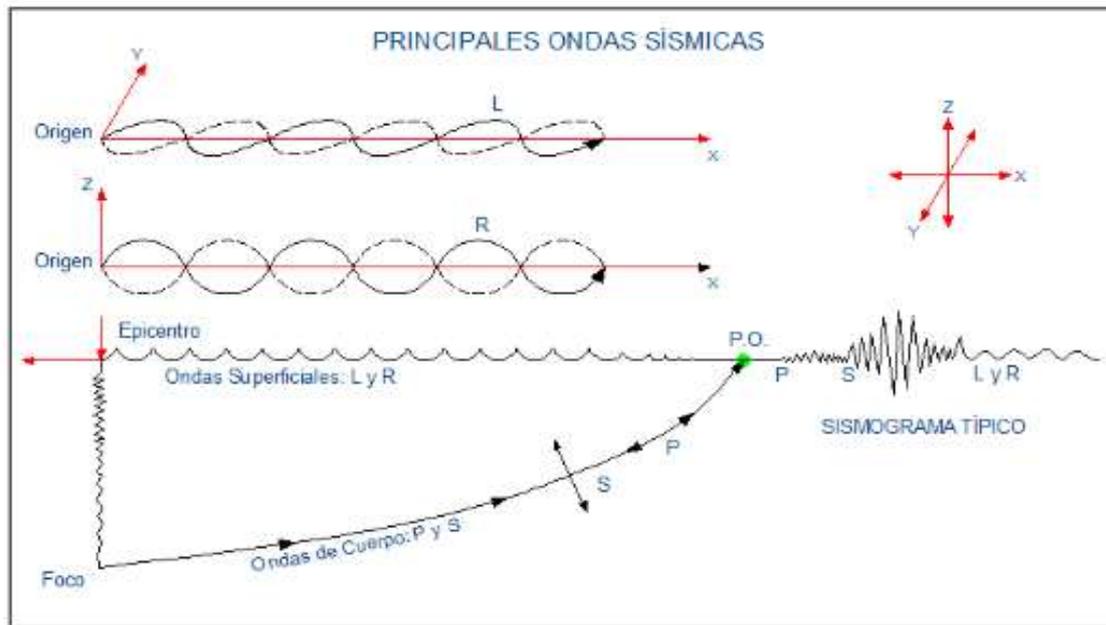


Figura 17. Principales ondas sísmicas con propósitos de ingeniería (Kuroiwa, 2002).

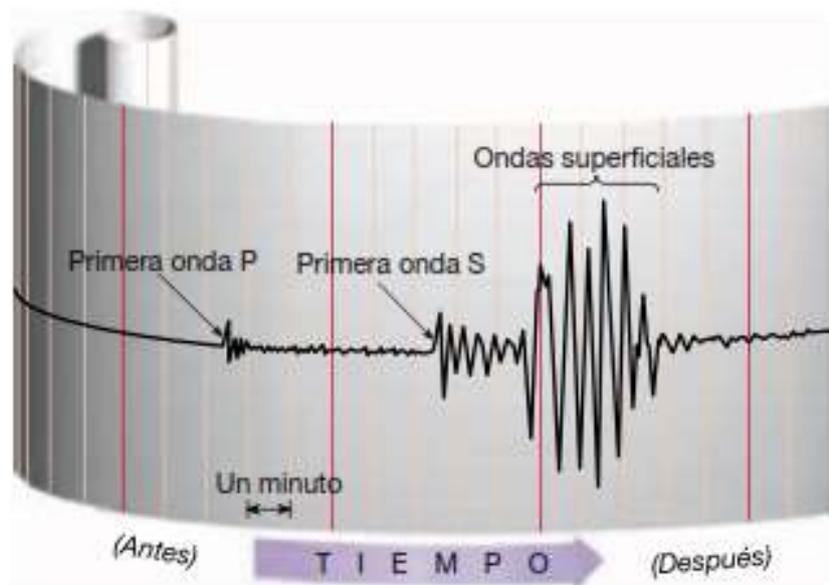


Figura 18. Sismograma donde se aprecia el intervalo de tiempo de llegada de la onda P y la onda S (Lutgens & Tarbuck, 2005).

A. Ondas Internas de Cuerpo o de Volumen

Ondas que se propagan a través de las capas internas de la tierra y proporcionan información sobre las características físicas de las mismas.

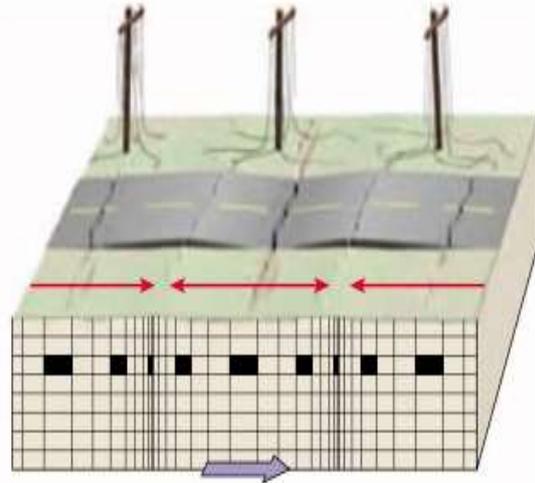
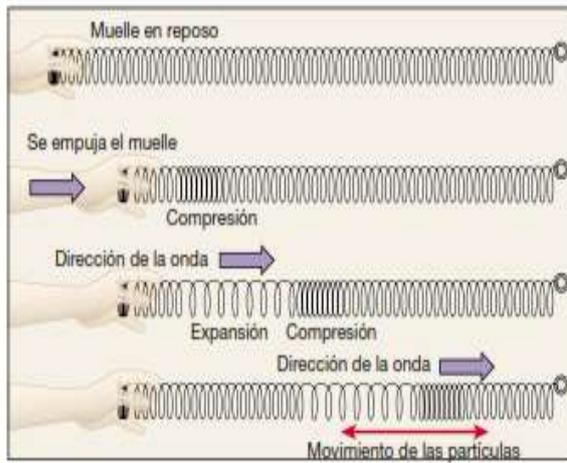
De acuerdo al modo de desplazamiento, las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos, las ondas S secundarias o transversales y las ondas P primarias o longitudinales.

a) Ondas sísmicas longitudinales

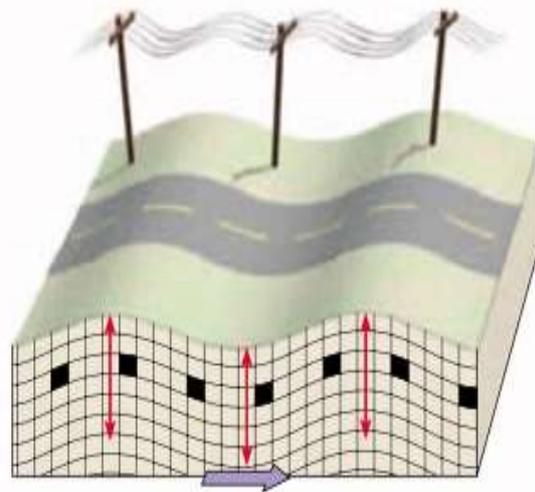
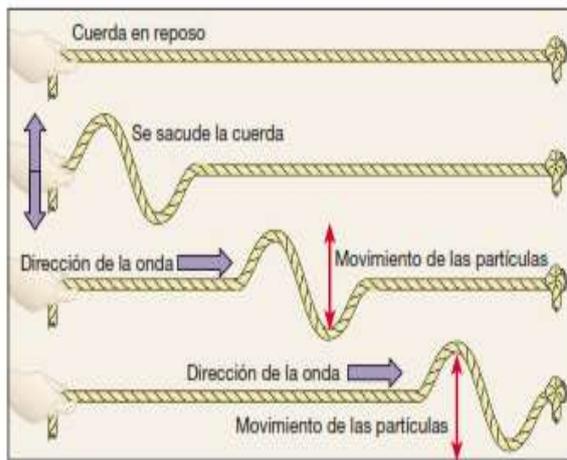
También llamadas ondas P (ondas primarias), por ser las primeras en ser registradas y se caracterizan porque se propagan en sentido longitudinal, según una compresión- distensión alternante, generando modificaciones de volumen sin cambio de forma y pueden viajar a través de cualquier medio sólido, líquido o gaseoso.

b) Ondas sísmicas transversales

También llamadas ondas S (ondas secundarias) porque se registran después de la llegada de las ondas P, debido a su menor velocidad, son transversales; con movimiento de la partícula en dirección perpendicular al avance de las ondas; y generan cambios de forma sin cambios de volumen. Una característica particular, es que sólo se pueden transmitir a través de medios sólidos. Se distinguen las componentes verticales y horizontales SV y SH, que son las proyecciones sobre los planos vertical y horizontal respectivamente, además el ángulo de polarización, definido como la tangente de SV/SH, que viene a ser un dato elemental para la determinación del mecanismo focal (Herráiz, 1997).



A. Onda P



B. Onda S

Figura 19. Tipos de ondas de cuerpo o volumen y su movimiento característico (Lutgens & Tarbuck, 2005).

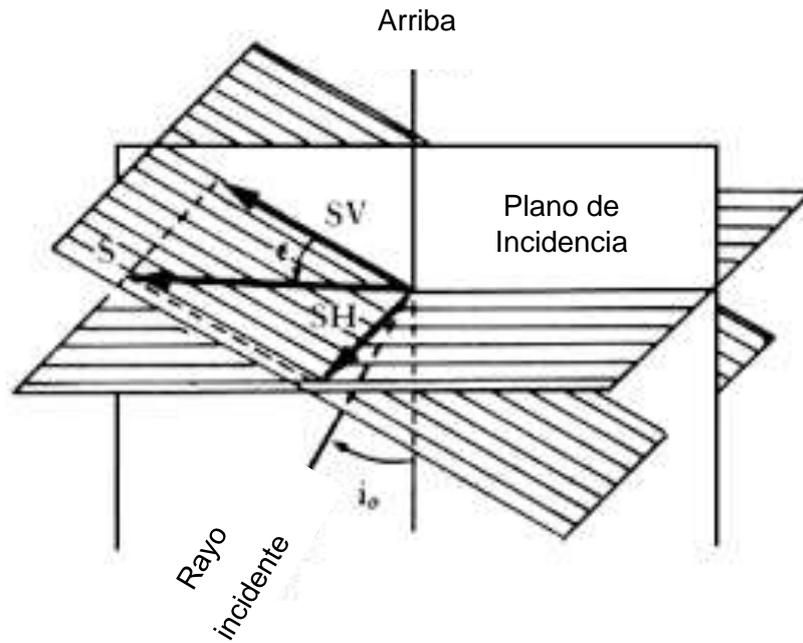


Figura 20. Componentes de la onda S (Herráiz, 1997)

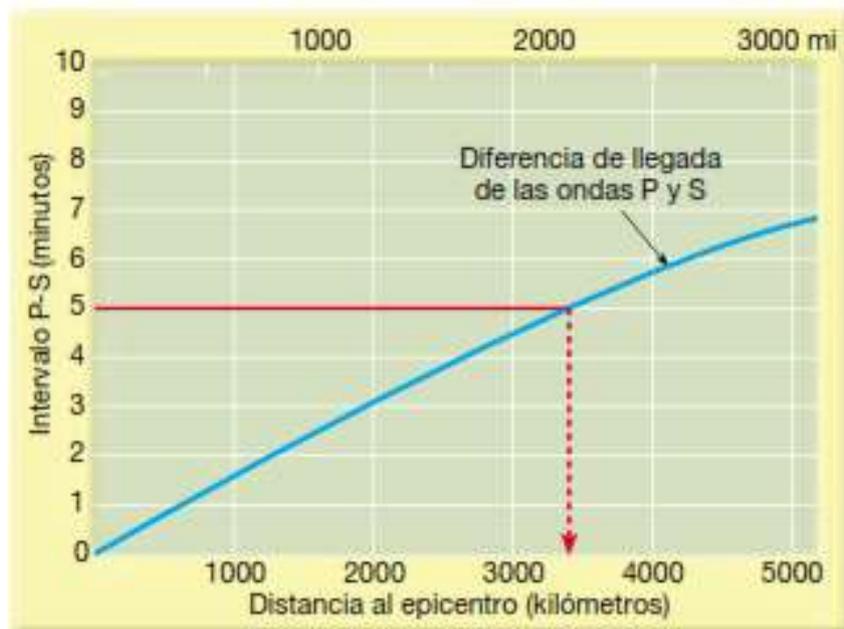


Figura 21. Representación distancia-tiempo, utilizada para determinar el epicentro. (Lutgens & Tarbuck, 2005).

B. Ondas Superficiales

Ondas que se generan en el epicentro, al que llegan las ondas sísmicas de cuerpo y viajan por la superficie, se caracterizan por tener una menor velocidad de propagación que las ondas S y la amplitud decrece con la profundidad. Ambas

pueden experimentar dispersión por lo que es necesario distinguir entre la velocidad de fase (con la que viajan los máximos y los mínimos) y la velocidad de grupo (con la que se transporta la energía) (Herráiz, 1997).

Las ondas superficiales toman importancia a grandes distancias porque su amplitud depende de la distancia por lo que constituyen la principal componente del movimiento del suelo originado por sismos lejanos, y sus efectos sobre determinadas estructuras pueden ser importantes. (Herráiz, 1997).

Se distinguen dos tipos:

a) Ondas Rayleigh

Se caracterizan por que el movimiento de las partículas se produce en un plano vertical y paralelo a la dirección del movimiento de la onda en sentido elíptico y retrógrado con respecto a la dirección de propagación. La amplitud del movimiento de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad (Rivera, 2011).

b) Ondas Love

Ondas que se caracterizan por que se forman cuando existe una interfase que separa una capa de baja velocidad, de un material de velocidad mayor situado debajo. El movimiento de la partícula es horizontal y perpendicular a la dirección de propagación (Rivera, 2011).

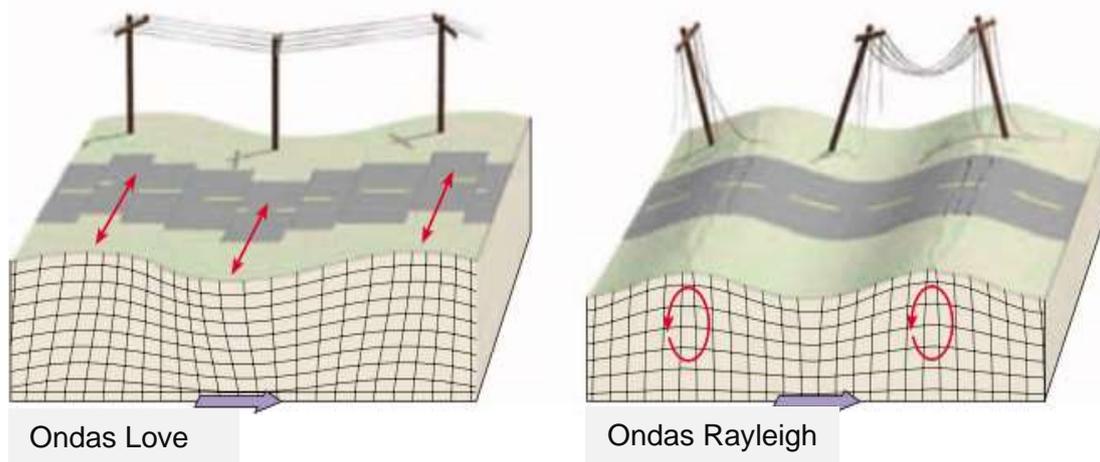


Figura 22. Tipos de ondas de superficiales y la forma de movimiento que propagan (Lutgens & Tarbuck, 2005).

2.2.6 Parámetros que Caracterizan los Sismos

Los sismos son el movimiento repentino de la corteza terrestre provocado por el desplazamiento de las placas tectónicas (Rivera, 2011). Sin embargo, pueden tener diversos orígenes, como, la actividad volcánica, explosiones nucleares, caída de meteoritos, etc. Los sismos de origen tectónico pueden ser causados por desplazamientos a lo largo de fallas geológicas cuando superan la resistencia a la compresión y consecuentemente la liberación de energía potencial acumulada y liberada en forma de energía cinética.

El máximo movimiento se genera en el foco, en el cual la vibración produce ondas que viajan en todas direcciones, dicha energía cinética se atenúa en la corteza terrestre con el aumento de la distancia por ende la magnitud también presenta ese comportamiento, siendo registrada intensidades variables en diferentes puntos por los cuales pasan las ondas. El punto superficial, el cual se encuentra perpendicular al foco o hipocentro, es llamado epicentro. La distancia entre el epicentro y un punto dado (estación sismológica) se denomina distancia epicentral.

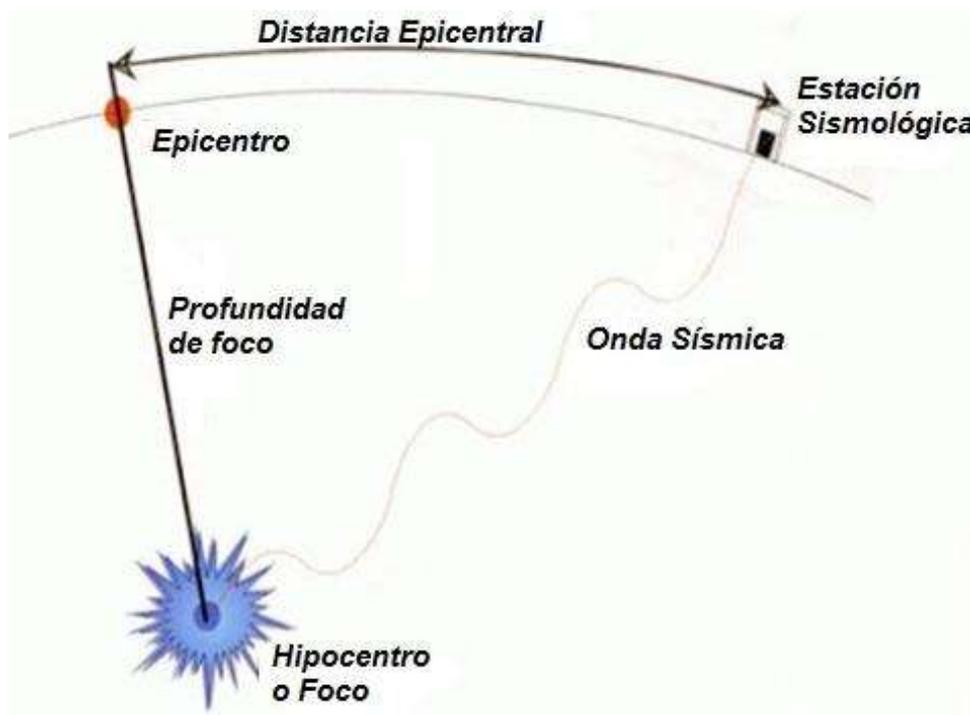


Figura 23. Descripción de la localización de un evento sísmico

Fuente: Tomada de (Roncal, 2017).

Para determinar la ubicación del epicentro, se debe calcular la distancia epicentral de acuerdo a los datos de tiempo de llegada de las ondas P y S y las velocidades registradas, y para calcular la dirección se debe calcular la distancia con respecto a por lo menos 3 estaciones sismográficas con la cual, trazando una circunferencia de radio igual a la distancia estimada para las 3 estaciones, el punto de intersección entre ellas sería el epicentro.

Los parámetros que caracterizan un sismo son la intensidad, magnitud y momento sísmico.

2.2.6.1 Intensidad Sísmica

Parámetro subjetivo de medición de energía sísmica, siendo la forma más antigua de valorar un sismo y empleada antes del desarrollo de la instrumentación sísmica moderna. Se basa en la apreciación de daños causados por un sismo en superficie por eso se dice que es una medida cualitativa del tamaño de un sismo. Mantiene proporción inversa con la distancia desde el epicentro a un punto dado dependiendo de la magnitud y la profundidad del foco (Rivera, 2011). Para conocer y medir la intensidad existen varias escalas, siendo de uso común la escala de Mercalli modificada.

A. Escala de Mercalli Modificada (MMI)

Escala desarrollada por el sismólogo Italiano Mercalli y modificada en 1931 la cual comprende doce grados de intensidades (Lutgens & Tarbuck, 2005).

Grado I. No sentido por las personas, excepto algunas bajo circunstancias especialmente favorables, únicamente instrumental.

Grado II. Sentido sólo por unas pocas personas en reposo, especialmente en los pisos elevados de los edificios.

Grado III. Sentido con bastante nitidez en los interiores, especialmente en los pisos superiores de los edificios, pero muchas personas no lo reconocen como un sismo.

Grado IV. Sentido en interiores de edificios por muchas personas, en los exteriores por muy pocas, genera oscilación de objetos colgantes y de algunos automóviles parados, tintineo de cristales.

Grado V. Sentido por casi todo el mundo, muchos se despiertan. A veces se observan movimiento en los árboles, los postes y otros objetos altos.

Grado VI. Sentido por todos; muchos se asustan y salen a la calle. Algunos muebles pesados se mueven; pocos casos de paredes caídas o chimeneas dañadas. Poco daño.

Grado VII. Las personas no pueden mantenerse en pie, daño despreciable en las edificaciones bien diseñadas; de ligero a moderado en las estructuras de construcción ordinaria; considerable en los edificios con estructuras mal diseñadas.

Grado VIII. Daño ligero en estructuras especialmente diseñadas; considerable en edificios sustanciales ordinarios con derrumbamiento parcial; grande en estructuras mal construidas (caída de chimeneas, columnas, monumentos, muros).

Grado IX. Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas. Los edificios son desplazados de sus cimientos. Se abren grietas en el suelo y rotura de conductos subterráneos.

Grado X. Se destruyen algunas estructuras de madera bien construidas. La mayoría de las estructuras de albañilería y madera se destruyen. Se abren muchísimas grietas en el terreno.

Grado XI. Quedan de pie muy pocas estructuras, graves daños a edificios bien contruidos. Se destruyen los puentes; grandes fisuras en el terreno.

Grado XII. Daño total o catastrófico incluso se ven ondas en el suelo. Grandes desplazamientos de tierra y formación de fallas.

Otras escalas de intensidades:

- a) Agencia Meteorológica Japonesa (JMA): Consta de 7 grados
- b) Rossi-Forel (RF, 1883): En Italia y Suiza, dividida en X grados.
- c) Mercalli, Cancani, (1902-1904). Modificación de la escala anterior, consta de XII grados.
- d) Revisión de Richter (1956): Modificación de la escala de Mercalli MM-56, consta de XII grados.

e) Escala MSK: Escala de XII grados, equivalente a la escala de MM para Europa.

Dado que la medida de la intensidad es un valor con alto grado de incertidumbre, la aceleración máxima horizontal es el parámetro relacionado con la intensidad así lo propuso Omori, (1898). Sin embargo, la intensidad cualificada como el daño generado no solo se relaciona con la aceleración del suelo, sino también, a la frecuencia de la vibración, duración, dirección, la geología local, etc. (Cahuari, 2008).

Para representar la propagación de la energía sísmica en superficie existe los mapas de isosistas, que son líneas que unen puntos con igual intensidad e indican la forma de irradiación de la energía a partir del epicentro. cabe indicar que la forma de las isosistas está determinada por la orientación de la falla, longitud de la zona de ruptura, tipo de suelos y las formaciones geológicas.

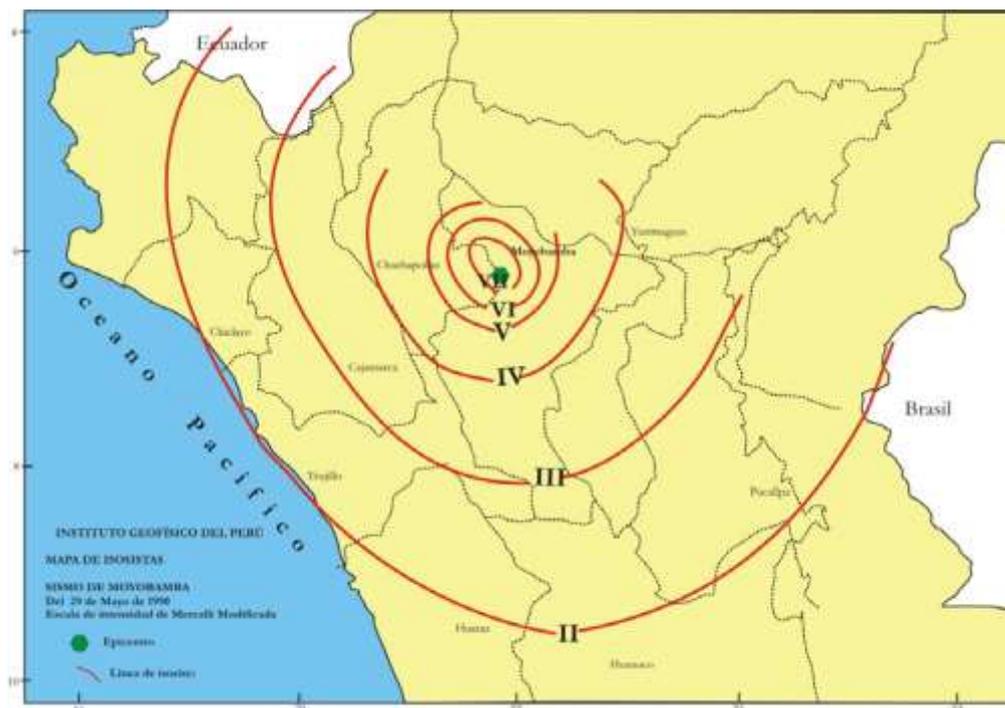


Figura 24. Mapa de Isosistas generadas con la información del sismo ocurrido en Moyobamba el 30 de mayo de 1990 (Cahuari, 2008).

2.2.6.2 Magnitud Sísmica

Es la estimación cuantitativa que indica la cantidad y la violencia con que se libera la energía en el foco, para calcularlo, se mide la máxima amplitud de onda alcanzada en un sismograma registrados por instrumentos de medición adecuados como los sismógrafos y acelerógrafos. Para cuantificarlo existen

diversas escalas, entre ellas destaca la escala de Richter y la escala de Magnitud de Momento (Roncal, 2017).

A. Escala de Richter o Escala de Magnitud Local (ML)

Escala definida por el sismólogo Charles Francis Richter en 1935, como el logaritmo en base 10 de la máxima amplitud registrada en micrómetros en un sismógrafo Wood-Anderson, utilizada para medir sismos poco profundos y con distancias epicentrales menores a 600km. Escala sísmica más utilizada, pero tiende a saturarse a magnitudes mayores a 8 ML, en consecuencia, subestima la cantidad de energía liberada siendo no apropiada para describir el tamaño de un sismo de gran magnitud. (Roncal, 2017).

Para el análisis de dos casos particular; el terremoto de San Francisco en 1906 y el terremoto de Alaska en 1964 se registrarían con las mismas magnitudes Richter, sin embargo, el terremoto de Alaska fue más devastador por ende liberó más energía que el sismo de San Francisco. demostrando, el terremoto de San Francisco, con una magnitud de Richter de 8.3, se degradaría a 7,9 (MW), por otro lado, el terremoto de Alaska, con magnitud Richter de 8.3, aumentaría a 9.2 (MW).

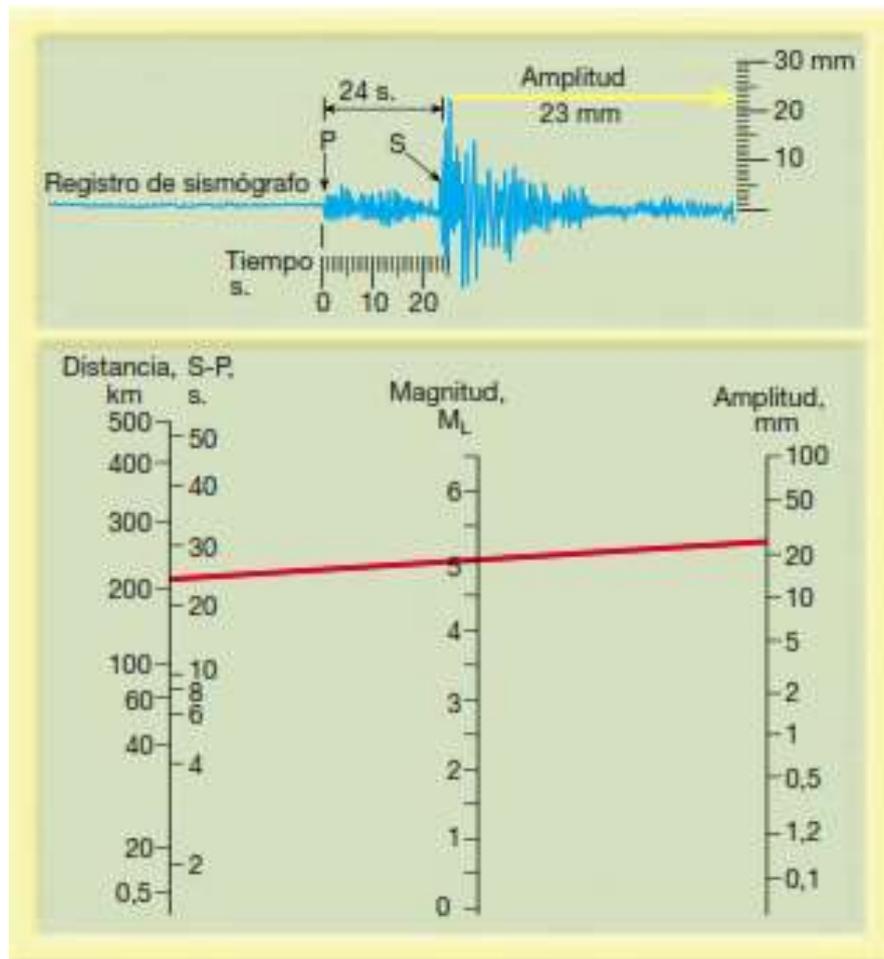


Figura 25. Determinación gráfica de la magnitud local de un sismo a partir de la amplitud y la distancia del foco a un sismógrafo Wood- Anderson (Lutgens & Tarbuck, 2005).

B. Magnitud de Momento (MW)

Frente a la deficiencia (saturación) para medir el tamaño de un evento sísmico de magnitud mayor a 8 M_L , considerando que el terremoto más fuerte registrado ocurrió en Chile en 1960, con una magnitud de 9.5, surge la magnitud del momento (Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979), La M_w es una medida de cuánta energía elástica puede almacenar una roca antes de llegar a la rotura y liberar esa energía en forma de vibraciones. Puede calcularse a partir de los datos obtenidos en campo, como el desplazamiento promedio a lo largo de la falla, el área de la superficie de ruptura y la resistencia de cizalla de la roca fallada (Lutgens & Tarbuck, 2005).

$$M_w = (2/3) \log (M_0) - 10.7$$

Donde: M_0 es el momento sísmico medido en dinas-cm y es obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$M_0 = \mu AD$$

Donde: μ es la resistencia a la ruptura del material a lo largo de la falla, A es el área de ruptura, y D es el desplazamiento producido (Roncal, 2017).

C. Magnitud de Ondas Superficiales (M_s)

Esta escala fue introducida por Gutenberg y Richter en 1942 y utilizada para el cálculo de la magnitud de telesismos, apropiada para el cálculo de la fuerza de los sismos poco profundos y de tamaño moderado, debido a que mide la amplitud de la mayor onda superficial (Rayleigh y/ o Love) con un período cercano a los 20 segundos. para calcularlo se utiliza la siguiente formula:

$$M_s = \text{Log} (A/T) + 1.66 \text{Log} \Delta^\circ + 3.3$$

donde, A es la amplitud del desplazamiento del suelo en micras, T el periodo y Δ la distancia epicentral en grados (válida para sismos ocurridos a distancias comprendidas entre $20^\circ < \Delta < 90^\circ$).

D. Magnitud de Ondas de Cuerpo o de Volumen (M_b)

Escala formulada por Gutemberg en 1945, para el cálculo se mide la amplitud máxima de las ondas P y S con periodos de 1 a 10 segundos, utilizada para describir los terremotos con grandes profundidades focales y situados a gran distancia de la estación de control ($5^\circ < \Delta < 90^\circ$).

$$M_b = \text{Log} (A/T) + Q (\Delta, h)$$

donde, A es la amplitud en micras, T el periodo en segundos, Q la atenuación del medio expresada en función de la distancia epicentral (Δ) y la profundidad (h) según las tablas de Gutenberg y Richter 1956.

2.2.6.3 Momento Sísmico

Es la cantidad de energía irradiada en un evento sísmico, determinada como magnitud física, dada en unidades de fuerza -tiempo y longitud debido a que considera datos de las dimensiones de la falla y las ondas sísmicas generadas

por la ruptura de la misma, analizados a partir de los periodos largos de un sismograma y los registros de la geología histórica. Viene dada por la ecuación:

$$M_0 = \mu AD$$

Donde: μ es la resistencia a la ruptura del material a lo largo de la falla (Módulo cortante de las rocas involucradas en el sismo equivalente a 3×10^{11} dinas/cm²), A es el área de ruptura, y D es el desplazamiento promedio producido.

2.2.7 Estimación de Parámetros Sismológicos de las Fuentes Sismogénicas

Para evaluar el tamaño de los eventos sísmicos, que cada fuente sísmica pueda generar, es necesario conocer la recurrencia sísmica de la fuente que representa el número de eventos mayores o iguales a una magnitud dada y está descrita por la pendiente de la relación de recurrencia de Gutenberg y Richter (b), la razón media anual de actividad sísmica o tasa (N), la magnitud mínima (Mmin) y la magnitud máxima (Mmax).

$$\text{Log } N = a - b \cdot M$$

Donde N es el número de sismos con magnitud mayor o igual a M, y a y b son constantes.

2.2.7.1 Determinación de Magnitud Máxima y Mínima

A. Magnitud Máxima (Mmax)

Definida como el evento de mayor magnitud que podría ocurrir en la fuente sísmica (McGuire, 1976) bajo el criterio que, si en una zona sísmica ocurrió un evento de gran magnitud este evento puede ocurrir nuevamente considerando los eventos del historial sísmico y sismos de registro instrumental, la magnitud máxima viene dada inicialmente por el valor encontrado en el volumen de influencia de cada fuente sismogénica ($M_{\max i}$).

Con el fin de considerar la incertidumbre relacionada al valor de la magnitud máxima $M_{\max Fi}$ de una fuente en particular F_x , el valor de la magnitud máxima se encontraría definido por un rango de valores con una desviación de 0.1 Mw, es decir:

$$M_{\max Fi} = M_{\max i} \pm 0.1 \text{ Mw}$$

B. Magnitud Mínima (Mmin)

La magnitud mínima de la fuente sísmica se define en función de la completitud del catálogo sísmico y corresponde al punto de inflexión de la curva de recurrencia sísmica, siendo obtenido como el punto de máxima curvatura (Wiemer and Katsumata, 1999; Wiemer and Wyss, 2000).

2.2.7.2 Atenuación de Ondas Sísmicas

Es la disminución de la velocidad de las ondas sísmicas en relación a los diversos materiales geológicos que atraviesan y la distancia, para determinarlo existe una gran cantidad de ecuaciones de atenuación las cuales son aplicadas en diferentes partes del mundo y que tienen un amplio rango de condiciones del medio geofísico, especial atención a las ecuaciones que han sido utilizados en su determinación de registros de regiones de subducción (de las costas de Norte, Centro o Sudamérica), registros mundiales, entre otros. Sería recomendable contar con ecuaciones propias que respondan a las fuentes sismogénicas, a los mecanismos de falla y a la geología en los andes del norte del Perú. A continuación, se presenta una breve descripción de las leyes utilizadas:

- **Ley de Atenuación de Sadigh et al (1997)**

Aplicada para sismos corticales o continentales, esta ley considera respuesta espectral horizontal al 5% de amortiguamiento o atenuación en roca y depósitos de suelos firmes aplicada para sismos de magnitud mayor a 4 Mw hasta distancias de 100Km.

Ley de Atenuación para roca:

$$\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6M)) + C_7 \ln(R_{rup} + 2)$$

Ley de Atenuación para depósitos de suelos firmes profundos:

$$\ln(y) = C_1 + C_2M - C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M}) + C_6 + C_7(8.5 - M)^{2.5}$$

Donde, **y** es la aceleración espectral (g), **M** la magnitud momento (Mw) y **r_{rup}** la distancia más cercana al área de ruptura (km).

- **Ley de Atenuación de Youngs et al (1997)**

Esta ley es aplicada para sismos de subducción, interplaca e intraplaca, donde se determina una respuesta espectral horizontal al 5% de amortiguamiento aplicada para sismos de magnitud mayor o igual a 5Mw teniendo en cuenta las características de sitio, definiendo suelo duro poco profundo, suelo profundo (20 m de distancia a la roca) y roca (velocidades de onda cercanos a 750m/s).

Ley de Atenuación para roca:

$$\ln(y)=0.2418+1.414M+C_1+C_2(10-M)^3+C_3\ln(r_{rup}+1.7818e^{0.554M})+0.00607H+0.3846Z$$

Ley de Atenuación para suelo:

$$\ln(y)=-0.6687+1.438M+C_1+C_2(10-M)^3+C_3\ln(R+1.097e^{0.617M})+0.00648H+0.3643Z_T$$

La Desviación estándar = C_4+C_5M (para $M_w>8.0$, se considera el de $M_w=8.0$).

Donde, **y** es la aceleración espectral (g), **M** la magnitud momento (Mw), **r_{rup}** la distancia al área de ruptura (km), **H** la profundidad (km) y **Z_T** el tipo de fuente (0 para interplaca, 1 para intraplaca).

- MacGuire (1974) que no define el mecanismo de la fuente; utiliza registros del occidente de Estados Unidos:

$$a= 472.3 e^{0.64M} (R+25)^{-1.301}$$

donde R es la distancia epicentral en km y la aceleración a se expresa en cm/s².

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Aceleración Pico del Terreno (PGA). Máximo valor absoluto de las amplitudes de todo el registro (Hidalgo et al., 2020)

Isosista. Líneas sobre la superficie que unen puntos de igual intensidad. (Lutgens & Tarbuck, 2005).

Peligro Sísmico. Cuantificación de la intensidad de movimiento que se presentaría en un periodo dado (Aguilar,2016).

Periodo. Tiempo entre la llegada de las crestas de onda o el tiempo que demora una revolución completa de un ciclo de onda (Lutgens & Tarbuck, 2005).

Sismo. Movimiento súbito de la corteza terrestre debido a desplazamientos de los bloques o placas tectónicas. Pueden ser de baja, mediana y alta intensidad, con orígenes tectónicos, volcánicos, etc. (Davila, 2011)

Sismógrafo. Aparato que sirve para medir la intensidad de los sismos, así como para determinar sus elementos. (Davila, 2011).

Sismograma. Diagrama que muestra el movimiento de las agujas de un sismógrafo durante los terremotos (Davila, 2011).

Telesismo. Sismos registrados con una distancia epicentral mayor a 1500 km (Herráiz, 1997).

Temblor. Terremoto de baja intensidad y que no ocasiona daños materiales ni personales (Davila, 2011)

Tectónica. Es la ciencia, rama de la geología, que estudia los diferentes movimientos de la corteza terrestre por acción de los esfuerzos endógenos (Davila, 2011)

Terremoto. Movimiento terráqueo de gran magnitud que ocasiona graves daños materiales y humanos. Los terremotos se miden por la intensidad y los daños que producen sobre es construcciones y vidas humanas. Existen dos escalas que miden las magnitudes de los terremotos Escala de Richter y Escala de Mercalli (Davila, 2011).

CAPÍTULO III MATERIALES Y METODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Geográfica

La provincia de Rioja, está ubicada en el valle del Alto Mayo al nororiente peruano, en la parte norte del departamento de San Martín. Está a 6°6'0"S 77°8'30"O, Tiene una altitud de 848 msnm, sin embargo, algunas montañas se elevan sobre los 1000 m.s.n.m y tiene una superficie de 2535,04 km².

3.1.2 Política

La investigación comprende la Provincia de Rioja, perteneciente a la Región San Martín (ver plano N° 1)

Tabla 2. Ubicación política de la zona de Investigación

Provincia	Región
Rioja	San Martín

3.1.3 Accesibilidad

Para llegar a la Provincia de Rioja existen dos vías, una aérea y otra terrestre, que se detalla a continuación:

Tabla 3 Accesibilidad desde la Ciudad de Cajamarca hacia la provincia de Rioja.

Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo de Vía
Cajamarca- Chiclayo	256Km	6 horas	Carretera asfaltada
Chiclayo-Rioja	571Km	10 horas	Carretera asfaltada
Cajamarca- Chota	143Km	3 horas	Carretera asfaltada en su mayoría
Chota- Rioja	450Km	10 horas	Carretera asfaltada
Cajamarca -Lima	567Km	42 min	Vía aérea
Lima-Rioja	666Km	48 min	Vía aérea

3.1.4 Clima y Precipitación

El clima de la provincia de Rioja es subtropical. La temperatura anual promedio es de 24.4 °C, registrando variantes comprendidas entre 19.8 y 30.4 °C con precipitaciones que pueden llegar a los 2311 mm. (SENAMHI / DRD).

Tabla 4. Tabla climática realizada con datos históricos de 1991 - 2021

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	24.6	24.5	24.4	24.4	24	23.5	23.5	24.6	25.3	25.2	24.8	24.6
Temperatura min. (°C)	21.4	21.4	21.3	21.1	20.7	20	19.8	20.5	21.2	21.5	21.5	21.5
Temperatura máx. (°C)	29.2	29.2	29.1	28.9	28.3	27.8	28.1	29.9	30.8	30.4	29.6	29.2
Precipitación (mm)	239	256	294	242	185	141	110	98	125	176	221	224
Humedad (%)	86%	86%	87%	87%	86%	86%	84%	78%	77%	81%	85%	87%
Días Iluviosos (días)	19	17	19	17	16	13	10	9	11	15	17	19
Horas de sol (horas)	8.3	8.1	7.6	7.4	7.1	6.9	7.6	8.8	8.8	8.5	7.8	8.0

Fuente: (Climate data, 2021).

3.2 PROCEDIMIENTOS

3.2.1 Metodología

La investigación es no experimental, es decir sin la manipulación deliberada de variables; se utilizará el método análisis-síntesis y el método Histórico-Lógico, ya que, a partir de datos compilados en el catálogo sísmico Nacional, se llegará a determinar las características sísmicas de la provincia de Rioja.

Tabla 5. Clasificación de la Investigación.

CLASIFICACIÓN	CATEGORÍA
Tipo	No experimental
Nivel	Analítica
Diseño	Longitudinal
Método de Investigación	Análisis -Síntesis

Fuente: (Hernández, 2014).

3.2.1.1 Población de Estudio

La población a estudiar está representada por las características superficiales de la provincia de Rioja – San Martín, comprende un área 2,535 km².

3.2.1.2 Muestra

En la investigación la muestra está representada por las zonas sismogénicas que afectan a la provincia de Rioja (sistema de fallas Rioja – Moyobamba).

3.2.1.3 Unidad de Análisis

La unidad de análisis son los mapas de aceleraciones sísmicas de la provincia de Rioja.

3.2.2 Identificación de Variables

Para la investigación se han determinado las siguientes variables.

Tabla 6. Variables de estudio.

Variables Independientes	Placas Tectónicas, Sistema de Fallas, Aceleración Pico (PGA)
Variable Dependiente	Caracterización Sismológica.

3.2.3 Técnicas

Las técnicas que se utilizan para la recolección de datos serán la observación de las estructuras Geológicas y la revisión de registros sísmicos proporcionados por entidades como el IGP, CISMID y USGS datos que permiten caracterizar la zona de estudio.

Para ello se desarrolló de acuerdo a las siguientes etapas.

3.2.3.1 Etapa preliminar de Gabinete

Esta etapa comprende la planificación de las actividades a realizar en la investigación, además de la revisión bibliográfica que pueda aportar y guiar en el desarrollo de la misma.

3.2.3.2 Etapa de Campo

Comprende la identificación y descripción de la estratigrafía en estaciones estratigráficas (ver plano N° 4) además de la identificación de fallas geológicas que podrían haber mostrado actividad en los últimos eventos sísmico sentidos.

3.2.3.3 Etapa de procesamiento de la información

En esta etapa se realiza el procesamiento y análisis de datos recopilados en la etapa preliminar de gabinete y datos obtenidos en campo para la elaboración de mapas de aceleraciones en el software R-CRISIS, elaboración de planos de ubicación, topográfico, geológico y perfiles geológicos en el software Arc Gis 10.5; información que permite caracterizar sismológicamente la Provincia de Rioja.

3.2.4 Instrumentos y Equipos

Brújula tipo Brunton: equipo geológico utilizado para medir el rumbo, buzamiento de estructuras geológicas.

Picota geológica: Se utiliza para extraer muestras de campo.

GPS: Permite determinar coordenadas en sistema UTM de la zona a investigar.

Wincha 5m: Instrumento utilizado para realizar mediciones longitudinales en campo.

Libreta de Campo: Permite tomar apuntes necesarios de la zona de investigación.

Cámara fotográfica digital: Equipo necesario para la captura de fotografías de en la etapa de campo.

Protactor: Instrumento necesario para medir y plasmar rumbos y buzamientos en el plano.

Laptop: Equipo necesario para la digitalización del informe de tesis.

Microsoft Office: Procesador de texto utilizado para digitar la presente investigación.

3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

3.3.1 Falla de Shitari

La falla de Shitari conocida también como fallas Rioja- Moyobamba, forma parte de un conjunto de fallas, entre ellas la falla santa cruz, ubicadas en el límite de la Cordillera Oriental en la faja Subandina, se extiende longitudinalmente a nivel de la provincia de Rioja (ver plano N° 4), geográficamente pasa a 6 km al oeste de la ciudad de Rioja y muy cerca a los poblados de Segunda Jerusalén y Nueva Cajamarca donde afecta a las formaciones Aramachay y Condorsinga, además se ubica cerca a poblados como Naranjos, San Agustín, Naciente y Belén (Macharé et al., 1997). Está identificada como una falla inversa activa, con dirección NW-SE y de bajo ángulo de buzamiento 30°-45° SO dando la denominación de cabalgamiento Andino (Benavente y Macharé, 2016).

La evidencia superficial de la falla de Shitari está marcada por una escarpa bastante rectilínea, que presenta características morfológicas como el desplazamiento de cursos de agua, colinas desplazadas y escarpas en depósitos cuaternarios (Macharé et al, 2001).

La ocurrencia de sismicidad histórica e instrumental (1927,1968,1990,1991) son indicios de la recurrente activación de las fallas de Shitari (Alva y Chang, 2003). Los eventos sísmicos de 1990 y 1991 registraron magnitudes de 6.4 y 6.2 Mw respectivamente (Macharé, Benavente, & Audin, 2008)

Tabla 7. Descriptores de la falla de Shitari.

Item	Descriptores
Cinemática	Inversa
Rumbo	NE-SE
Buzamiento	30°-45°
Edad	Histórica
Confiabilidad	Confirmada

Fuente: (Benavente y Macharé, 2016).



Imagen 1. Agrietamiento de terreno producto del sismo de 1991. Tomada del CISMID, (2022).

3.3.2 Anticlinal Naranjos

También denominado anticlinal cerro blanco, comprende el centro de la provincia de Rioja con orientación NO-SE, comprendido por la falla mirador al flanco Oeste y la falla San Agustín al flanco Este y una longitud aproximada de 26 km, Chumpitaz et al. (2015) han cartografiado rocas metamórficas del Ordovícico al Carbonífero y areniscas cuarzosas Pérmicas del Grupo Mitu que se encuentran infrayaciendo discordantemente a las calizas del Grupo Pucará (Triásico-Jurásico)

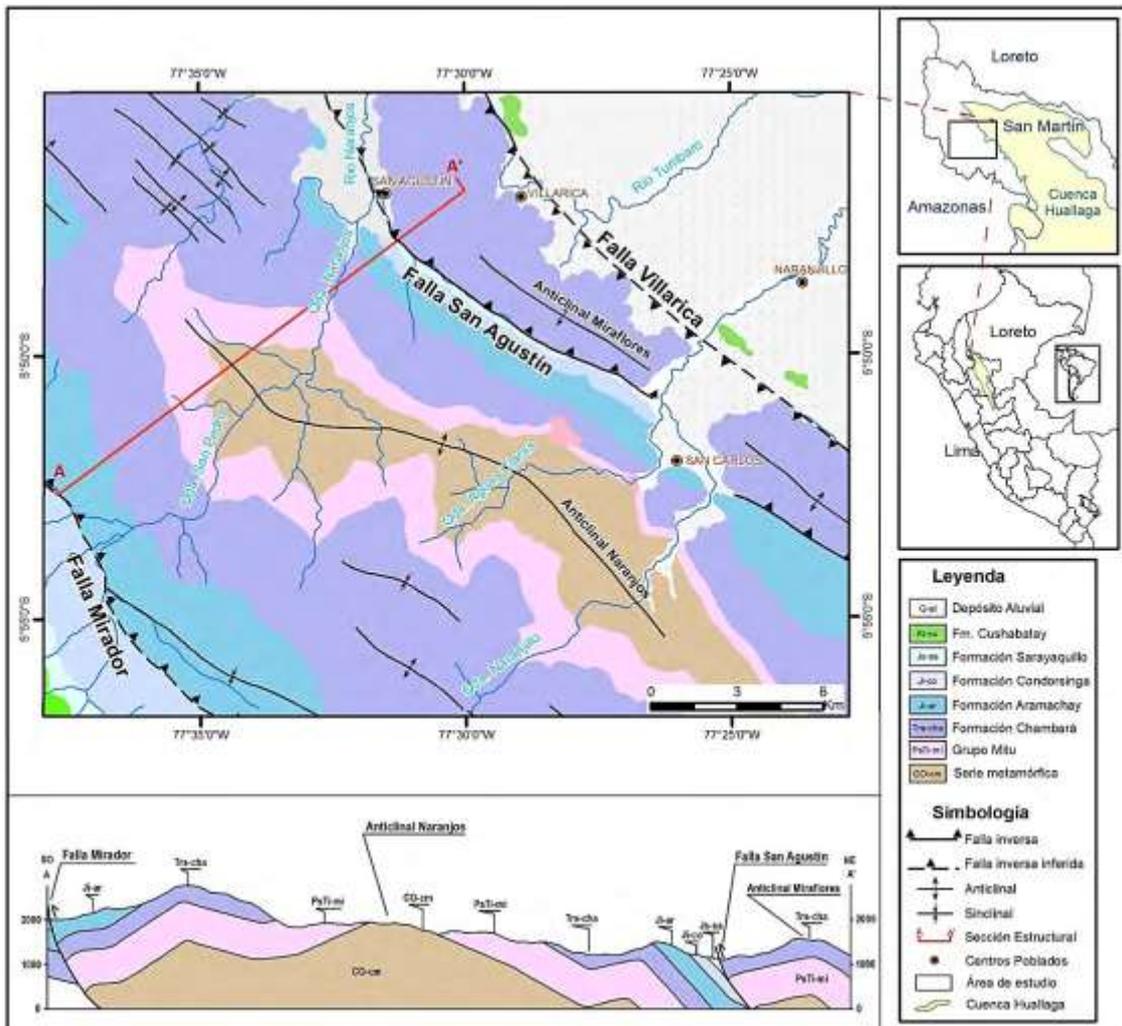


Figura 26. Mapa Geológico del anticlinal Naranjos. (Chumpitaz, Chacaltana, & Valdivia, 2015).

3.4 MARCO ESTRATIGRÁFICO

3.4.1 Grupo Mitu (PET- m)

La litología del Grupo Mitu, se encuentra distribuido en la parte central – occidental de la provincia de Rioja, y muy poco evidenciada debido a la vegetación, litológicamente conformada por areniscas rojizas de grano medio dispuestas en estratos delgados intercalada con limolitas.



Foto 1. Areniscas de grano medio en estratificación delgada. E1: Coordenadas 234467E- 9339380 N.

3.4.2 Grupo Pucará

El Grupo Pucará representa la sedimentación marina entre el Triásico superior – Jurásico inferior como consecuencia de la transgresión Noriana (Prinz, 1994), la cual dio lugar a una plataforma extensa y alargada con rumbo NNO – SSE que posteriormente fue plegada, formando anticlinales y sinclinales, de extensión kilométrica hasta fallamiento cercano al poblado de Segunda Jerusalen.

3.4.2.1 Formación Chambará (Ts-ch)

Corresponde a la base del Grupo Pucará y litológicamente está conformada por calizas resistentes a la meteorización dispuestas en estratos de gran espesor, de tonalidades grises. Se pueden ver afloramientos al oeste del poblado Aguas Claras, en los poblados de Amangay y cercanos a Naciente, donde los estratos son de gran espesor y orientación NO-SE.



Foto 2. Calizas grises en estratos de gran espesor evidenciada en talud de carretera. E2: Coordenadas 246477 E- 9325551 N.

3.4.2.2 Formación Aramachay (Ji-a)

Comprende la parte media y menos resistente del Grupo Pucará con un espesor de 200m a 300 m, conformada por calizas y limoarcillitas marrones, debido al contenido de materia orgánica, se evidencia en los poblados de Bellavista, San Carlos y Bolívar, donde se observa calizas bituminosas de color gris oscuro y olor fétido en estratos de mediano espesor y limoarcillitas fosilíferas en estratos delgados (menores a 40cm) con presencia de ammonites en el límite con la Formación Condorsinga.



Foto 3. Caliza gris oscura de olor fétido en estratos resistentes. E3: Coordenadas 223454 E- 9342013 N.



Foto 4. Limoarcillitas fosilíferas (ammonites) de color marrón en estratos delgados. E4: Coordenadas 227204 E- 9336523 N.



Foto 5. Marca de ammonites en matriz limoarcillosa, característico de la Formación Aramachay. Coordenadas 227204 E- 9336523 N.

3.4.2.3 Formación Condorsinga (Ji-c)

Constituye el límite superior del Grupo Pucará correspondiente al Jurásico Inferior, en la provincia de Rioja se distribuye a longitudinalmente en el límite oeste donde se puede notar afloramientos de caliza micrítica en tonalidades grises a beige dispuestas en estratos de mediano espesor (25-40cm) y en los poblados de Ricardo Palma, Naranjos, donde se aprecia una intercalación de estratos de calizas micríticas grises con estratos delgados de limoarcillitas.

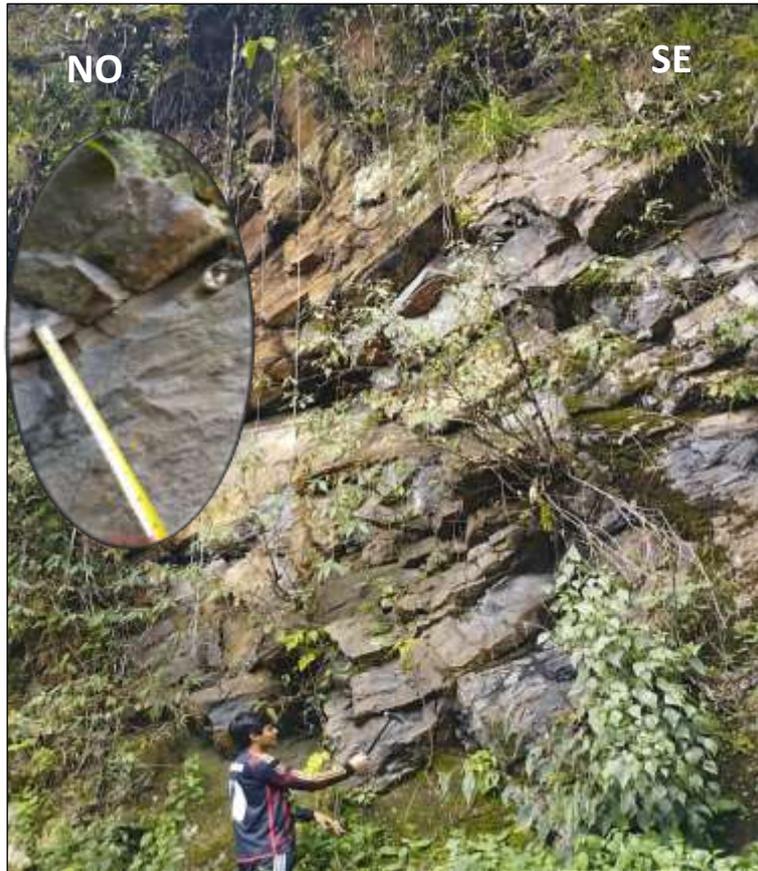


Foto 6. Caliza micrítica de tonalidad gris en estratos resistentes de mediano espesor.
E5: Coordenadas 246492 E-9321799 N.

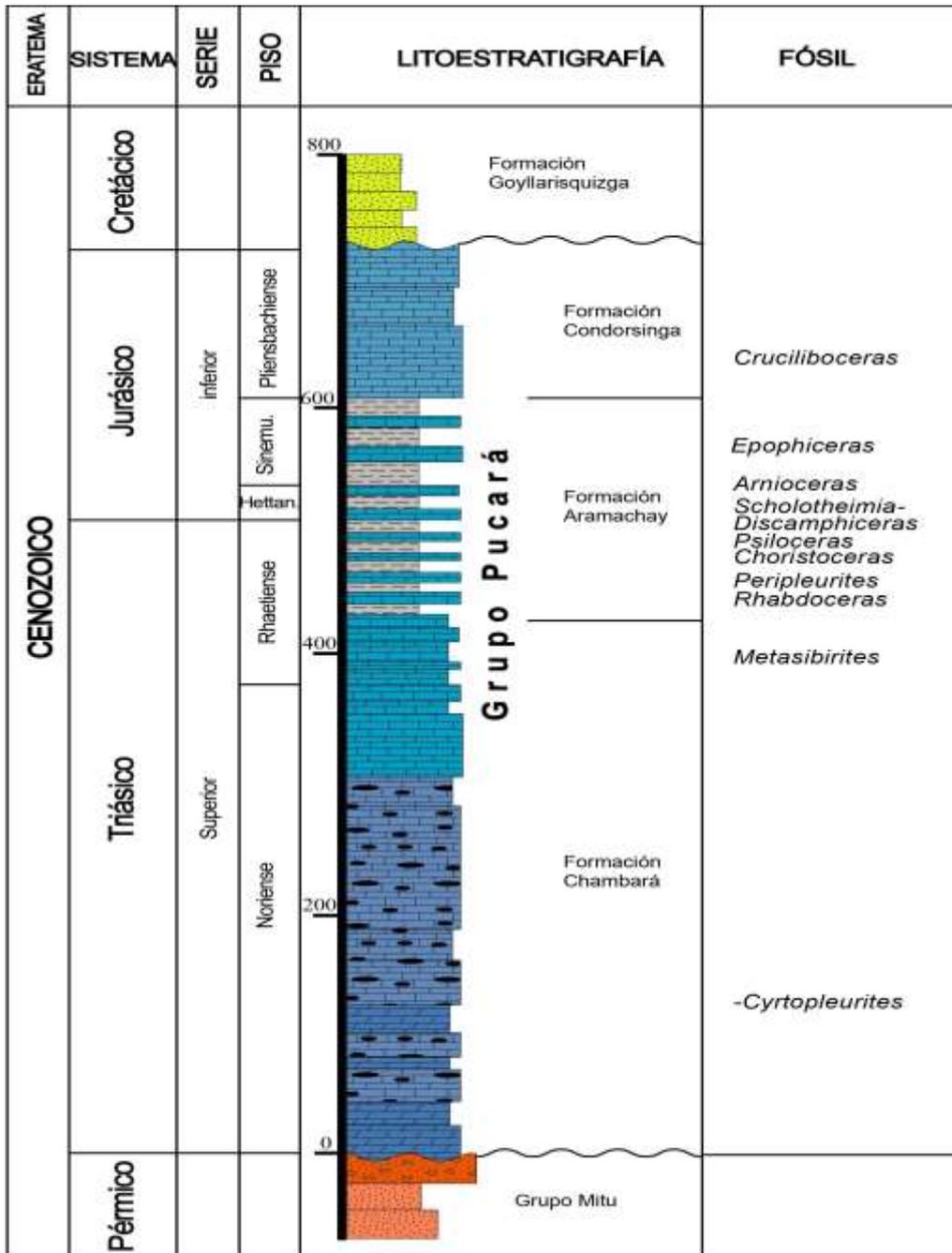


Figura 27. Estratigrafía del Grupo Pucará de la sección del río Utcubamba (Prinz, 1985).

3.4.3 Formación Sarayaquillo (Js-s)

También denominada capas Rojas (León, Chumpitaz, & Fabián, 2022). Esta Formación Corresponde a la sedimentación del Jurásico superior y queda limitada entre el grupo Pucará por la base y el Grupo Oriente en el techo. A nivel de la provincia de Rioja se encuentra pocos afloramientos notados en los taludes de carretera al NO, donde se puede apreciar estratos delgados y de mediano

espesor de areniscas rojizas de grano medio, y la presencia de limoarcillitas rojizas cubiertos por depósitos cuaternarios.



Foto 7. Areniscas de grano medio, con coloración superficial gris debido a la meteorización. E6: Coordenadas 198550 E- 9371448 N.

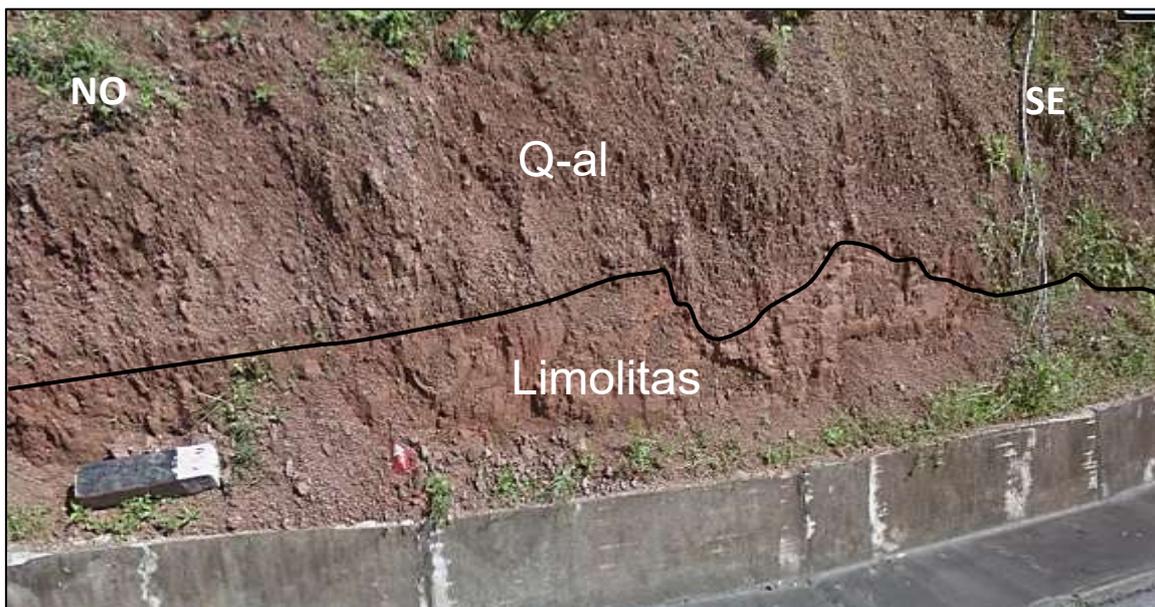


Foto 8. Limolitas rojizas cubiertas por depósitos cuaternarios presentes en los márgenes de carretera. E7: Coordenadas 198907 E- 9371607 N.

3.4.4 Grupo Oriente (Ki-o)

Está formado por areniscas cuarzosas blancas a pardo amarillentas de grano medio a grueso, en estratos delgados, con estratificación cruzada, seguidas en la parte media por limolitas y limoarcillitas se encuentra suprayeciendo en ligera discordancia a la Formación Sarayaquillo e infrayace en concordancia a la Formación Chonta.

3.4.4.1 Formación Cushabatay (Ki-cu)

Comprende la unidad inferior del Grupo Oriente, conformada por areniscas cuarzosas, dispuestas en estratos gruesos con estratificación sesgada e intercalaciones de lutitas y limolitas. Solamente existen dos afloramientos cartografiados al este del poblado de San Miguel y en el extremo norte de la provincia.

3.4.4.2 Formación Agua Caliente (Ki-ac)

Representa el límite superior del Grupo Oriente, conformada por areniscas de grano medio en tonalidades blancas y amarillentas, cubiertas en gran parte de su extensión por vegetación, y se distribuye al oeste y norte de la Provincia de Rioja.



Foto 9. Afloramiento de areniscas blanquecinas de grano medio, evidenciada en corte de carretera. E8: Coordenadas 221846 E- 9366804 N.

3.4.5 Formación Chonta (Kis-ch)

Se encuentra sobre el Grupo Oriente, con litología calcárea y arcillosa, conformada por estratos de calizas gris a beige, intercaladas con lutitas gris claro en estratos de pocos centímetros con espesor promedio de 500 m que corresponde al Cenomaniano – Coniaciano.



Foto 10. Estratificación delgada de calizas gris claro, con presencia de lutitas en estratos muy delgados. E9: Coordenadas 222549 E- 9367489 N.

3.4.6 Formación Cachiyacu (Ks-c)

En la provincia de Rioja se encuentra cartografiado una delgada franja en el límite noroeste, constituida por lutitas grises a gris oscuras, de aspecto bituminoso con intercalaciones de areniscas finas y limolitas en capas delgadas menores de 15 cm y de acuerdo con León, Chumpitaz, Fabian, (2022) en algunos afloramientos puede presentar capas de carbón con intercalaciones de areniscas cuarzosas y calizas.

3.4.7 Formación Ipururo (Nmp-i)

Cartografiado al norte y en la Ciudad de Rioja, como la sedimentación de arenisca de grano medio a fino y capas de limoarcillitas de tonalidades beige cubierta en parte por depósitos cuaternarios.



Foto 11.Limoarcillitas de tonalidad beige. E10: Coordenadas 254205 E- 9333516 N.

3.4.8 Depósitos aluviales (Q-al)

Constituidos de materiales heterogéneos, producto de la erosión y transportados por el agua, siendo clastos angulosos a subangulosos de areniscas, generalmente con matriz areno limosa y limoarcillosa y depositados formando terrazas y como cobertura de la gran mayoría de las formaciones geológicas, en donde se encuentran asentados gran cantidad de poblados como Santa Clara, Angaiza, Patria Nueva, San José, La Esperanza, entre otros.

En el área de estudio, en su mayoría suprayacen a las rocas de la Formación Condorsinga, con un espesor estimado de hasta 10 metros en las partes bajas y pocos metros en las partes altas, dónde son cubiertos por materia vegetal, y son aprovechados para la agricultura en algunos sectores.



Foto 12. Se aprecia un depósito cuaternario de matriz limosa rojiza en el margen de carretera. E11: Coordenadas 226986 E- 9363689 N.



Foto 13. Depósito aluvial de matriz limosa con clastos angulosos y erosionados por la lluvia. E12: Coordenadas 224129 E – 9364285 N.

3.4.9 Depósitos fluviales (Q-fl)

Constituyen los cauces de los ríos, conformados por gravas subangulosas de matriz arenosa, limo y poca arcilla como resultado de la erosión, traslado y depositación de rocas preexistentes del paleozoico y mesozoico, transportados por una corriente fluvial que debido a ella y a las distancias de transporte los clastos toman forma redondeada.

Se observan distribuidos en la parte SE de la provincia de Rioja, ocupando una extensión del 30% aproximadamente, donde se encuentran asentados la mayor parte de los poblados, generados por los ríos Mayo, Negro y en gran parte por el río Tónchima.



Foto 14. Depósito fluvial de matriz limo-arenosa y clastos sub redondeados en el margen izquierdo del río seco. E13: Coordenadas 248810 E – 9326559 N.

3.4.10 Depósitos Coluviales (Q-cl)

Depósitos que se caracterizan por tener origen en el desprendimiento in situ del macizo rocoso y poco traslado, debido a la gravedad. Se encuentran constituidos por acumulación de bloques, y gravas con matriz limosa en los piedemontes al NO de la provincia.



Foto 15. Depósito coluvial de areniscas con escasa presencia de limo. E14: Coordenadas 218096 E- 9365410 N.

3.5 MARCO TECTÓNICO

3.5.1 Placa de Nazca

La placa de Nazca limita con la placa de Cocos por el extremo Norte, por el extremo Sur, limita con la placa antártica, por el Oeste con la placa del Pacífico y por Este con la placa Sudamericana, subduciendo a esta última y debido a este proceso genera plegamiento, fracturamiento y consecuente sismicidad cortical e intraplaca en el nororiente del Perú.

Tavera et al. (2014) describe a la placa de Nazca con geometría heterogénea, con subducción subhorizontal en las regiones norte y centro de Perú y normal en la región sur con velocidad estimada de 6 a 8 cm por año (Veloza et al., 2012)

En su extensión superficial, la placa contiene a las dorsales de Nazca, Sarmiento y Alvarado, y a las fracturas de Mendaña, Nazca y Virú; además de la fosa peruano-chilena, encargados del comportamiento geodinámico en el Perú.

Placa sudamericana

Definida entre las placas del Caribe, norteamericana, antártica, africana y la placa de Nazca y debido a la interacción con la misma generan la cordillera de los andes y la fosa peruano-chilena.

Para Macharé et al, (1986) de acuerdo a la configuración estructural que presenta esta placa se puede considerar las siguientes unidades: los Taludes inferior, medio y superior; la plataforma continental; la zona costanera; el pie de Monte Pacífico; la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental, la zona Subandina y la Llanura Amazónica.

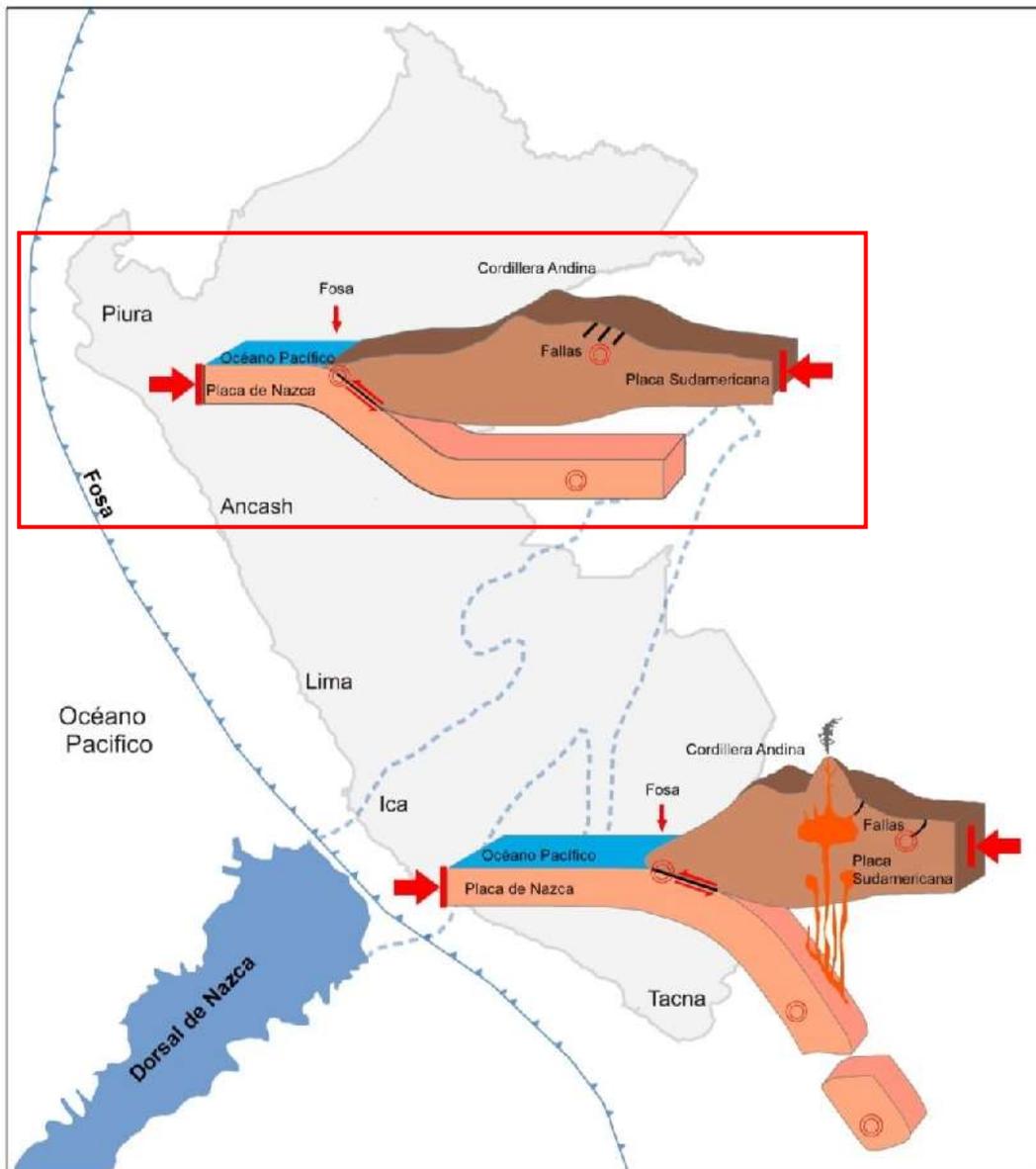


Figura 28. Esquema de los dos tipos de subducción en el Perú (subhorizontal y normal) y ubicación de la dorsal de Nazca.

Fuente: Tavera (2020).

3.5.2 Cordillera Norte

Comprende los andes del Norte de Perú, limitado por el nudo de Pasco y el sur de Ecuador, con orientación NW-SE, conformada por la cadena oriental, cadena central y cadena occidental, originada por la subducción de la placa de Nazca (oceánica), bajo la placa sudamericana (Jame,1971) asociado a un borde compresivo debido a que las dos placas antes mencionadas se mueven en la misma dirección, pero en sentidos opuestos y en consecuencia, generan esfuerzos capaces de formar pliegues y fallas en dirección perpendicular al movimiento.

La provincia de Rioja se encuentra entre la cadena oriental y cadena central del norte del Perú, lo que determinaría el fracturamiento, plegamiento y zonas de debilidad que hacen susceptibles a un alto grado de sismicidad.

3.6 FUENTES SISMOGÉNICAS

Se define una fuente sismogénica como el área o línea que presenta características geológicas, geofísicas y sísmicas similares u homogéneas en toda su extensión. Las fuentes sismogénicas definidas por Aguilar, Roncal & Piedra, (2017) las cuales abarcan a la provincia de Rioja, corresponde la fuente cortical F-27 y la fuente intraplaca F-13 las mismas que son responsables de generar sismos superficiales e intermedios, siendo notoria la mayor cantidad de sismicidad generada por la fuente intraplaca (ver figuras 29 y 30) y en menor proporción sismicidad cortical, esto asociado a las fallas o sistema de fallas que contiene cada fuente sismogénica. Es de importancia el cálculo de la recurrencia sísmica de cada fuente, para ello (Aguilar, Roncal, & Piedra, 2017) determinan los parámetros de recurrencia estimados para cada fuente sismogénica. (Ver tabla 10).

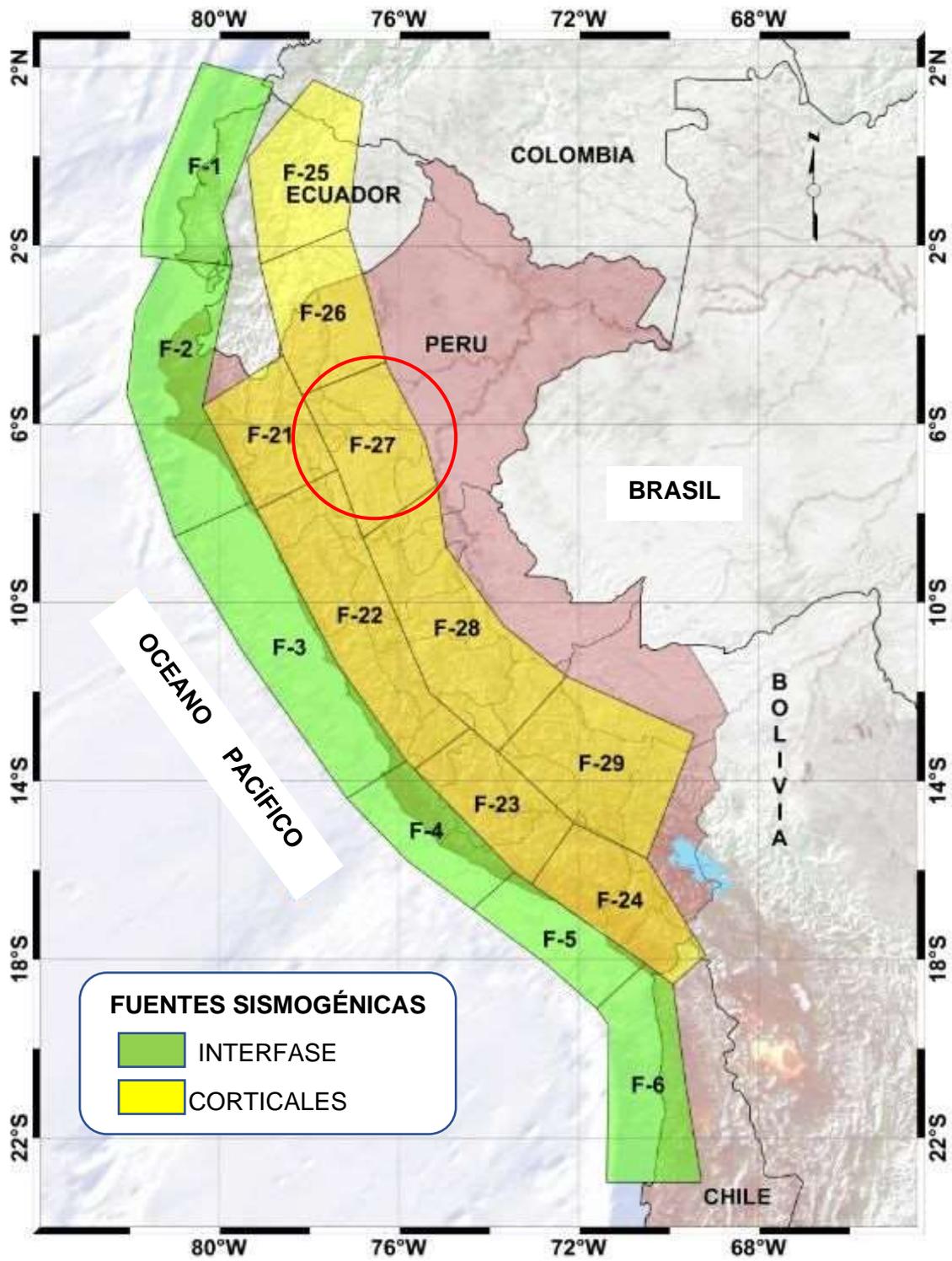


Figura 30. Fuentes sísmicas de subducción interfase y corticales

Fuente: Tomado de Aguilar, Roncal & Piedra., (2017)

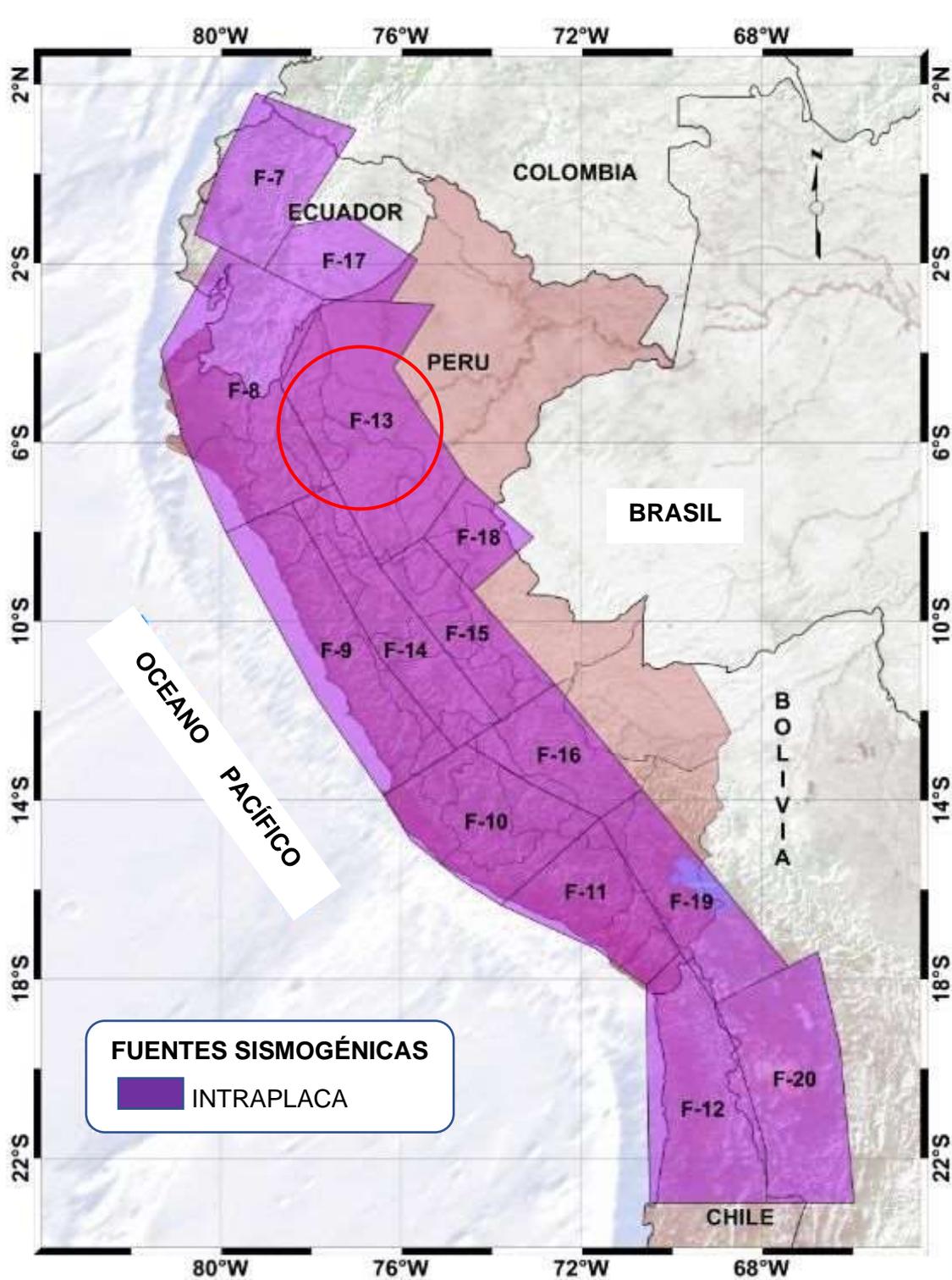


Figura 31. Fuentes sismogénicas de subducción de Intraplaca.

Fuente: Tomado de Aguilar, Roncal & Piedra., (2017).

Tabla 8. Coordenadas de la fuente sismogénica cortical F-27.

FUENTE	CORDENADAS UTM		
	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD(Km)
F-27	815669.36	9408136.41	30
	238715.84	9224597.91	30
	302105.74	9054325.61	30
	483997.13	9186562.02	30
	452437.63	9304497.38	30
	355351.33	9490313.14	30

Tabla 9. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas definidas por Aguilar, Roncal & Piedra., (2017).

FUENTE	Mw			
	Mmax	Mmin	β	Tasa
F-27	6.8	4.8	2.162	1.270
F-13	7.4	4.3	1.491	3.710

Tabla 10. Coordenadas de la fuente sismogénica Intraplaca F-13.

FUENTE	CORDENADAS UTM		
	ESTE	NORTE	PROFUNDIDAD(Km)
F-13	198021.75	9690384.87	170
	758799.13	9477299.45	100
	338085.58	9031032.79	120

446127.84	9102403.45	125
548843.24	9251543.95	125
370834.67	9521075.57	110
471661.16	9649773.44	130

Fuente: Tomado de Aguilar, Roncal & Piedra., (2017).

3.7 CARACTERIZACIÓN DE LA SISMICIDAD O DISTRIBUCIÓN DE LOS SISMOS EN LA REGIÓN SAN MARTÍN

Los sismos ocurridos hasta antes de 1960 solo son descritos en relatos de los pobladores, no hay evidencia instrumental. Desde enero del mismo año el IGP inició a recopilar datos sísmicos en el catálogo nacional, desde entonces se han registrados 22713 eventos hasta diciembre del 2021, siendo 520 registrados en y/o cercanos a la provincia de Rioja, todos de magnitud menor a 7.5 Mw y la mayoría imperceptibles para las personas.

En la zona de interés del presente estudio no existe estación sismográfica alguna, la más cercana se encuentra en la provincia de Moyobamba, pero a la actualidad se encuentra inactiva, pudiendo registrar solamente datos de las estaciones de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (Amazonas) y Estación de la Universidad Nacional Autónoma del Alto Amazonas (Yurimaguas).

Con el análisis realizado a los registros sísmicos, se cuenta con data histórica desde el 1471 a 1960, donde evidentemente la limitante era la poca instrumentación por parte de IGP, que desde el 1960 ya fue implementándose y desde el año 2000 se cuenta con mayor cantidad de registros sísmicos.

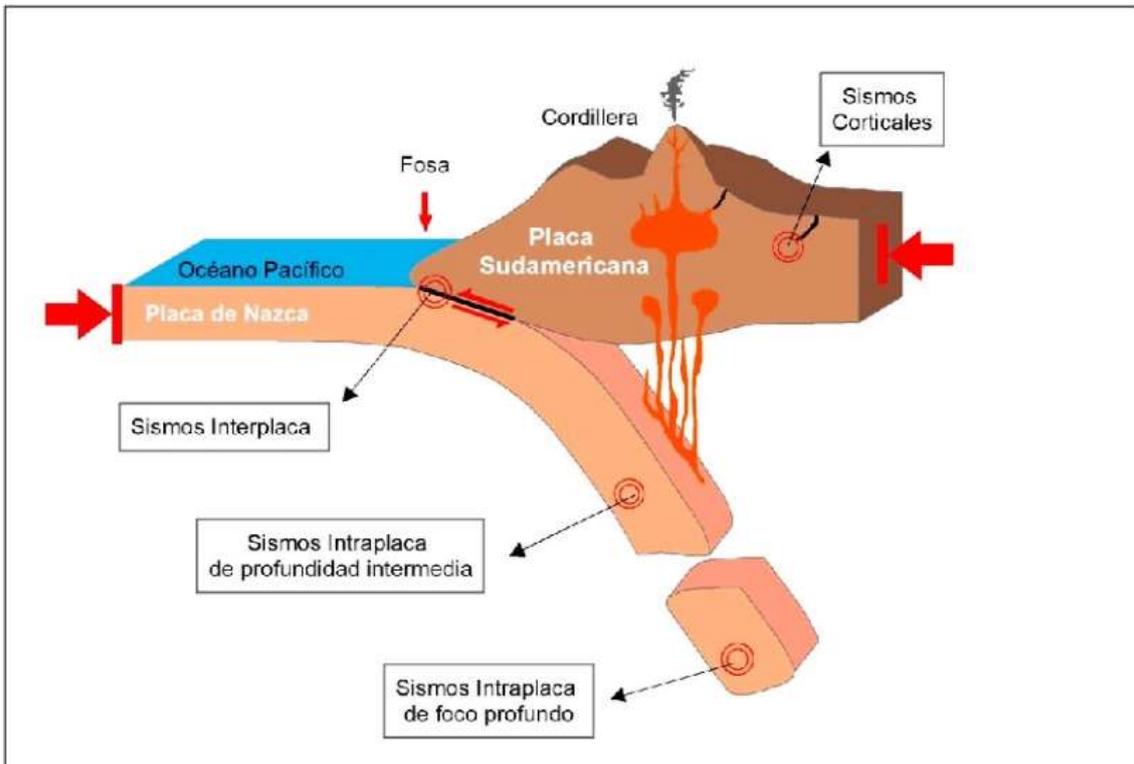


Figura 32. Esquema de los tipos de sismos que ocurren en zonas de convergencia de placas: Placas de Nazca y Sudamericana.

Fuente: Tavera, (2020).

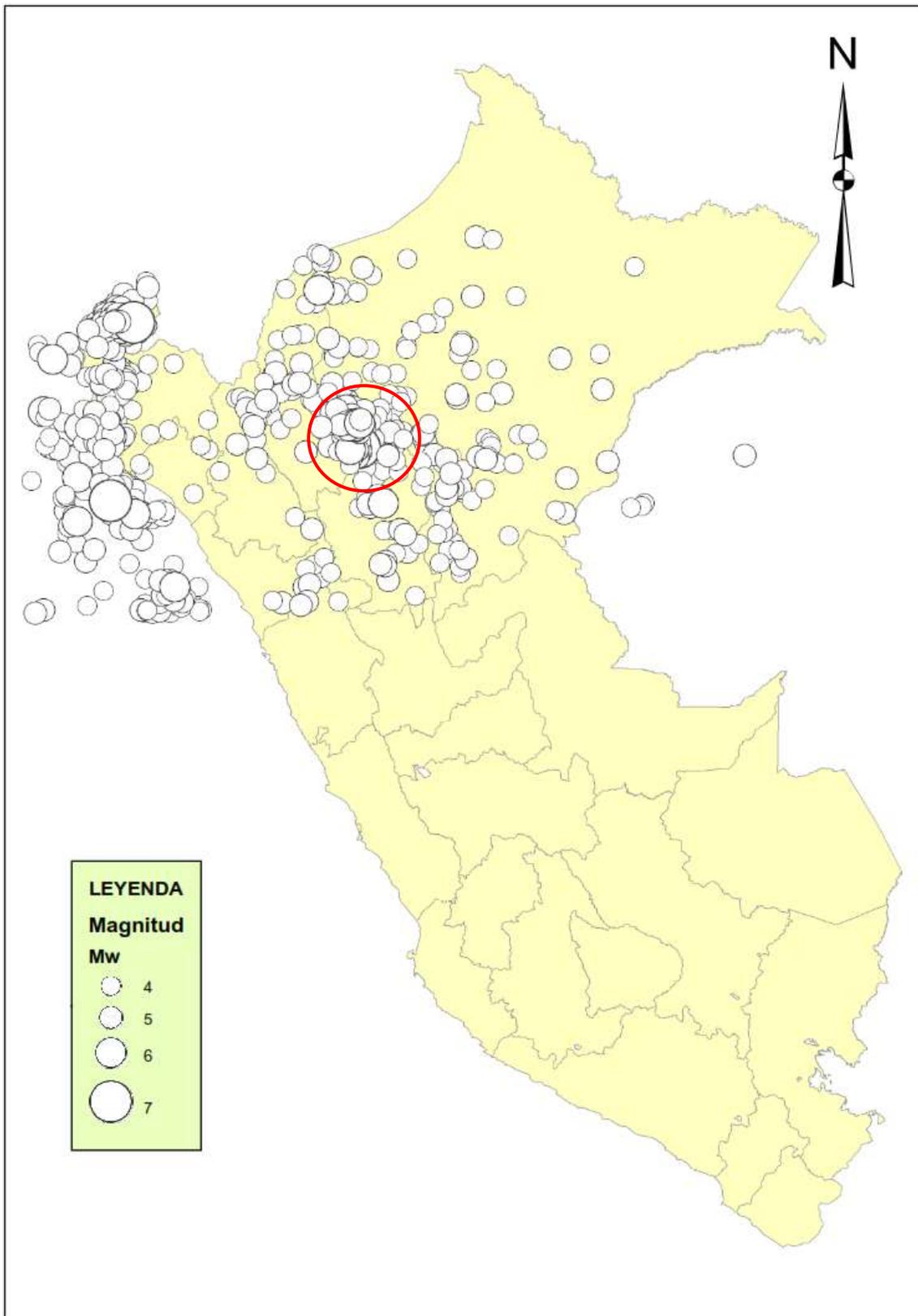


Figura 33. Ocurrencia de sismicidad superficial o cortical en el norte del Perú desde 1960, de acuerdo al catálogo sísmico actualizado en 2022.

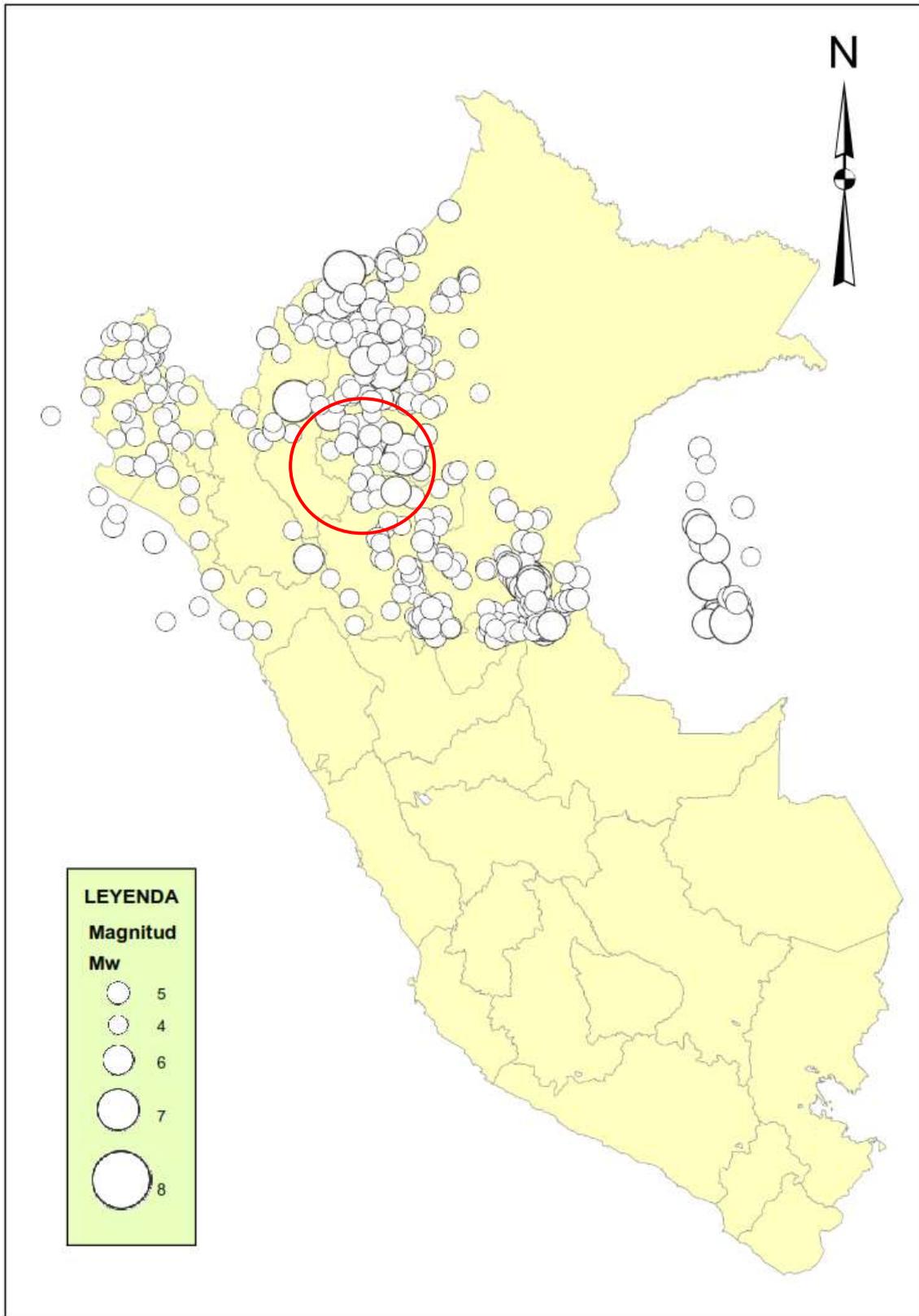


Figura 34. Sismicidad intermedia en el norte del Perú desde 1960, de acuerdo al catálogo sísmico actualizado.

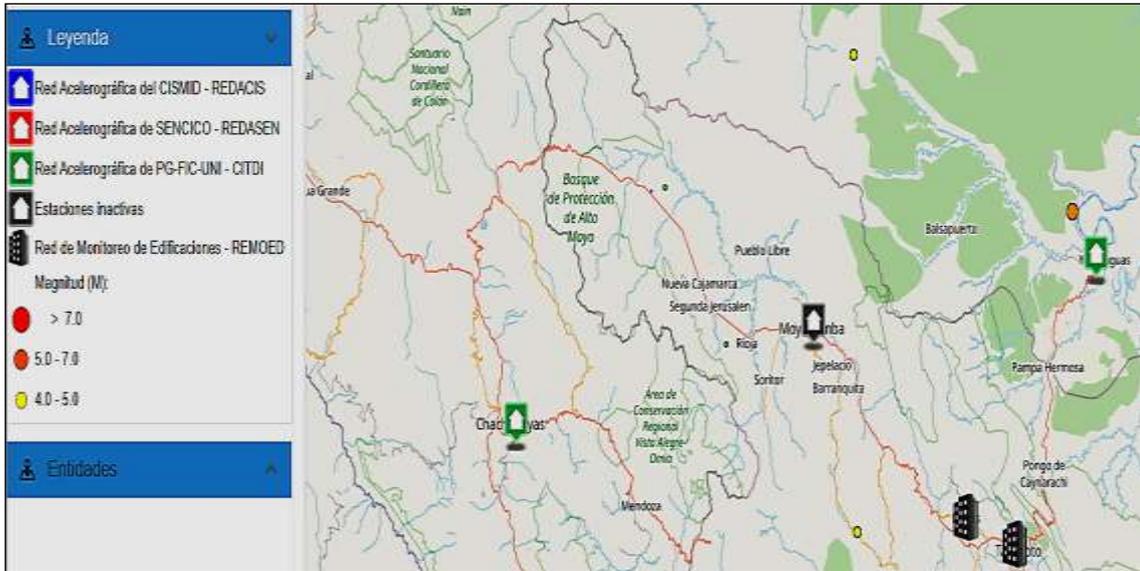


Figura 35. Estaciones de monitoreo cercanas a la Provincia de Rioja.

Fuente: CISMID, (2020).

3.8 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para el procesamiento de los datos se ha seleccionado más de 528 eventos sísmicos de los cuales se ha modelado 19 con magnitudes mayores e iguales a 5.5 Mw, siendo los más representativos para la zona de estudio, es decir, los que podrían generar fuertes niveles de sacudimiento, pudiendo incluso llegar a generar daños materiales y/ o personales, para ello se determina la variación de la Intensidad en MMI a lo largo de la provincia de Rioja y se cuantifica la aceleración (PGA) del suelo por cada evento.

3.8.1. DETERMINACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO

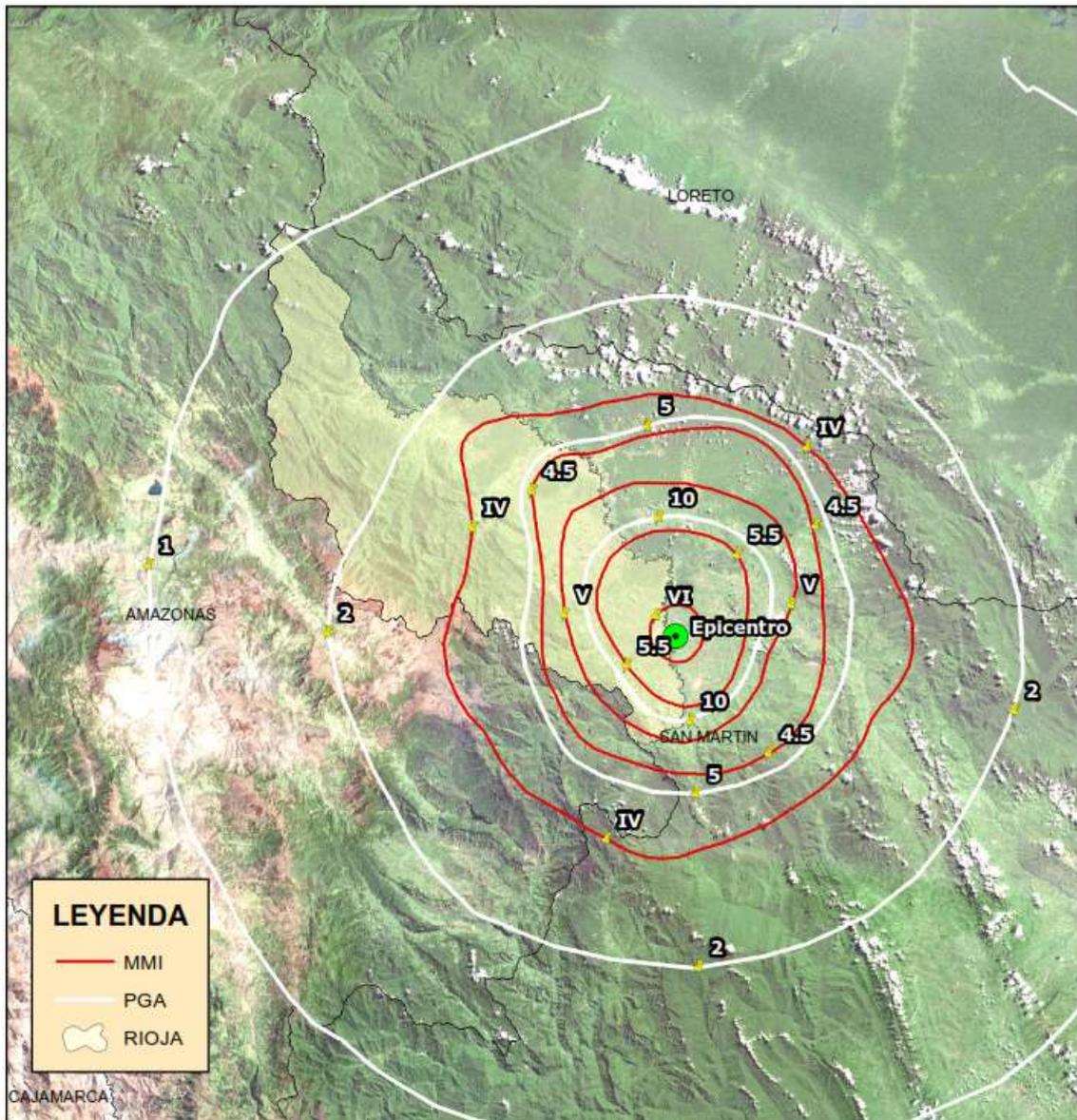


Figura 36. Curvas de isovalores estimadas para el sismo registrado 08/06/1990 a las 20:14 a 3Km al E de la ciudad de Rioja de magnitud 5.5 Mw a 25.6km de profundidad. Generando intensidades de VI MMI al sur de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI en la parte central donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

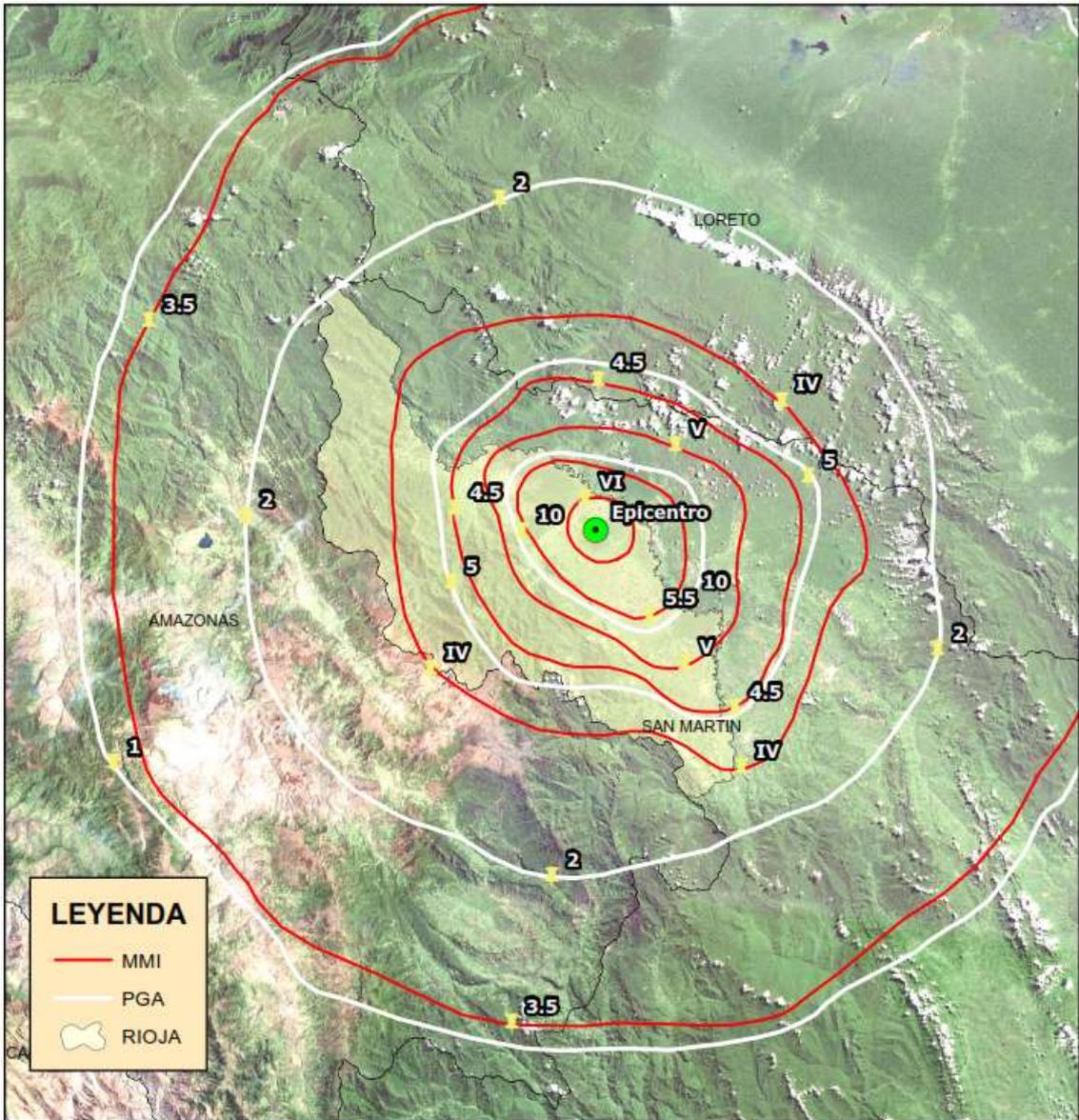


Figura 37. Curvas de isovalores estimadas para el sismo registrado 05/04/1991 a la 00:01 a 20Km al NW de la ciudad de Segunda Jerusalén de magnitud 5.5 Mw a 24.1km de profundidad. Generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al límite Oeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

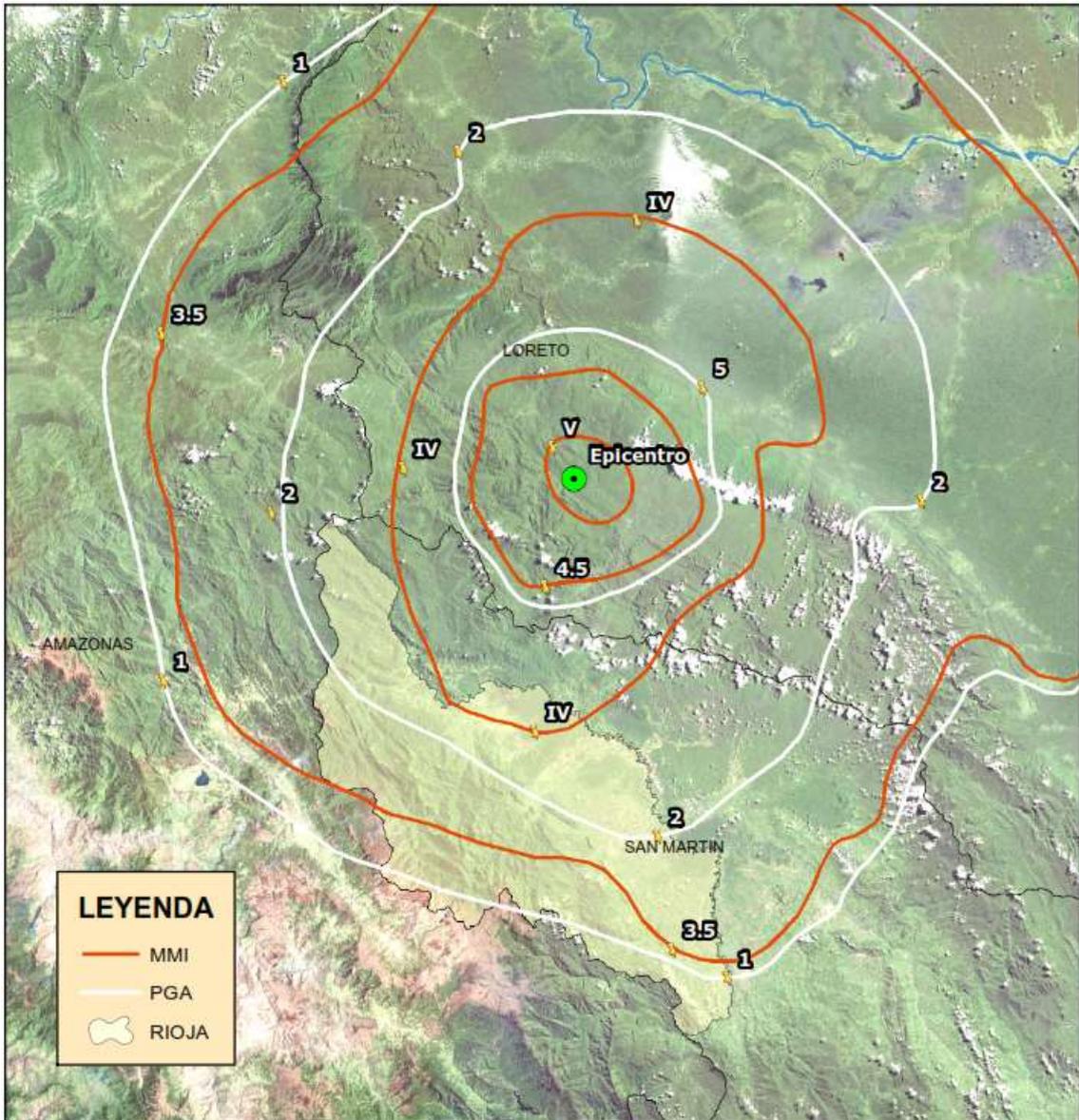


Figura 38. Curvas de Isovalores estimadas para el sismo registrado el 09/08/1982 a las 23:51, magnitud 5.5 Mw a 33km de profundidad, epicentro a 71Km al N de la ciudad de Segunda Jerusalén. Generando Intensidades de V MMI cerca al epicentro y de IV MMI al extremo Este de Rioja donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones. y valores de aceleración de hasta 2% en sentido longitudinal de la gran parte de la provincia.

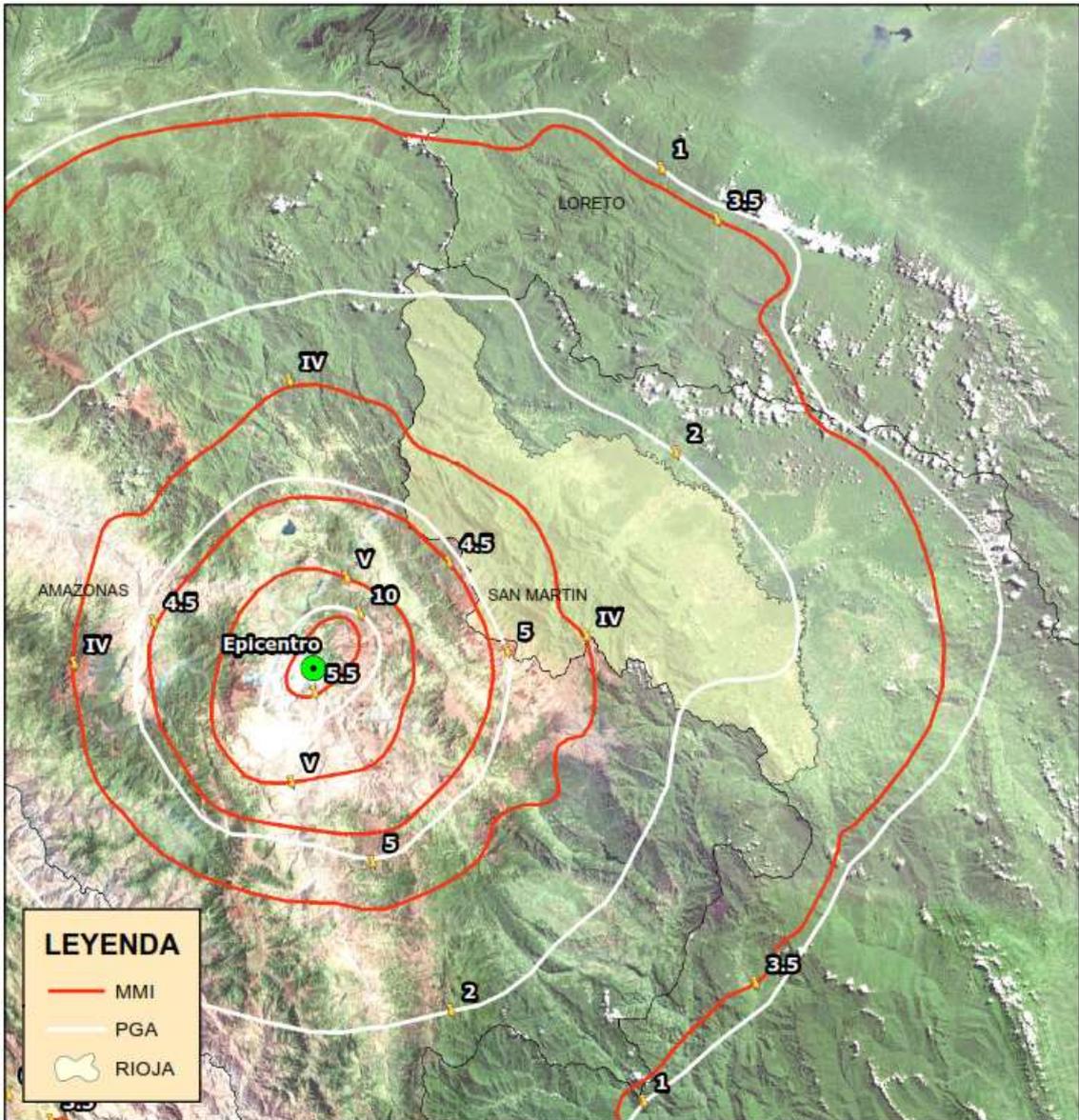


Figura 39. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 19/05/1979 a las 20:43, magnitud 5.7 Mw a 33km de profundidad, epicentro a 5 Km al SE del Poblado de Churuja. Donde las intensidades generadas son de V MMI cerca al epicentro y de IV MMI en el extremo Oeste de Rioja donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

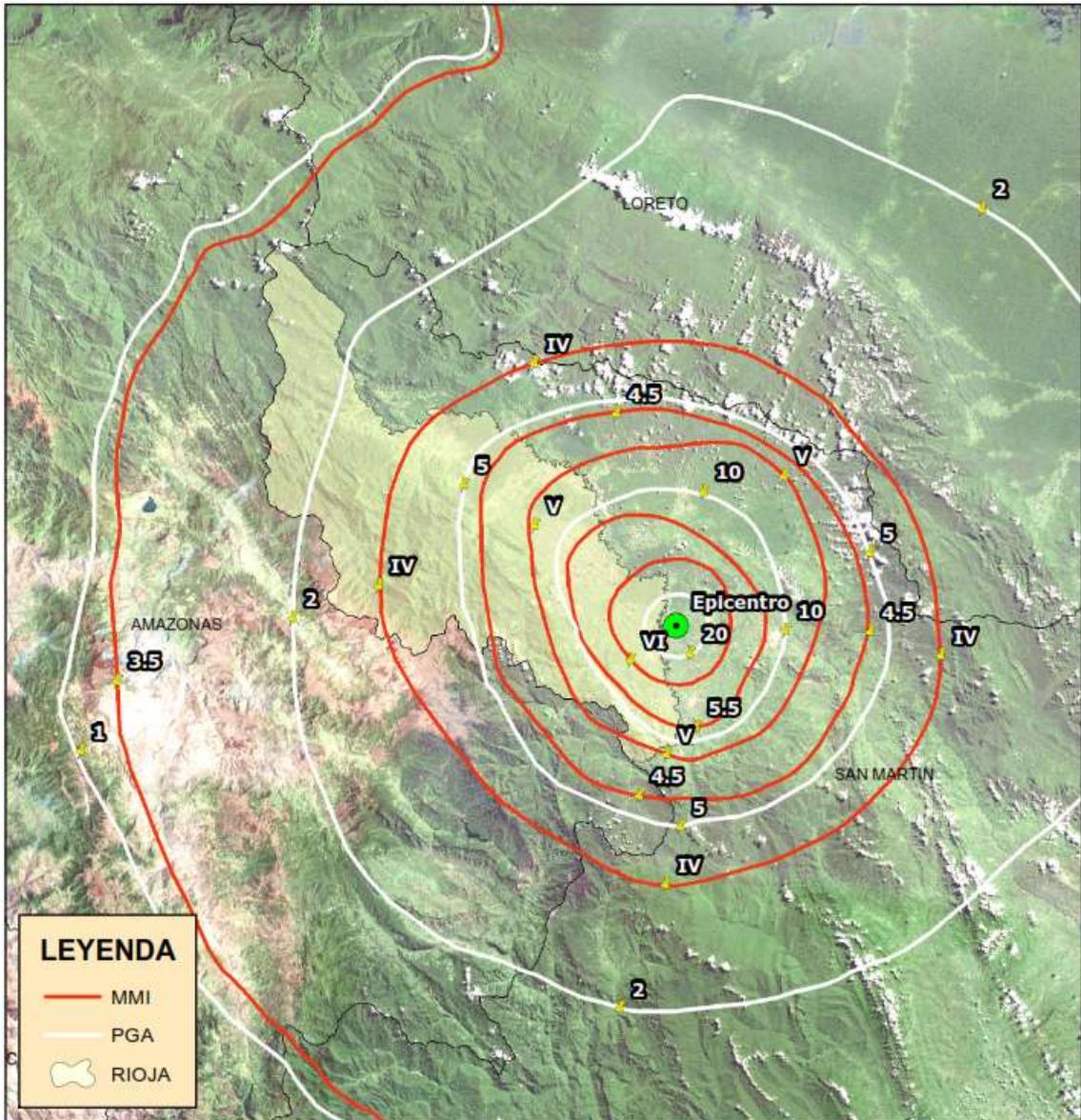


Figura 40. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 30/05/1990 a las 11:49, magnitud 5.7 Mw a 21.5 km de profundidad, epicentro a 6 Km al NE de la ciudad de Rioja generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al Noroeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

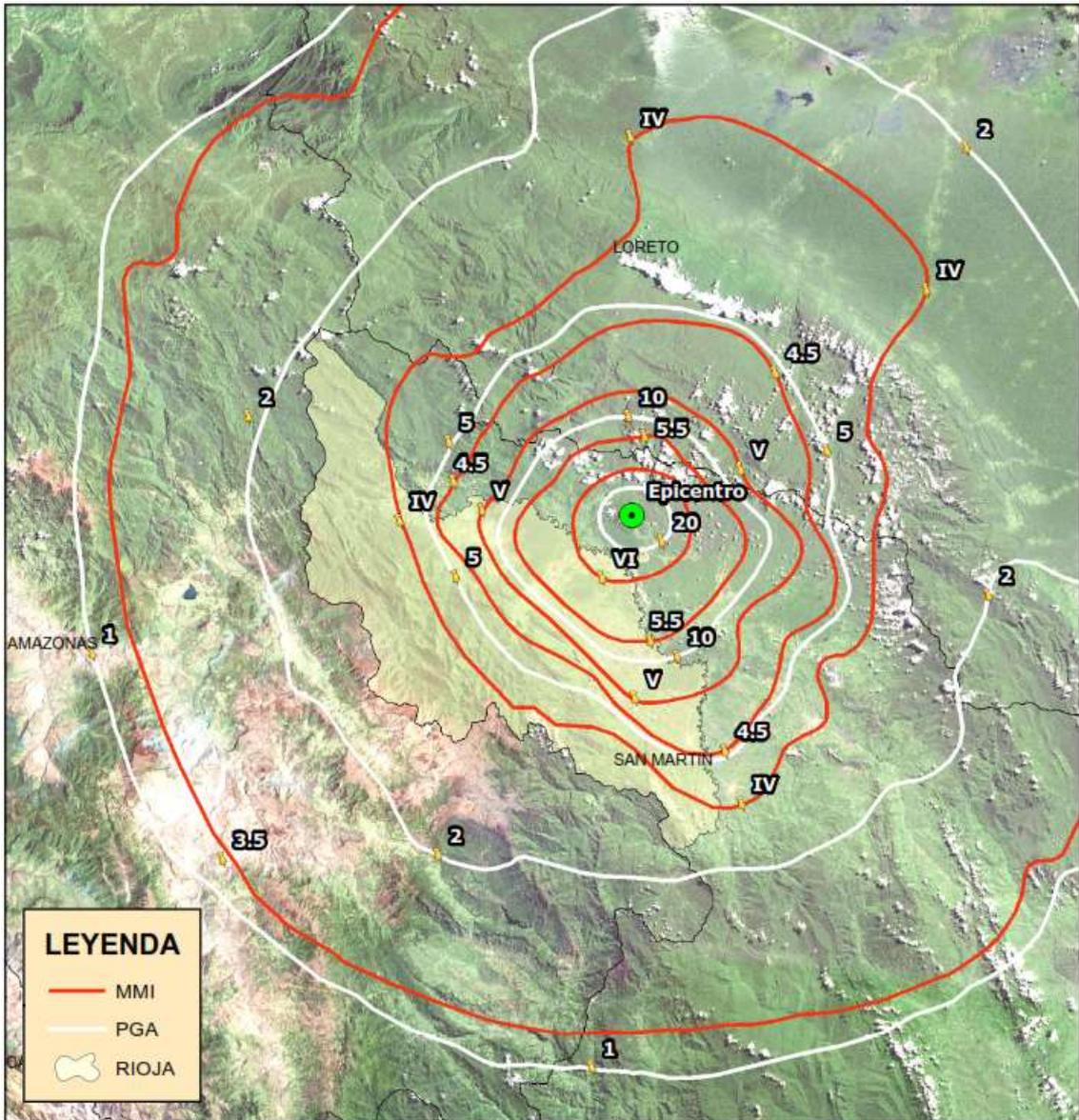


Figura 41. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 20/06/1968 a las 19:26, magnitud 5.7 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 31 Km al N de la ciudad de Segunda Jerusalén generando intensidades de VI MMI al Este de Rioja, que pueden llegar a generar daños en estructuras y edificaciones mal diseñadas, atenuándose hasta IV MMI al Noroeste donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

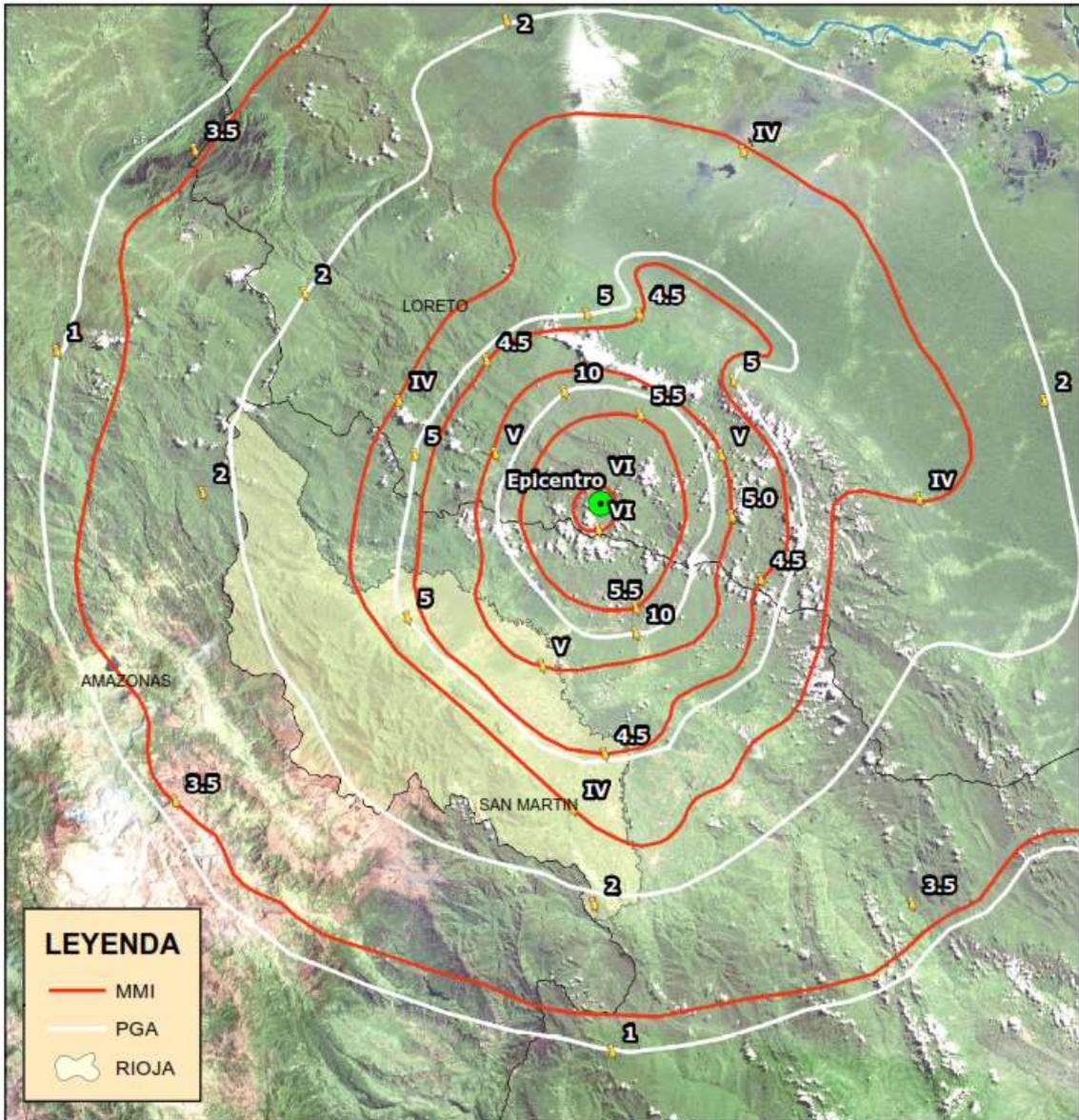


Figura 42. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 15/08/1975 a las 19:53, magnitud 5.7 Mw a 123 km de profundidad, epicentro a 47 Km al SW de la ciudad de Lagunas generando intensidades de V MMI al Este de Rioja, que puede ser sentido por todas las personas, atenuándose hasta IV MMI en la parte central donde el movimiento es sentido por las personas en el interior de edificaciones.

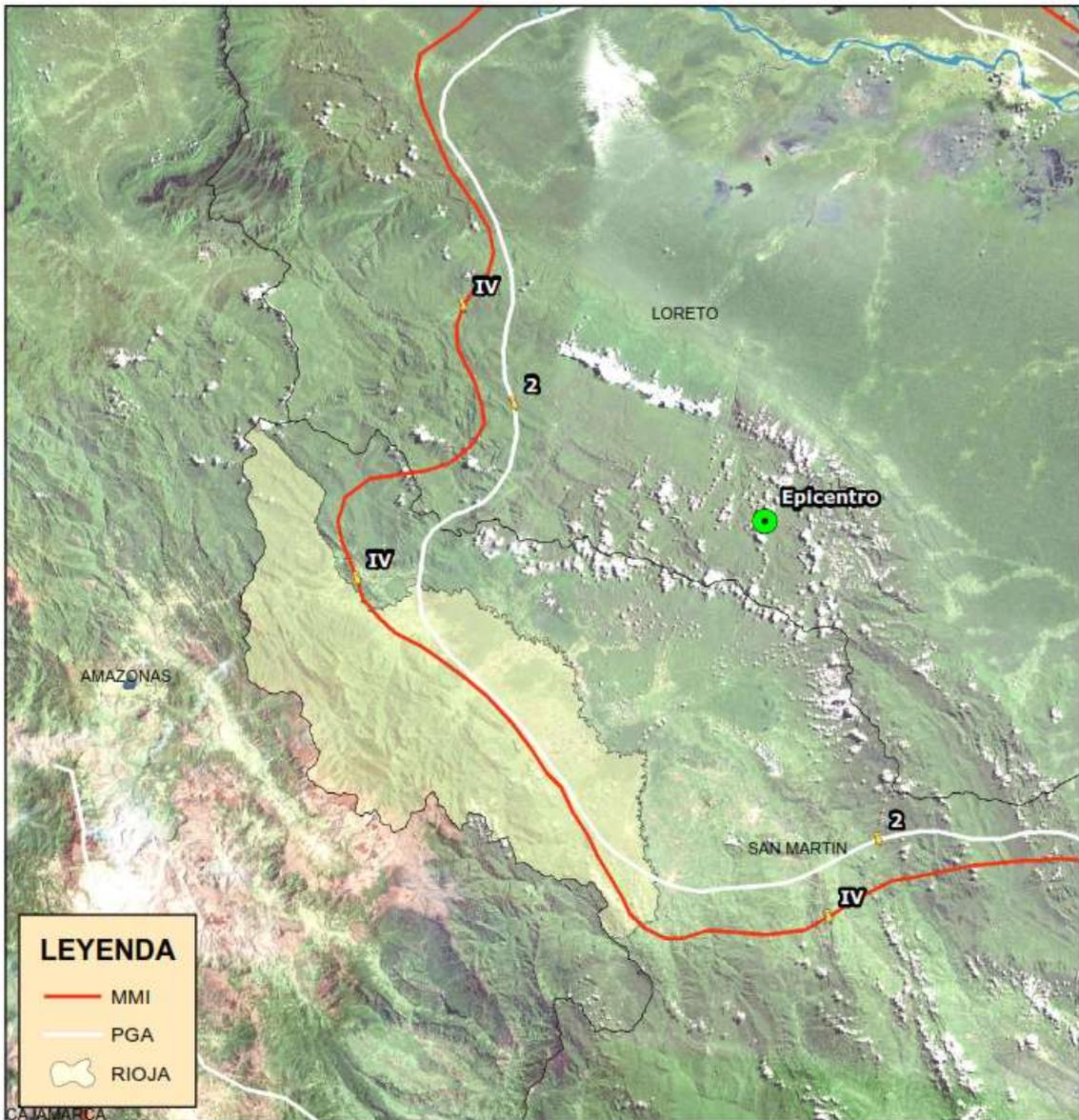


Figura 43. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 10/09/2016 a las 05:08, magnitud 6.1 Mw a 121 km de profundidad, epicentro a 51 Km al N de la ciudad de Moyobamba, generando intensidades de IV MMI, interpretado como un movimiento moderado que puede ser sentido por las personas que están en el interior de las edificaciones.

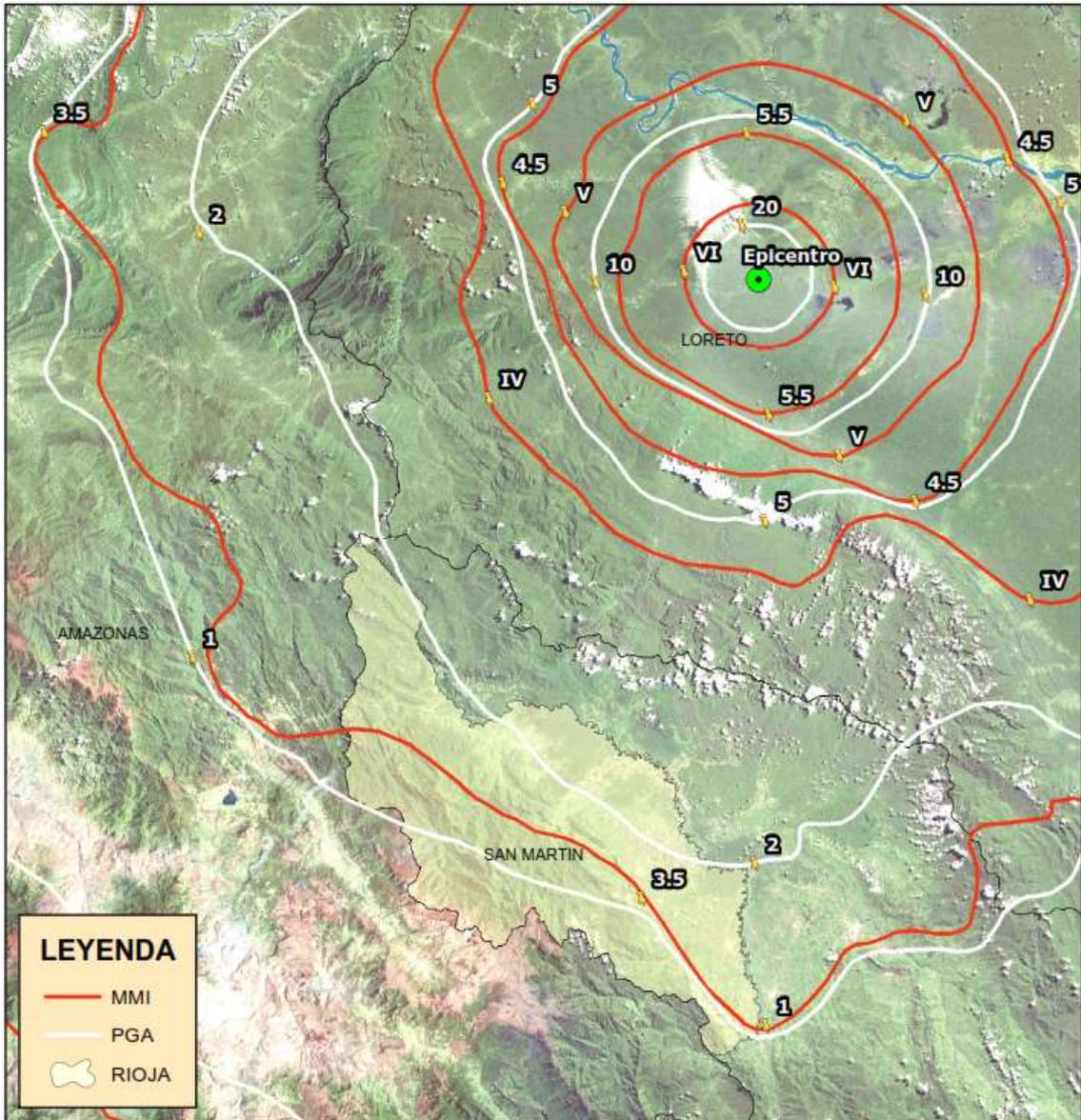


Figura 44. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 16/04/1953 a las 19:02, magnitud 6.1 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 52 Km al SW de la ciudad de Barranca generando intensidades de VI MMI en el epicentro pero que se atenúan hasta valores de 3.5 al Oeste de Rioja, interpretado como sacudidas ligeras que pueden ser sentidas en los niveles superiores de las edificaciones.

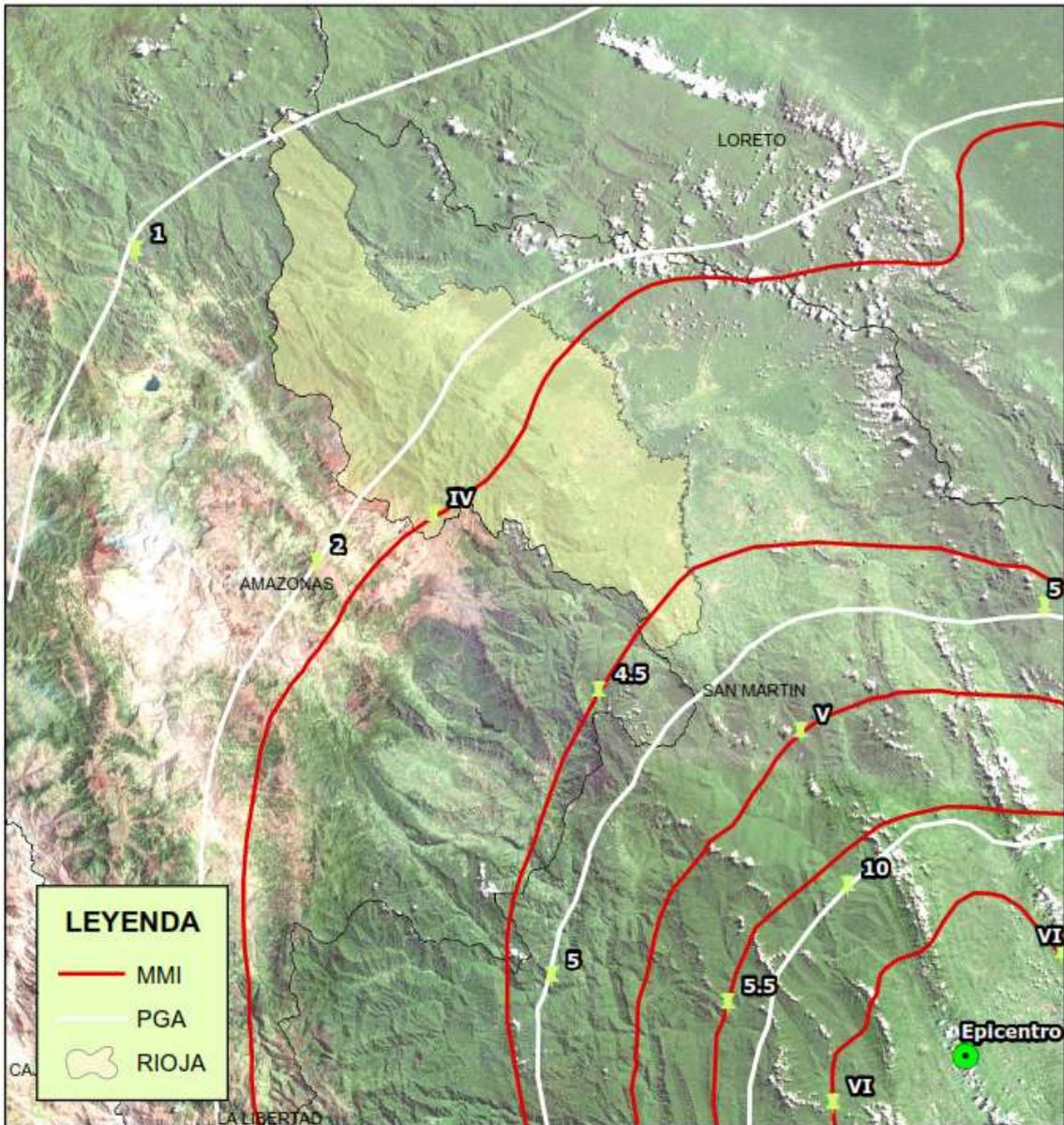


Figura 45. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 20/03/1972 a las 02:33, magnitud 6.4Mw a 55 km de profundidad, epicentro a 10 Km al NE den la ciudad de Saposoa generando intensidades de VI MMI en el epicentro hasta IV MMI en la parte central de Rioja donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones.

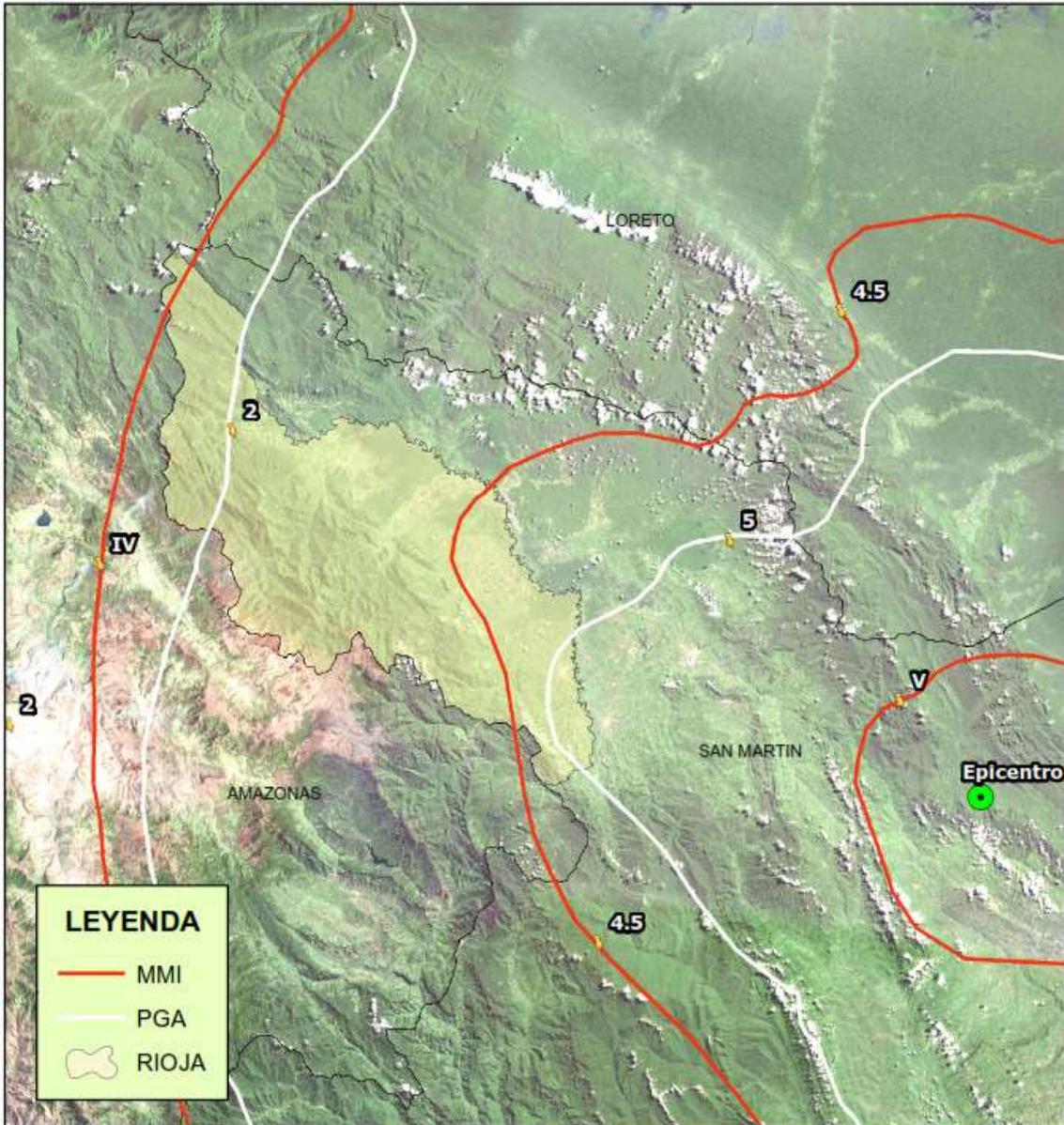


Figura 46. Curvas de Isovalores estimados para el sismo registrado el 12/04/1963 a las 21:20, magnitud 6.5 Mw a 119.8 km de profundidad, epicentro a 17 Km al NE de la ciudad de Tabalosos, generando intensidades de V MMI en el epicentro hasta IV MMI en la parte norte de Rioja donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones.

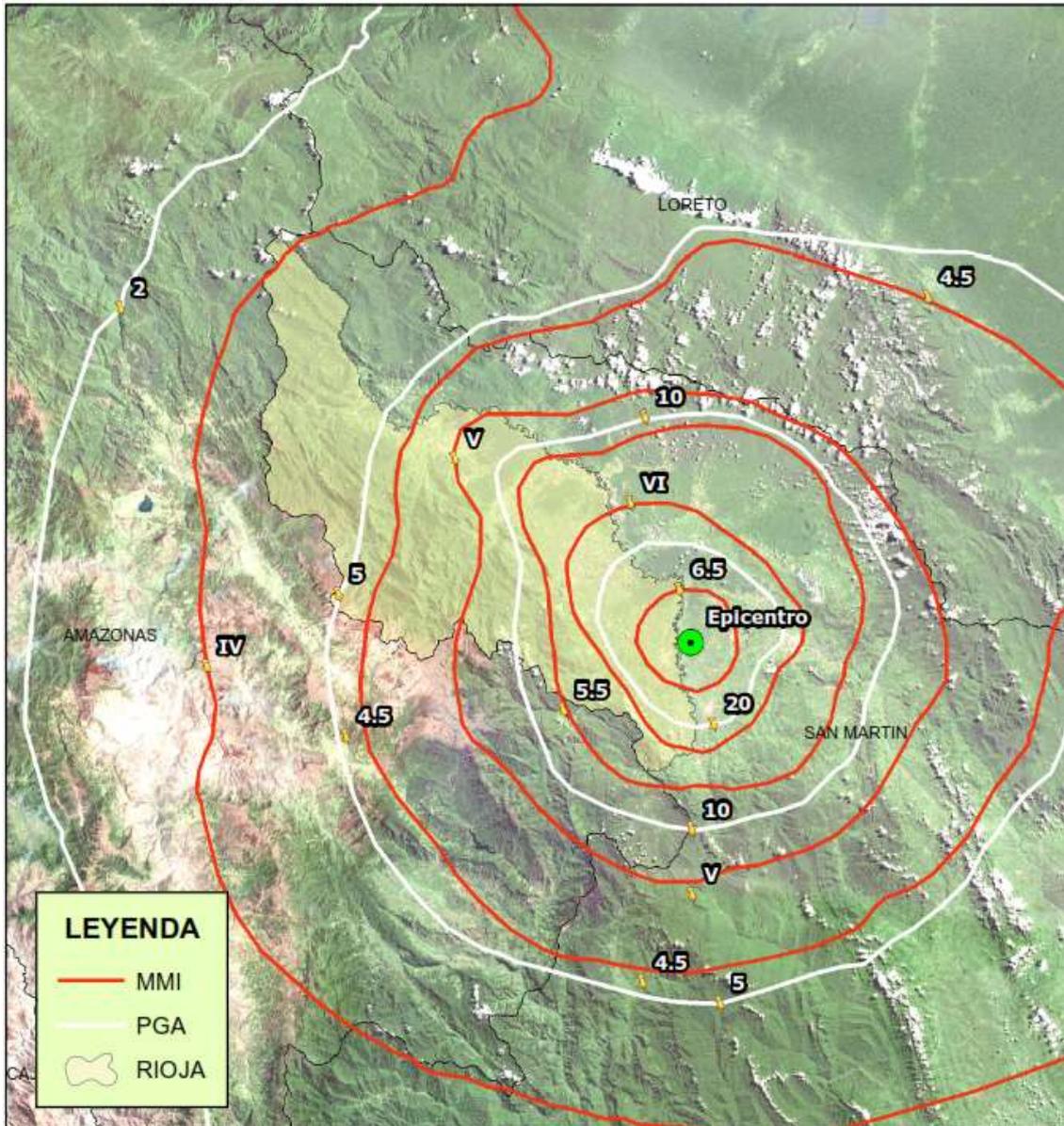


Figura 47. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 04/04/1991 a las 10:23, magnitud 6.5 Mw a 20.7 km de profundidad, epicentro a 4Km al NE de la ciudad de Rioja, generando intensidades de 6.5 en el epicentro, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta IV MMI donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones.

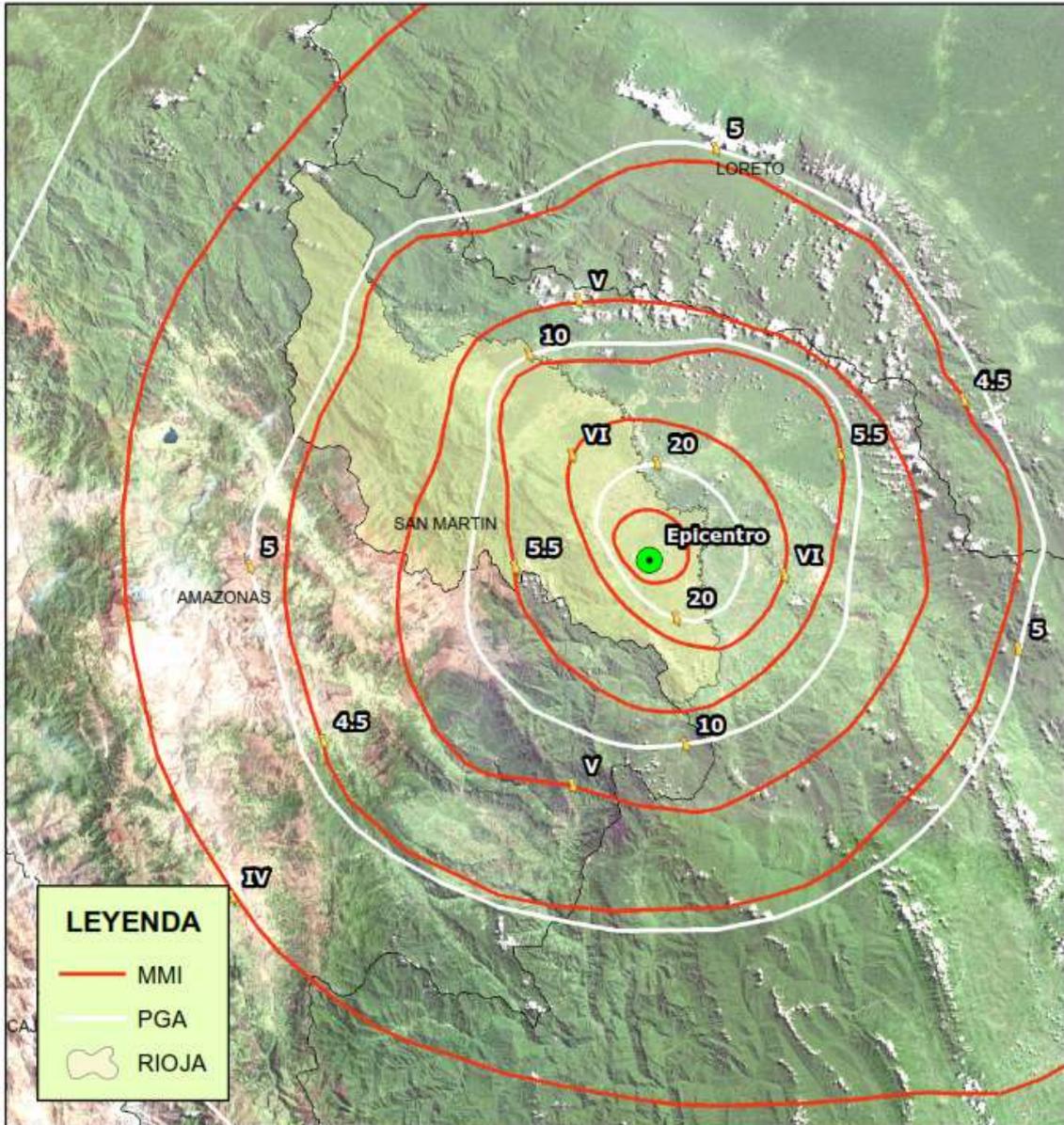


Figura 48. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 29/05/1990 a las 21:34, magnitud 6.6 Mw a 24 km de profundidad, epicentro a 6Km al SE de la ciudad de Segunda Jerusalén, generando intensidades de VI MMI en el epicentro siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas.

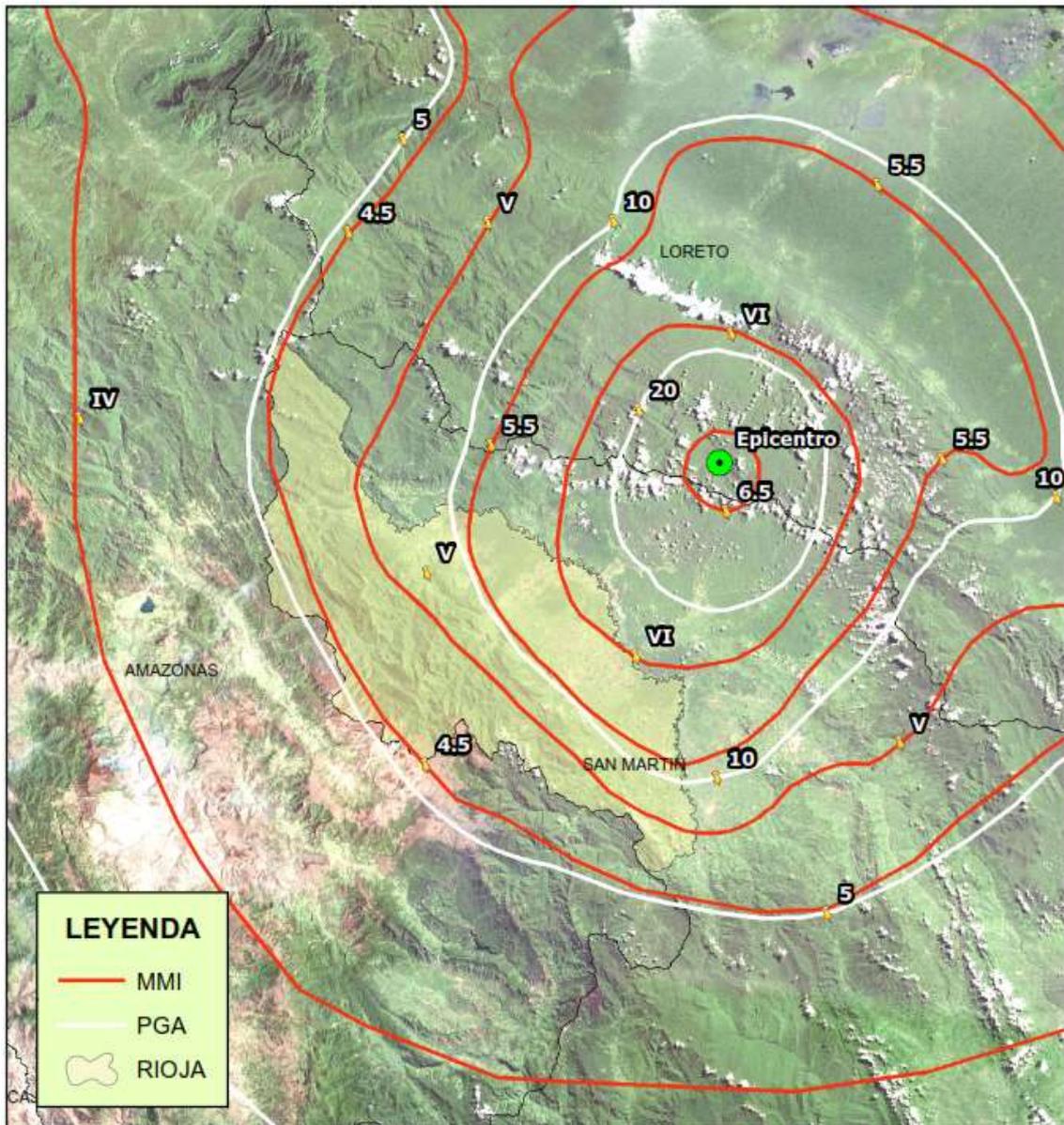


Figura 49. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 19/06/1968 a las 03:13, magnitud 6.8 Mw a 15 km de profundidad, epicentro a 46 Km al NE de Segunda Jerusalén, generando intensidades de VI siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes, atenuándose a lo largo de la provincia de Rioja hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas.

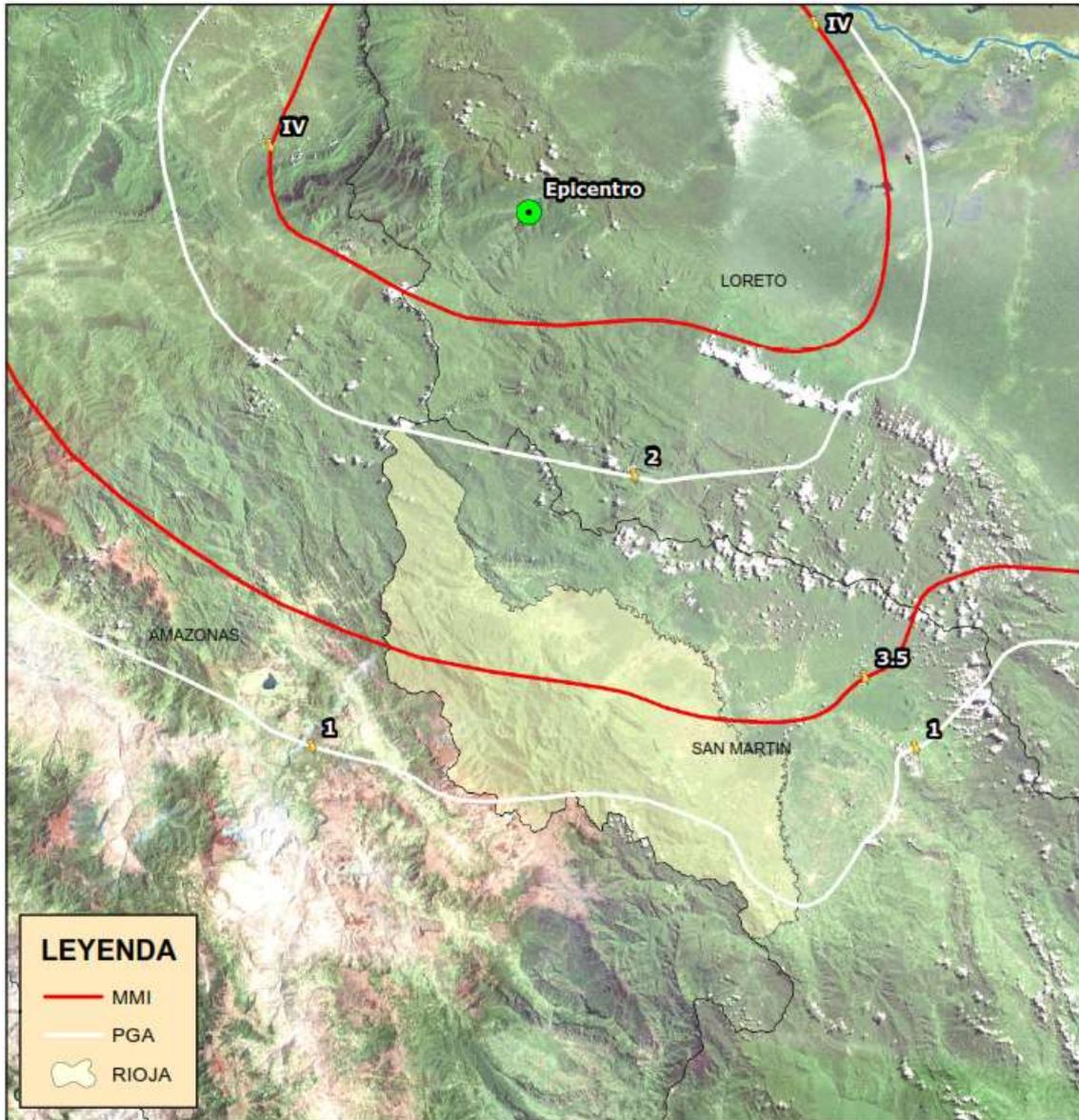


Figura 50. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 18/05/2010 a las 23:15, magnitud 6 Mw a 132 km de profundidad, epicentro a 83 Km al NE de Yamborasbamba, generando intensidades de IV, sentido en la provincia de Rioja con intensidad de III MMI, descrito como un movimiento ligero que puede ser sentido por algunas personas en el interior de las edificaciones.

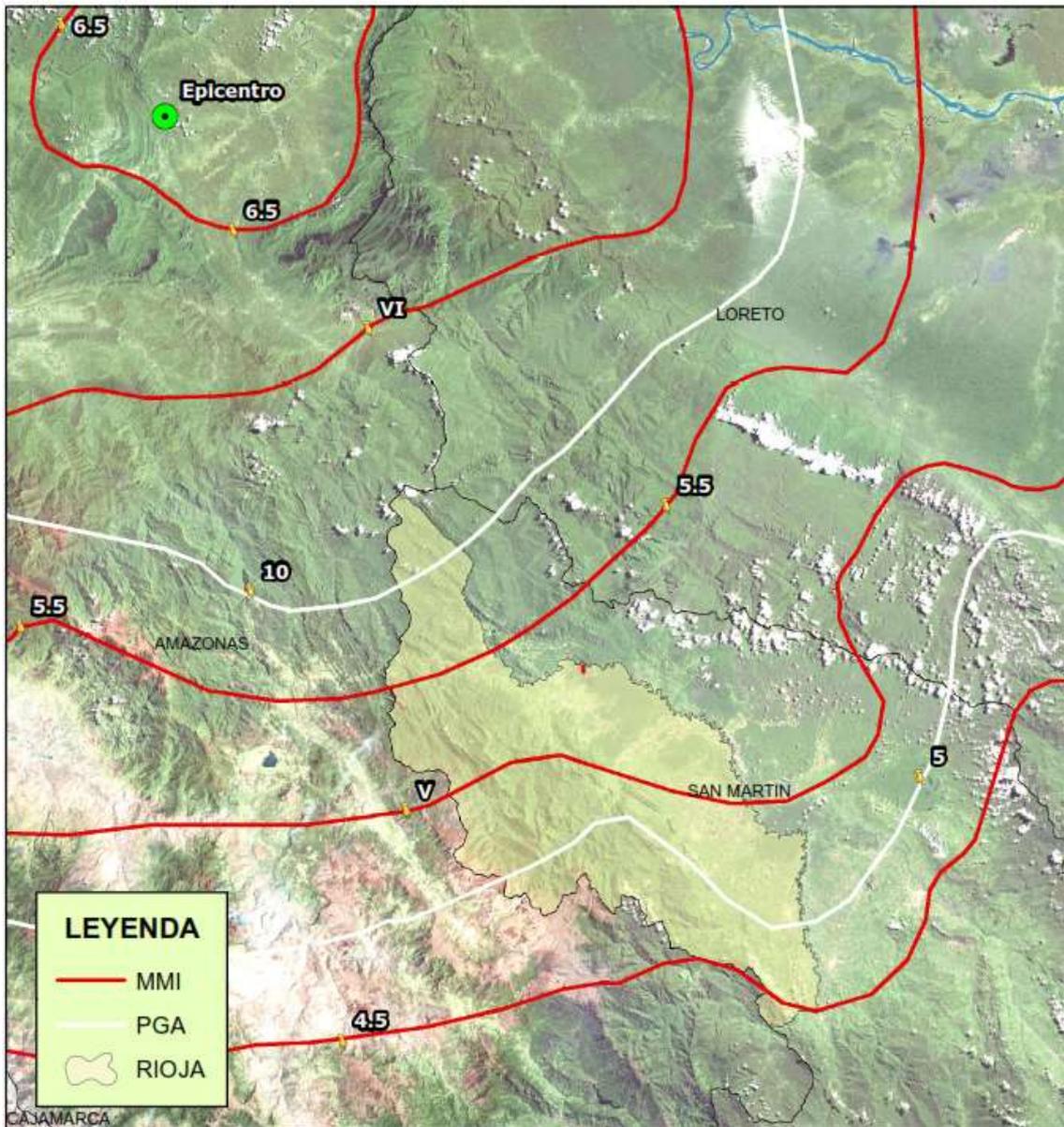


Figura 51. Curva de isovalores estimados para el sismo registrado el 12/04/1983 a las 7:07, magnitud 7 Mw a 104.2 km de profundidad, epicentro a 92 Km al NE de La Peca, generando intensidades de V al norte y IV MMI al sur de la provincia de Rioja, descrito como un movimiento sentido por toda la población.

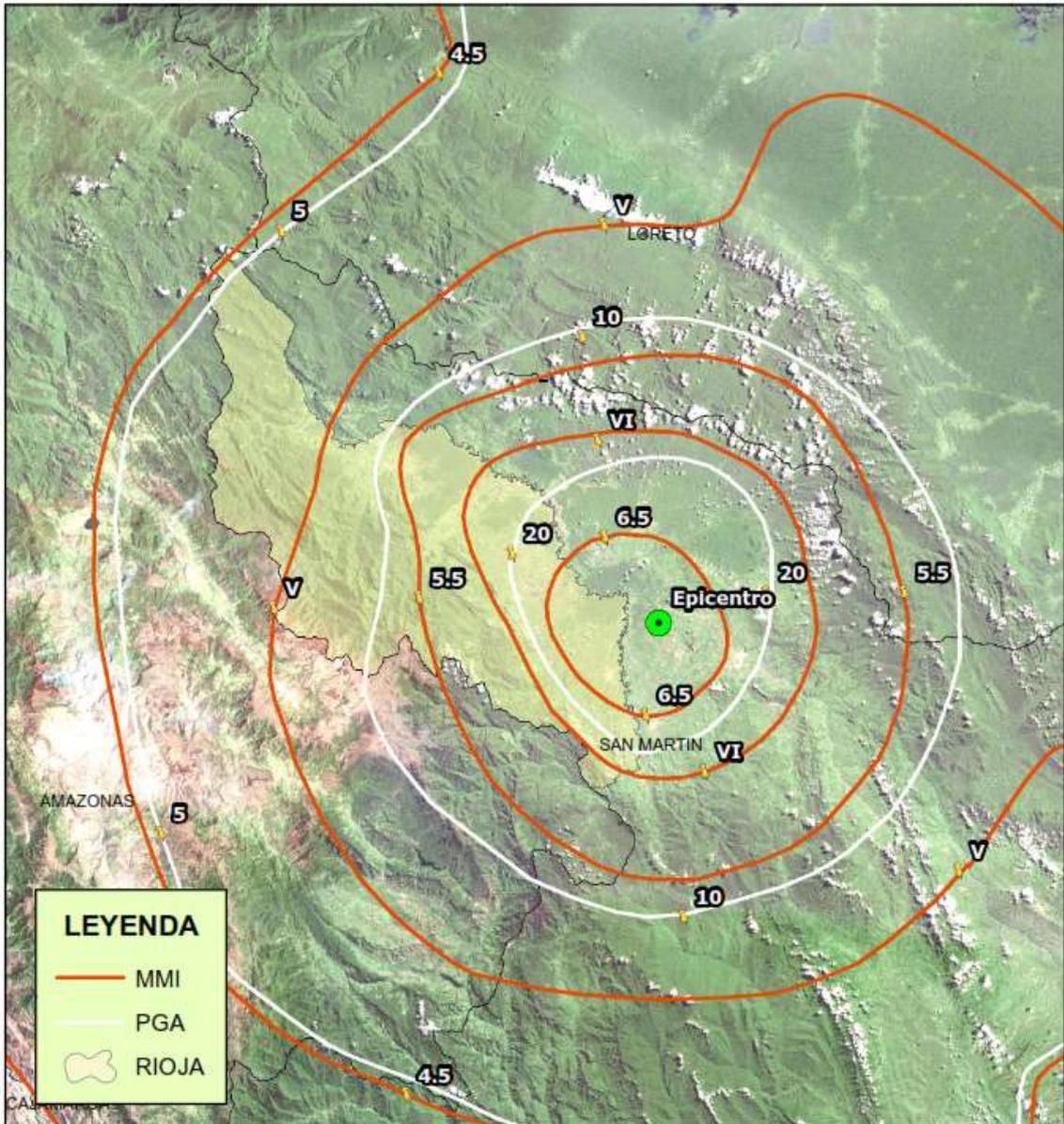


Figura 52. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 04/04/1991 a las 23:19, magnitud 7.1Mw a 19.8 km de profundidad, epicentro a 11 Km al NE de Rioja, generando intensidades de VI al Sur de la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes pero que va atenuándose con dirección al Sur hasta IV MMI donde el movimiento es moderado y sentido por las personas en el interior de edificaciones.

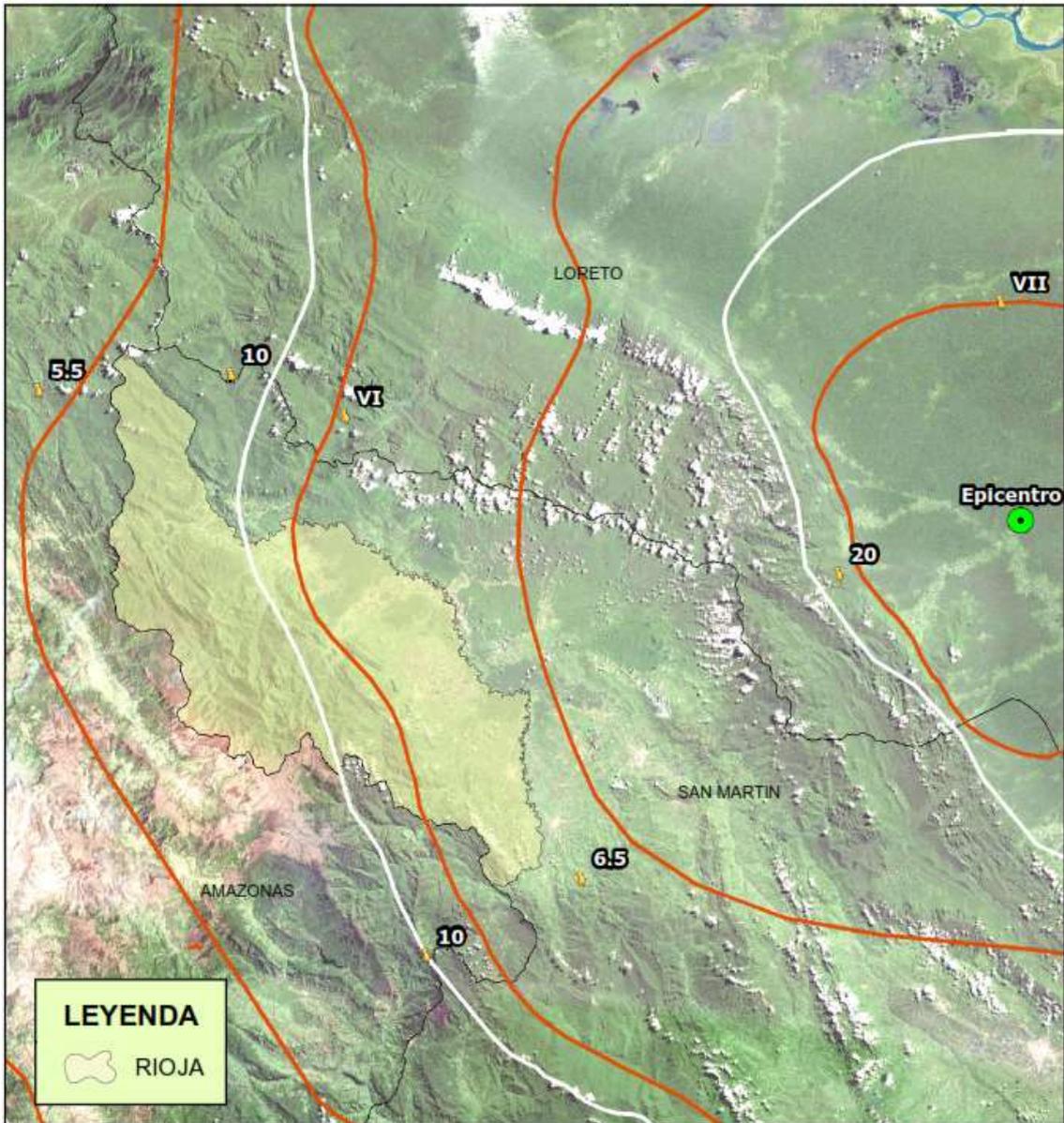


Figura 53. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 25/09/2005 a las 20:55, magnitud 7.5 Mw a 115 km de profundidad, epicentro a 39 Km al NW de Yurimaguas, generando intensidades de VI hasta la parte central de la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes atenuándose hacia el Oeste hasta V MMI donde el movimiento es sentido por todas las personas.

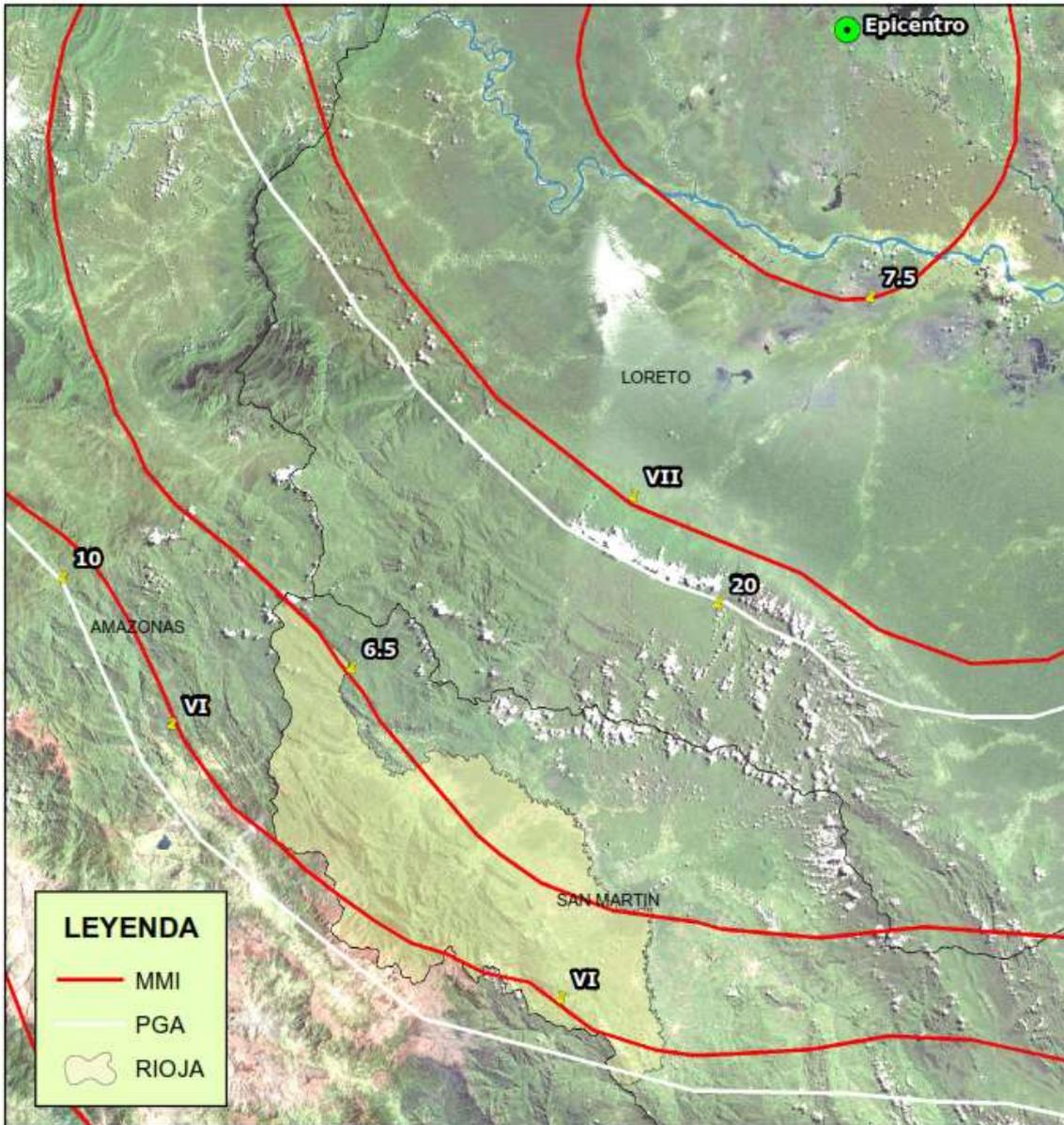


Figura 54. Curvas de isovalores estimados para el sismo registrado el 28/11/2022 a las 05:52, magnitud 7.5 Mw a 126 km de profundidad, epicentro a 43 Km al NW de Barranca, generando intensidad de VI en toda la provincia de Rioja, siendo un movimiento fuerte que puede provocar la caída de paredes.

3.8.2. DETERMINACIÓN DE LA ACELERACIÓN SÍSMICA PROBABILÍSTICA

Para realizar la estimación de las aceleraciones sísmicas de acuerdo con el método probabilístico haciendo uso del programa R-CRISIS se considera los parámetros sismológicos definidos como la Magnitud Máxima, Magnitud Mínima, tasa de recurrencia sísmica y el factor de sismicidad β de cada fuente sismogénica, analizando para un periodo de retorno de 475 años, aun periodo

sísmico $T=0$ y una probabilidad de excedencia del 10% para lo cual se obtiene un valor de aceleración máxima de 341cm/s^2 .

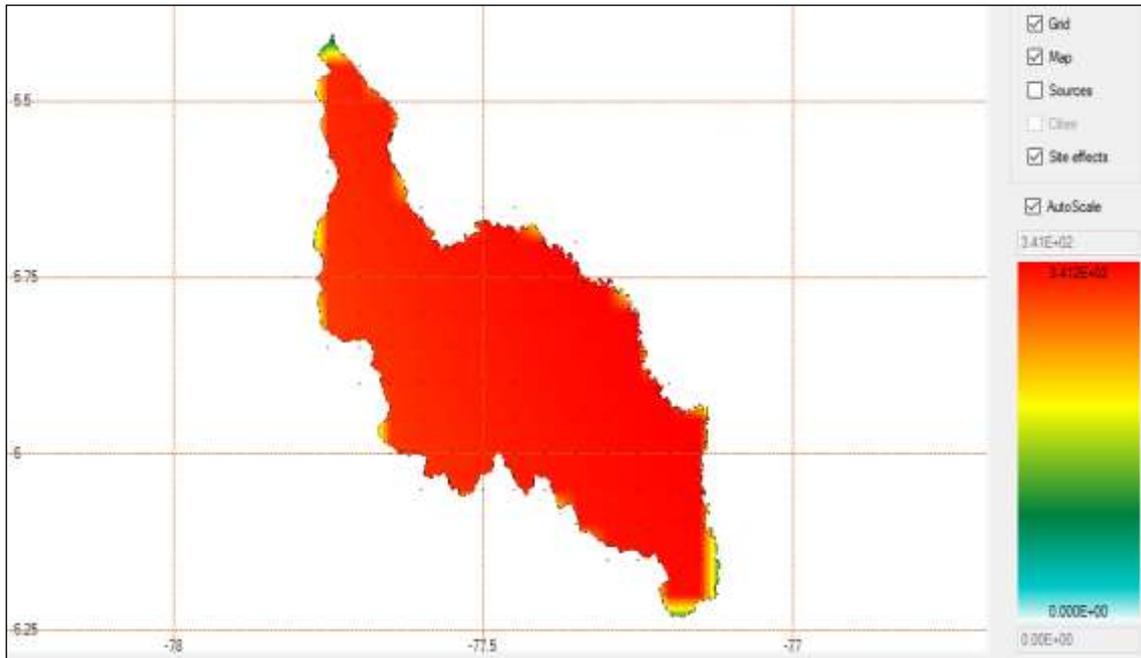


Figura 55. Valores de aceleración espectral obtenidas en el programa R-CRISIS.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados, es decir, analizar la sismicidad de la provincia de Rioja- región San Martín que permita realizar la caracterización de acuerdo a los objetivos de la investigación se modelan 19 eventos sísmicos de magnitudes mayores e iguales a 5.5 Mw, considerados los valores de Intensidad en MMI y aceleraciones del terreno (PGA) que generaron dichos eventos, y se analizan 520 sísmicos de magnitudes mayores de a 2.5 Mw que pueden tener influencia en la provincia de Rioja, para los cuales se analiza su profundidad con la finalidad de clasificarlos en sísmicos superficiales o intermedios, además de cuantificar la ocurrencia de sísmicos en intervalos unitarios hasta 8 Mw y finalmente relacionar su profundidad con la magnitud.

4.1 ANÁLISIS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD

Los eventos sísmicos analizados de magnitudes mayores e iguales a 5.5Mw hasta 7.5Mw, de los cuales existen dominios resaltantes en los intervalos 14-54Km y 104-144Km de profundidad, siendo mayor el primero, además el mayor registro de profundidad focal es de 294 km.

De acuerdo a la clasificación de los sísmicos en función a la profundidad de sus focos, existe una ocurrencia mayoritaria de sísmicos corticales (0-60km) y en menor cantidad los sísmicos intermedios (61-300km).

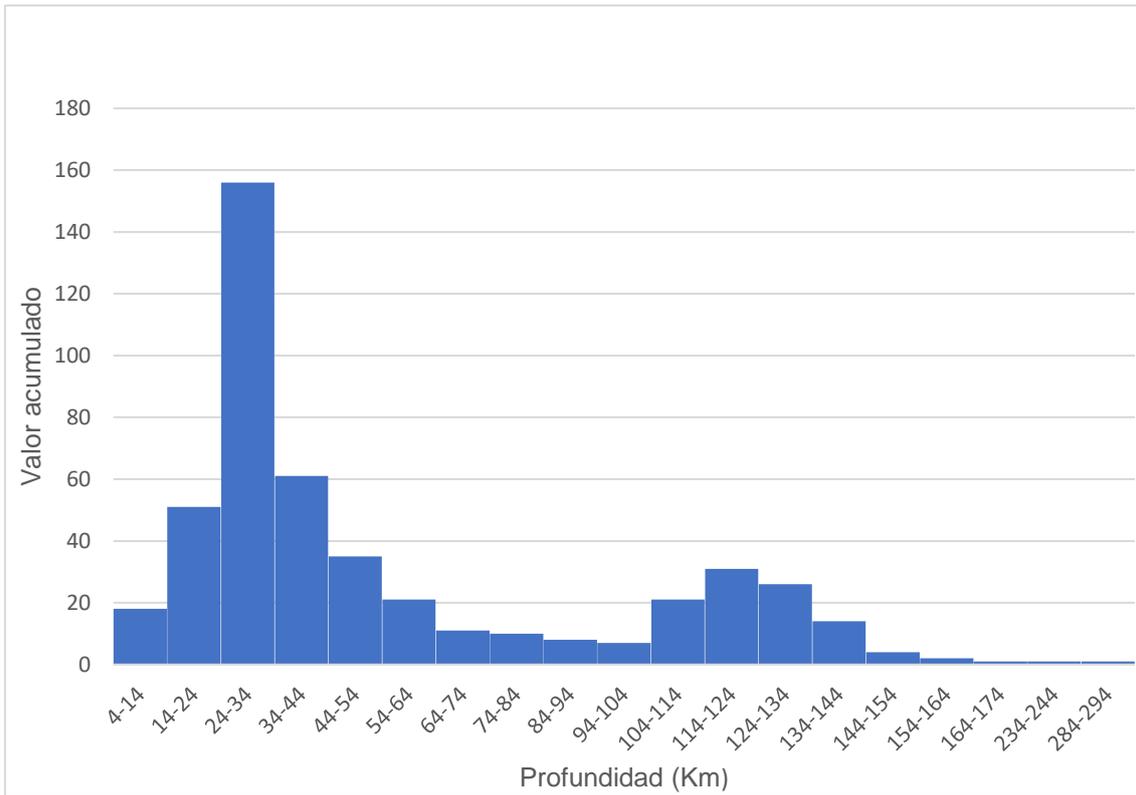


Gráfico 1. Histograma de frecuencia de sismos en función de la profundidad de los focos sísmicos.

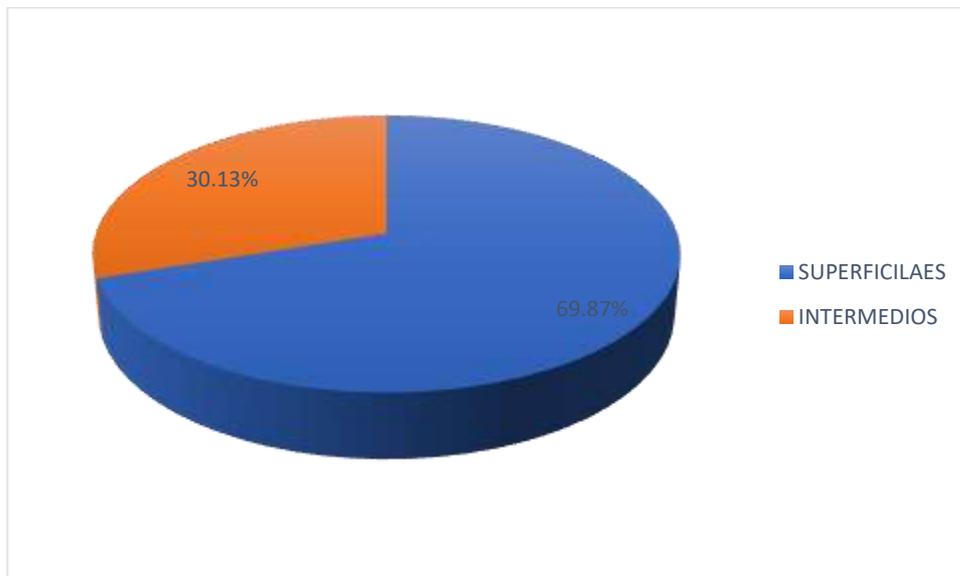


Gráfico 2. Análisis porcentual de los eventos sísmicos en relación a su profundidad de ocurrencia.

4.2 ANÁLISIS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO A LA MAGNITUD

Tomando como punto de análisis la magnitud de los eventos sísmicos que se registran en la provincia de Rioja, de acuerdo con el gráfico 3, en donde se evidencia la mayor ocurrencia de eventos sísmicos en el intervalo de 4-5Mw, y en menor cantidad los sismos de 5-6Mw, para un intervalo de tiempo desde 1960-2022.

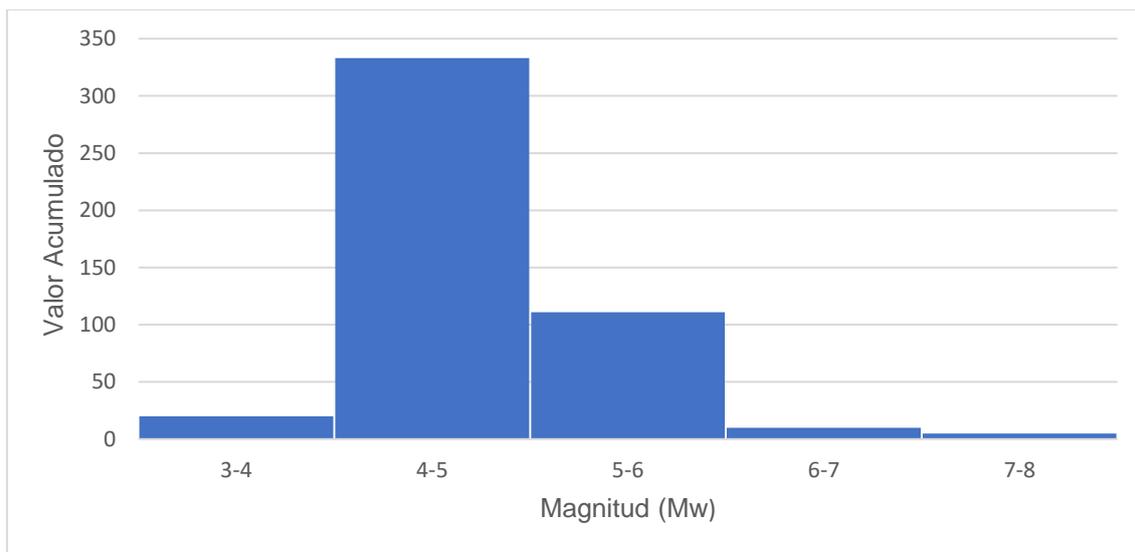


Gráfico 3. Histograma de frecuencia de sismos en función de magnitud.

4.3 ANÁLISIS SÍSMICO DE PROFUNDIDAD- MAGNITUD

El análisis sísmico de profundidad- Magnitud para los eventos sísmicos ocurridos entre 1960 y 2022 arroja que la mayoría de los sismos superficiales corresponden a sismos entre 4 y 5.7 Mw y como magnitud máxima a 7.2 MW, en tanto que, para los sismos intermedios se muestra recurrencia en los intervalos de 4-5 Mw señalando que en esta clasificación encontramos la máxima magnitud registrada para el área de estudio, correspondiente a 7.5 Mw , cabe señalar que el sismo ocurrido en noviembre del 2020 corresponde a esta magnitud.

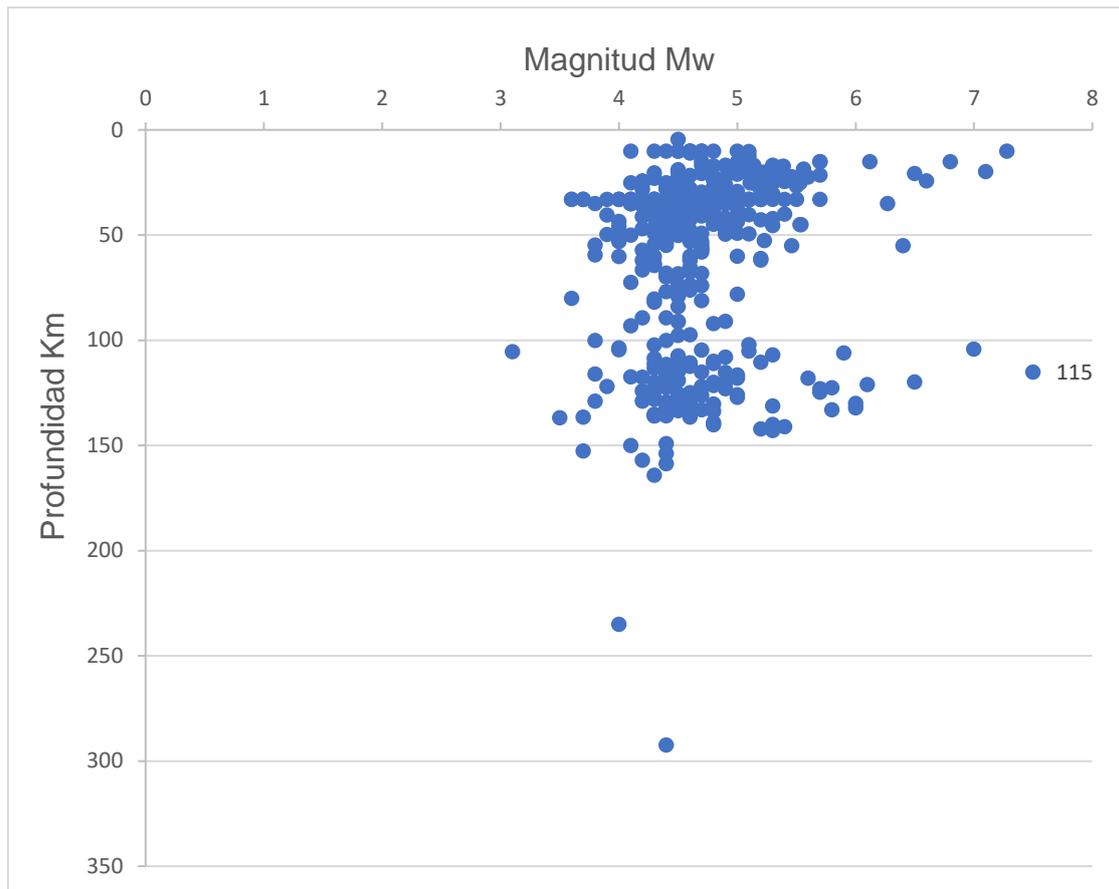


Gráfico 4. Relación magnitud – profundidad de los eventos sísmicos.

4.4 ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD DE LOS EVENTOS SÍSMICOS RELACIONADOS CON LA DISTANCIA A LA FOSA

Con la finalidad de determinar el comportamiento de las placas de Nazca y sudamericana en el proceso de subducción, dado que, dichas placas son las responsables de la sismicidad en el Perú, se puede determinar que de acuerdo al gráfico 4, en relación a la sección A-B, la subducción se da con un ángulo de 20 a 25° hasta una profundidad en promedio de 150 km, profundidad a la cual se torna en una subducción sub horizontal hasta los 600 km de distancia medidos desde la fosa. Cabe indicar que entre el rango de distancias de 200 y 400 km desde la fosa no se tiene muchos registros, sin embargo, entre los 400 y 600 Km existe la evidencia de la sismicidad Intraplaca.

Este comportamiento es semejante con lo descrito por autores como Vergaray & Aguilar. (2018) quienes determinan un ángulo de subducción en el rango de 25° a

35° entre los paralelos 1.5°N y 2.5°S, el cual subduce continuamente hasta alrededor de 200 km.



Figura 56. Ubicación de la sección A-B en el Norte del Perú, tomado para analizar el proceso de subducción de acuerdo a la sismicidad registrada.

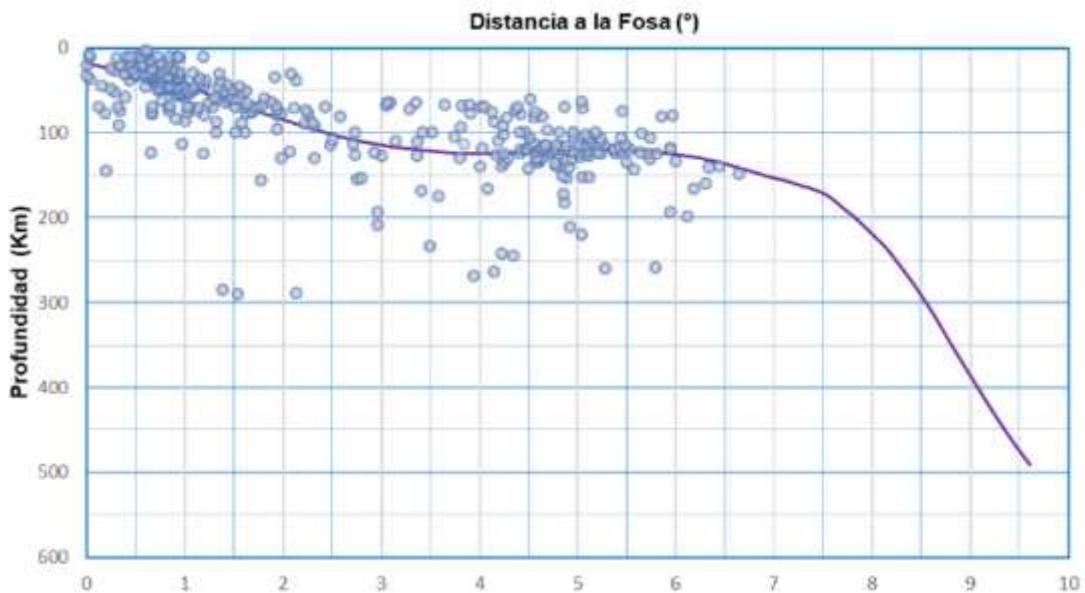


Gráfico 5. Ocurrencia sísmica de acuerdo a la sección A-B, donde determina el comportamiento de las placas (Nazca-Sudamericana) en el proceso de subducción.

4.5 ANÁLISIS DE LAS INTENSIDADES MODELADAS DE ACUERDO A LAS MAGNITUDES REGISTRADAS

De acuerdo a la magnitud de los eventos modelados, se ha obtenido valores de intensidad en la escala modificada de Mercalli (MMI), pudiendo notar que algunos eventos sísmicos pueden generar un intervalo de valores de intensidad mientras que otros solo muestran una línea de intensidad (ver figuras 36-53), para ello se ha tomado los valores máximos y mínimos a los que estaría propensa la provincia de Rioja, siendo la máxima intensidad determinada de VI MMI.

Tabla 11. Valores de Intensidad determinada de acuerdo a las Magnitudes registradas.

MAGNITUD(Mw)	FOCO	INTENSIDAD (MMI) PARA RIOJA		
		MÍNIMA	MÁXIMA	DESCRIPCIÓN
5.5	3Km al E de Rioja	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
5.5	20Km NW de S. Jerusalén	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
5.5	71Km N de S. Jerusalén	-	IV	Sentido en el interior de los edificios como el choque de un camión.
5.7	5Km SE Churuja	-	IV	Sentido por casi todos, se puede ver el movimiento de árboles y oscilación de postes.
5.7	6Km NE de Rioja	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
5.7	31Km N de S. Jerusalén	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
5.7	47Km SW de Lagunas	IV	V	Sentido por casi todos, se puede ver el movimiento de árboles y oscilación de postes.
6.1	51Km N de Moyobamba	IV	IV	Sentido en el interior de los edificios como el choque de un camión.
6.1	52Km SW de Barranca	-	III	Sacudidas ligeras sentidas por muchos, aunque a veces no reconocido como sismo.
6.4	10Km NE de Saposoa	-	IV	Sentido en el interior de los edificios como el choque de un camión.
6.5	17Km NE de Tabalosos	-	IV	Sentido en el interior de los edificios como el choque de un camión.
6.5	4Km NE de Rioja	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.

6.6	6Km SE de SJ	V	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
6.8	46Km NE de S. Jerusalén	IV	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
7	92Km NE de LA Peca	-	V	Sentido por casi todos, se puede ver el movimiento de árboles y oscilación de postes.
7.1	11Km NE de Rioja	V	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
7.5	39Km NW de Yurimaguas	-	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.
7.5	43Km NW de Barranca	-	VI	Sentido por todos, puede producir pequeños daños.

4.6 ANÁLISIS DE LAS ACELERACIONES MODELADAS DE ACUERDO A LAS MAGNITUDES REGISTRADAS

De acuerdo a la magnitud de los eventos modelados, se ha obtenido valores de aceleración pico del terreno (PGA), pudiendo notar que algunos eventos sísmicos pueden generar un intervalo de valores de aceleración mientras que otros solo muestran una línea isoaceleración (ver figuras 36-53), para ello se ha tomado los valores máximos y mínimos a los que estaría propensa la provincia de Rioja, siendo el máximo valor determinado de 20.

Tabla 12. Aceleraciones Pico determinadas en relación a las magnitudes registradas.

MAGNITUD(Mw)	FOCO	PGA (%) PARA RIOJA	
		MÍNIMA	MÁXIMA
5.5	3Km al E de Rioja	1	10
5.5	20Km NW de S. Jerusalén	2	10
5.5	71Km N de S. Jerusalén	1	2
5.7	5Km SE Churujia	2	5
5.7	6Km NE de Rioja	2	20
5.7	31Km N de S. Jerusalén	5	10
5.7	47Km SW de Lagunas	2	5
6	83Km NE de Yambrasbamba	-	1
6.1	51Km N de Moyobamba	-	2
6.1	52Km SW de Barranca	1	2
6.4	10Km NE de Saposoa	-	2
6.5	17Km NE de Tabalosos	2	5
6.5	4Km NE de Rioja	5	20
6.6	6Km SE de S. Jerusalén	5	20
6.8	46Km NE de S. Jerusalén	5	10
7	92Km NE de LA Peca	5	10
7.1	11Km NE de Rioja	5	20

7.5	39Km NW de Yurimaguas	-	10
7.5	43Km NW de Barranca.	-	10

4.7 CONTRASTACIÓN DE LA HIPOTESIS

En la investigación se puede comprobar que la hipótesis plateada inicialmente es correcta dado que existe registros sísmicos para la provincia de Rioja- región San Martín con hipocentro menor a 60 Km correspondiendo a la sismicidad superficial y los sismos con profundidad máxima de 294 km, responden a la sismicidad intermedia, además la máxima magnitud cercana registra es de 7.5 Mw, cabe señalar que de acuerdo al mapa de peligro sísmico probabilístico o zonificación sísmica nacional la provincia de Rioja se ubica en la zona 3 y corresponde un valor de aceleración 0.35 g, refrendado en el mapa de espectro sísmico de la presente investigación con un valor de 341 cm/s².

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En la presente investigación se ha compilado datos desde 1960 hasta 2022 del historial sísmico y a los catálogos del IGP Y USGS, datos que luego de ser analizados contribuyeron en determinar que la provincia de Rioja- región San Martín se caracteriza por presentar gran sismicidad superficial, profundidad menor a 60km, y en ellos recurrencia de magnitudes de 4 a 5.7 Mw, además de sismicidad intermedia con magnitud máxima de 7.5 Mw y profundidad hasta 292Km.

Geológicamente en la provincia de Rioja afloran rocas sedimentarias del periodo Pérmico representadas por las areniscas del Grupo Mitu; rocas calcáreas del Grupo Pucará y las rocas clásticas de la Formación Sarayaquillo, del Triásico-Jurásico; posterior sedimentación Cretácica de areniscas del Grupo Oriente, calizas de la Formación Chonta y la intercalación de areniscas de la Formación Cachiyacu, hasta las areniscas de la Formación Ipururo del neógeno. Además de presencia del anticlinal naranjos y la falla inversa de Shitari que, al ser determinada como falla activa, respondería a la sismicidad cortical.

Las fuentes sismogénicas identificadas son F-13 y F-27 que determinan la sismicidad cortical e intraplaca intermedia para la provincia de Rioja que debido a sus parámetros de sismicidad arrojan un valor de aceleración probabilista de 341cm/s².

Los valores de aceleración determinados para la provincia de Rioja – región San Martín son: PGA mínimo de 1%, PGA máximo de 20% y un valor probabilista estimado de 341cm/s².

5.2 RECOMENDACIONES

A la Municipalidad Provincial de Rioja y al gobierno Regional de San Martín, realizar estudios de sismicidad en toda la región y de manera puntual en la provincia de Rioja debido a la ubicación de las fallas Shitari que recorre longitudinalmente las provincias de Rioja y Moyobamba.

Al Instituto Geofísico del Perú, implementar con instrumentación, llámese sismógrafos y acelerógrafos para monitoreo en tiempo real, al mismo tiempo poner en actividad las estaciones sismográficas cercanas que se encuentran inoperativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar, Z; Roncal, M; Piedra, R. 2017. Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Peruvian Territory . 16th World conference of Earthquake.Santiago de Chile,Chile.10 p.
- Alfonso, L; Hernández, P ; Cabrera, A. 2013. Caracterización Sismológica de la Provincia de Matanzas. La habana, Cuba. 74p.
- Alonso, J. 2016. Evolución tectónica y estructural de la zona de Falla de El Salvador: Aplicaciones a la Amenaza sísmica. Madrid, España.410p
- Alva y Chang. 2003. Efectos de Sitio en el Alto Mayo Sismos 1990-1991 Simposio Vulnerabilidad Sísmica y Efectos de Sitio. Lima, Perú.
- Barreto, D. 2019. Análisis probabilístico de peligro sísmico para el diseño de una presa de enrocado en Huancavelica. Lima, Perú.
- Cahuari, A. 2008. Calculo de la Magnitud Local (ML) a Partir de Registros de Aceleración Usando la Técnica de deconvolucion y Relación de Magnitudes, Arequipa, Perú.
- Chávez, J. 2006. Leyes de Atenuación para Aceleraciones Espectrales en el Perú. Lima, Perú.
- Chumpitaz, M ; Chacaltana, C; Valdivia, W. 2015. Estratigrafía de las secuencias pre-cretácicas del anticlinal Naranjos zona noroccidental de la cuenca Huallaga. Lima, Perú.
- Chunga, K; Toulkeridis, T; Ochoa, F; Mulas, M; Menendez, E. 2019. Caracterización de Fallas Geológicas Capaces de Generar Terremotos Corticales en el Golfo de Guayaquil-Ecuador. Edit.Andean Geology, 16p.
- Croneis, C.1994. Down to earth: an itroduction to geology. Chicago: University of Chicago press.
- Davila, J. 2011. Diccionario Geológico. Lima, Perú.
- Herráiz, M. 1997. Conceptos Basicos de Sismología para Ingenieros. Lima, Perú.
- Hidalgo, D; schmidt, V; Moya, A. 2020. Recálculo de la Relación entre la Aceleración Pico y Pico para Sismos Registrados en Costa Rica entre

- 1983 y 2019. Revista Geológica de América Central. Costa Rica 102-115p.
- Huaman, F. 2019. Evaluación de la amenaza sísmica y estructuras sismogénicas para la ciudad de Esmeraldas, costa norte de Ecuador. Lima, Perú.
- Hurlbut, J. 1981. Mineralogía Descriptiva. Barcelona, España.
- Kanamori, H. 1977. The energy release in great earthquakes. Instituto Tecnológico de California. California, Estados Unidos.10p.
- Kuroiwa, J. 2002. Reducción de Desastres. Viviendo en Armonía con la Naturaleza. Lima, Perú.
- León, W; Chumpitaz, M; Fabián, C. 2022. Actualización de la cartografía geológica de 120 hojas de la faja subandina y de la costa norte (bloques Santiago, Huallaga,Pachitea/Ucayali y Sechura). INGEMMET. Lima, Perú.
- Lutgens, F; Tarbuck, E. 2005. Ciencias de la Tierra. Madrid, España.Edit. Pearson Editorial S.A.
- Macharé, J; Benavente, C; Audin, L. 2008. Síntesis Descriptiva del Mapa Neotectónico Boletín, Serie C. INGEMMET. Lima, Perú.
- Marshak, S; Van der Pluijm, V. 2004. Earth Structure an Introduccionto to Estructural Geology and Tectonics. New York. Edit. Norton & company, Inc.
- Martínez, E; Arce, I; Diaz, D. 2006. Mapa de Peligros de la Ciudad de Rioja.Proyecto INDECI- Cuidades Sostenibles. San Martín- Perú.
- McDonough, W. 1995. Composition of the Earth. chemical geology. Maryland, Estados Unidos. 32p.
- McGuire, R. 1976. Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis U.S. Geological Survey. Estados Unidos.94p.
- Mercano, A. 2016. Metodología para la zonificación de la amenaza por Movimientos en Masa Desencadenados por la Sismicidad. Revista de Investigación. Caracas, Venezuela. 27p.

- Omori, F. 1894. On aftershocks of earthquakes. Imp.Universidad deTokyo, Tokyo, Japoón.200p.
- Porras, J; Linkimer, L; Araya, M; Rojas, W; Taylor, M; Barquero, R. 2016. Sismicidad en Costa Rica Durante el 2015. Revista Geológica de América.San José, Costa Rica. 193p.
- Prinz, P.1994. Stratigraphy and ammonites of the North Peruvian Pucará Group. Palaeontographica Abteilung A. Lima, Perú. 33-42p.
- Read, H; watson, J. 1973. Introducción a la Geología,Traducido. Barcelona, España. Edit.Alhambra.
- Rivera, H. 2011. Geología General. Lima, Perú. Edit.Megabyte.
- Romero, A; Erazo, M; Silva, A. 2016. Gestión de Riesgos de Desastres de la ciudad de Nueva Cajamarca, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín. Nueva Cajamarca, Perú.
- Roncal, M. 2017. Determinación del Peligro Sismico en el Territorio Nacional y Elaboración de Aplicativo Web. Lima, Perú.
- Salcedo, E. 2016. Caracterización Sismotectónica de la Región del Valle de Cauca y Zonas Aledañas a Partir de Mecanismos Focales de Terremotos. Boletín de Geología, Lima, Perú.107p.
- Sánchez, A. 1995. Geología de los cuadrángulos de Bagua Grande, Jumbilla, Lonya Grande, Chachapoyas, Rioja, Leimebamba y Bolivar. Hojas: 12-g, 12-h, 13-g, 13-h, 13-i, 14-h y 15-h – Boletín A 56. Lima, Perú.
- Tavera, H; Bernal, I; Condori, C; Ordáz, M, Zevallos, A, Ishizawa, O. 2014. Evaluación del Peligro Sísmico en Perú. Lima, Perú.
- Tavera, H; Cuya, A. 2017. Estimación del Riesgo por Exposición a Partir de Mapas de Isosistas en Perú. Lima, Perú.
- Tavera, H.2020. Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú-Informe IGP. Lima, Perú.
- Thompson, G; Turk, J. 1997. Introduccion to Physical Geolgy. Estados Unidos. Edit.Books Cole 2nd Edición.

- Torres, J. 2021. Análisis de la Actividad Sismovolcánica en el Complejo Volcánico Nevado Coropuna y Alrededores Durante el Periodo mayo 2018- abril 2020. Arequipa, Perú.
- Urrutia, J; Perez, L. 2015. Estructura interna y Composición de la Tierra. Mexico.193p
- Veloza, G; Styron, R; Taylor M. 2012. Open-source archive of active faults for northwest South America. Kansas, Estados Unidos.
- Vergaray, L; Aguilar, Z. 2018. Superficies de Subduccion para los Cálculos del Peligro Sísmico para el Perú. Lima, Perú.
- Wiemer, S; Katsumata, K. 1999. Spatial variability of seismicity parameters in aftershocks zones. Journal Geophysical Research. Fiarbanks, Alaska 18p.
- Wiemer, S; Wyss, M. 2000. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Example from Alaska, the Western United States, and Japan. Boletin of the Seismological Society of America. Estados Unidos.

ANEXOS

Registro de sismicidad de magnitud mayor a 5 para la región San Martín.

NºCS	Fecha	Hora UTC	Lat. S	Long. O	Profundid.	Magnitud	
			(deg.)	(deg.)		(km)	mb
45	1926-03-07	20 33 38.0	5	76.5	150		6.5
62	1928-05-14	22 14 46.0	5	78			7.3
69	1928-07-18	19 05 00.0	5.5	79			7
84	1931-07-11	05 56 13.0	8.5	74.5	120		6.3
119	1934-10-29	23 25 23.0	5	78	110		6.3
131	1936-05-06	03 38 55.0	8	75	160		6
155	1938-01-16	21 41 47.0	6	75	100		6
213	1942-01-08	15 12 31.0	6	78.5	110		6
240	1942-11-06	13 31 10.0	6	77	130		6.8
265	1943-04-05	03 08 58.0	6.5	76	140		6.5
297	1945-08-06	23 02 10.0	6	76.5	100		
347	1950-03-14	03 10 2.0	8	74	150		6.8
433	1953-04-17	00 02 50.0	5.2	77.2			6
465	1954-06-15	13 29 59.0	5	77	100		6.6
922	1963-04-13	02 20 57.9	6.3	76.7	125	6.1	6.9
1183	1964-11-02	06 50 58.2	4.1	76.9	91	6	
1381	1965-11-29	17 07 2.0	6	78.6	37	5.5	
1934	1968-06-19	08 13 35.0	5.56	77.15	28	6.4	6.9
1963	1968-06-20	02 38 38.4	5.59	77.33	33	5.8	5.7
1968	1968-06-21	00 26 7.8	5.72	77.28	22	5.6	
2008	1968-07-07	23 48 8.2	5.76	77.14	27	5.5	5.2
2048	1968-09-09	00 37 43.2	8.73	74.52	120	6	
2724	1972-03-20	07 33 49.6	6.77	76.79	64	6.1	6.9
3105	1973-09-18	12 58 25.2	7.03	76.14	133	5.8	
3434	1974-12-05	11 57 31.3	7.69	74.45	162	6	
3484	1975-03-18	17 21 23.4	4.23	77.01	98	6.2	6.5
3559	1975-08-16	00 53 53.7	5.38	76.08	123	5.7	
4093	1979-01-06	01 31 47.6	8.88	75.73	33	5.7	5.7
4910	1982-08-10	04 51 48.6	5.35	77.37	33	5.5	4.5
5076	1983-04-12	12 07 54.5	4.84	78.1	104.2	6.6	
5081	1983-04-15	10 08 20.5	5.98	75.66	118	5.6	
5153	1983-11-03	07 41 11.5	4.01	79.42	92.8	5.9	
5226	1984-06-05	04 15 24.4	7.82	76.71	33	5.8	5.1
5268	1984-11-23	18 40 11.8	8.16	76.13	99.1	5.9	
4161	1990-05-30	02 34 01	6.25	77.16	33	NEIC	6.4 NEIC
4172	1990-05-30	14 49 00	6.21	77.3	33	NEIC	5.4 IGP
4208	1990-06-06	02 01 00	6.34	77.19			5.1 IGP
4218	1990-06-09	01 14 00	6.29	77.34	33		5.6 IGP
4581	1991-04-04	15 23 21 *	6.04 *	77.13 *	20	IGP *	6 IGP
4587	1991-04-05	04 19 50	5.98 *	77.09	19	IGP *	6.5 IGP
11322	2005-09-26	01 55 39	5.61	76.37	132.7	IRIS	7.5
22634	28/11/2021	10 52 12	4.42	76.93	126		7.5

Fuente: Tomado del Catálogo Sísmico del Perú: Cuadrángulos 6, 7, 10, 11

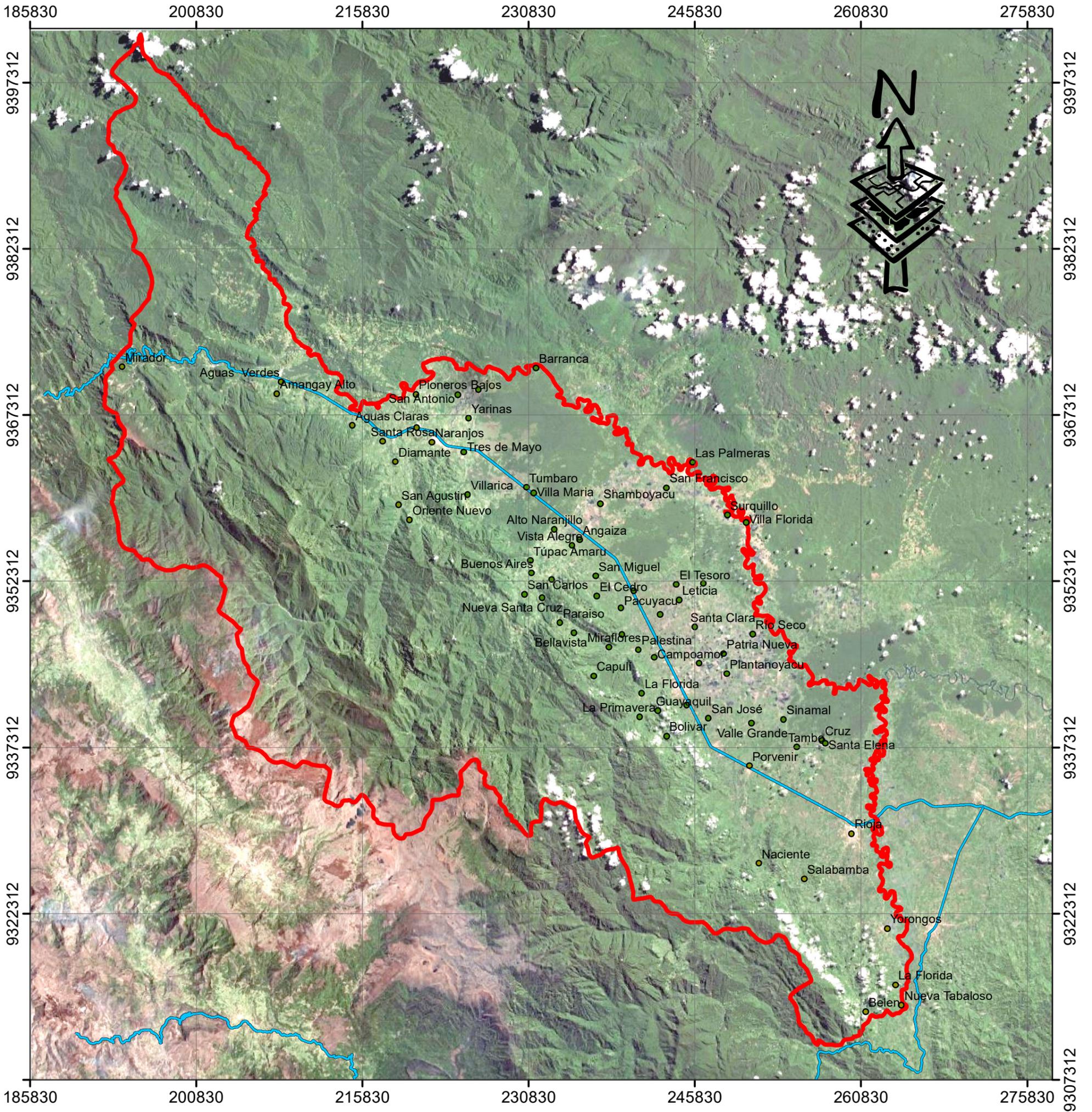
PLANO N° 1: Imagen Satelital

PLANO N° 2: Plano de Ubicación

PLANO N°3: Plano MDE

PLANO N°4: Plano Geológico

PLANO N°5: Columna Estratigráfica



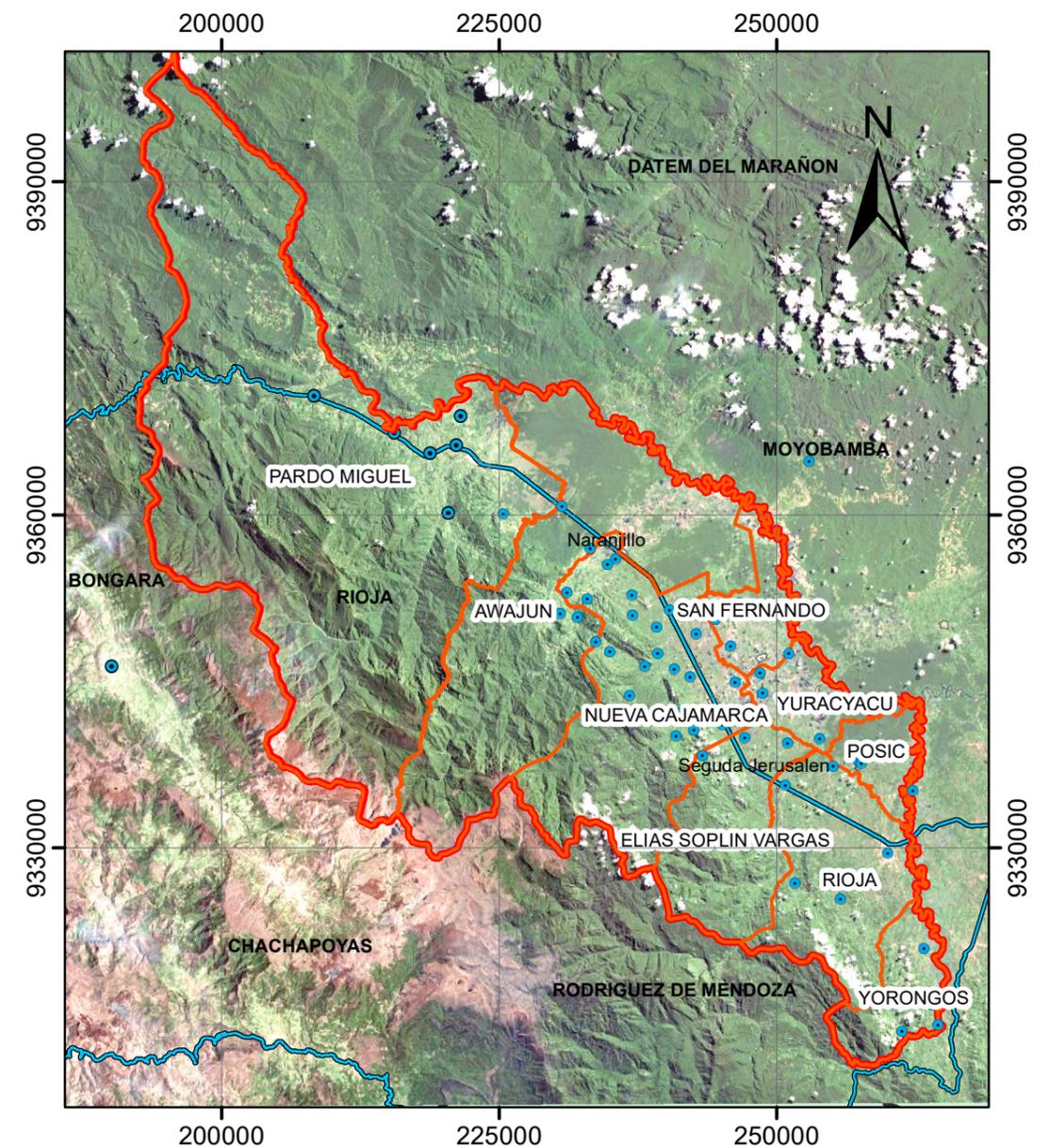
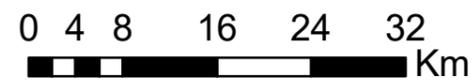
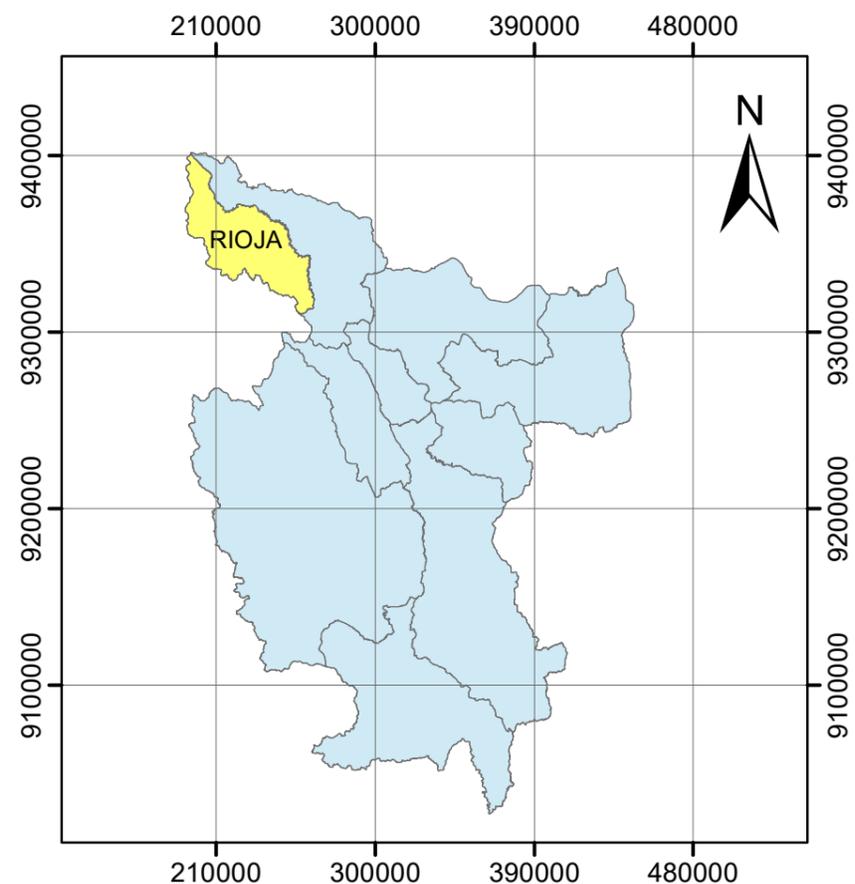
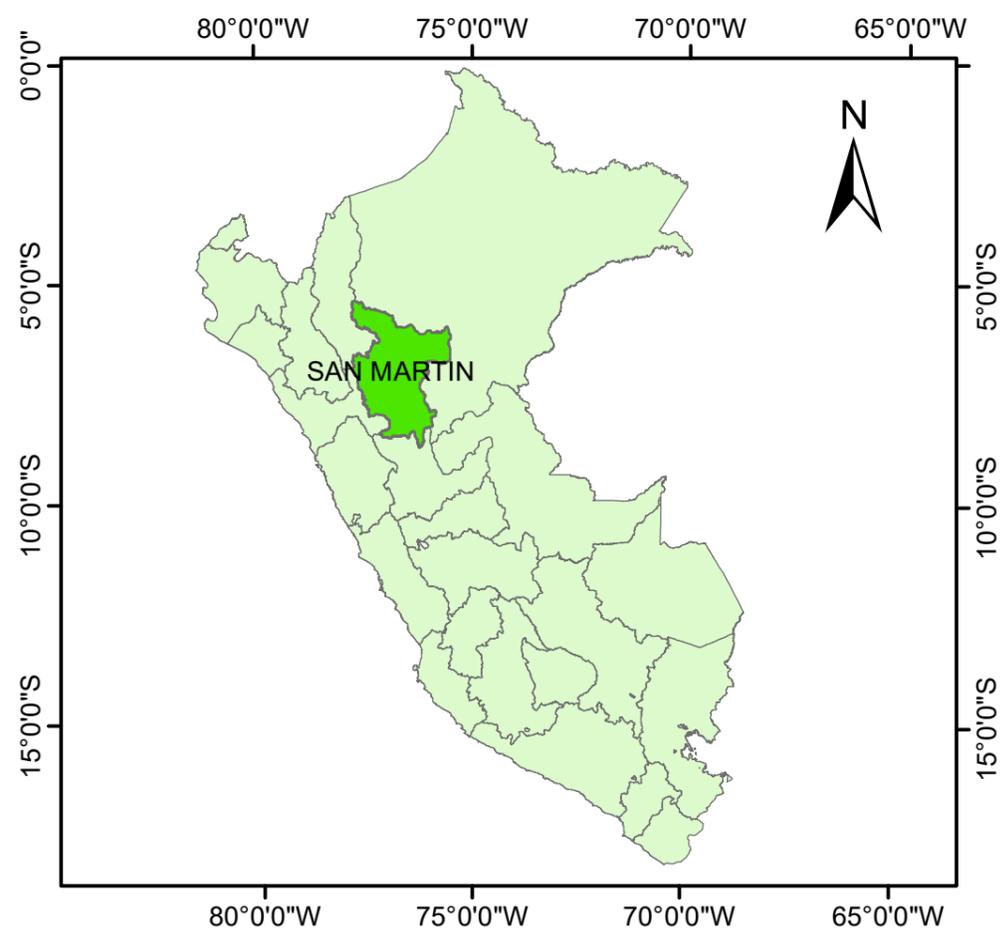
FUENTE: SASPLANET



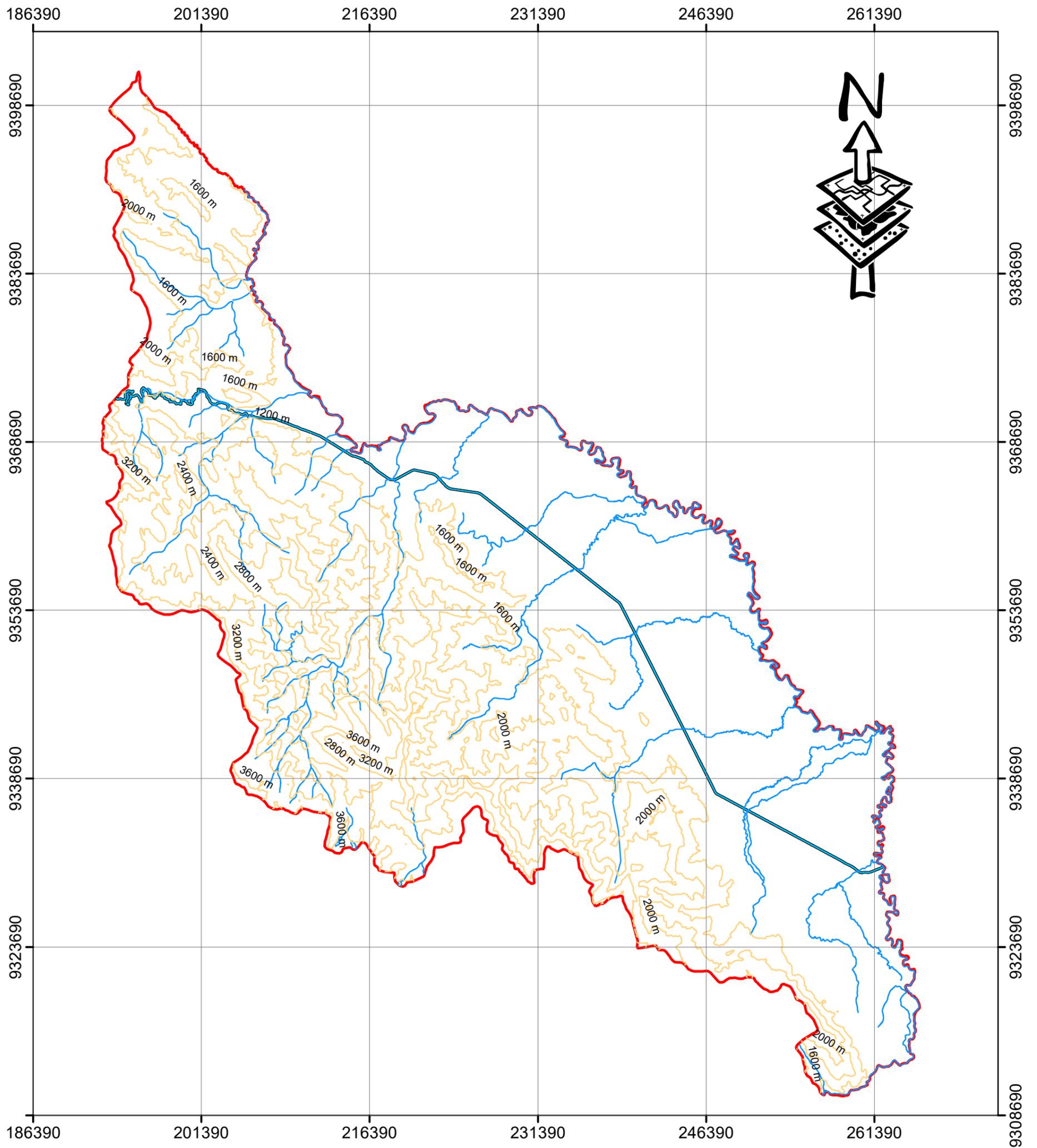
LEYENDA

- Poblados
- Carretera
- ⬮ Rioja

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA- REGIÓN SAN MARTIN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ.	
PLANO : IMAGEN SATELITAL	ESCALA : 1:350000
TESISTA: Bach. Burgos Medina Lener	P-01
ASESOR: Dr.Ing. Quispe Mamani Crispín Zenón	
DATUM : UTM-WGS84 FECHA : Agosto 2023	



	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA- REGIÓN SAN MARTÍN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ.	
PLANO : UBICACIÓN	ESCALA : 1:600000
TESISTA: Bach. Burgos Medina Lener	
ASESOR: Dr. Ing. Quispe Mamani Crispín Zenón	
DATUM : UTM-WGS84	FECHA : Agosto 2023
P-02	

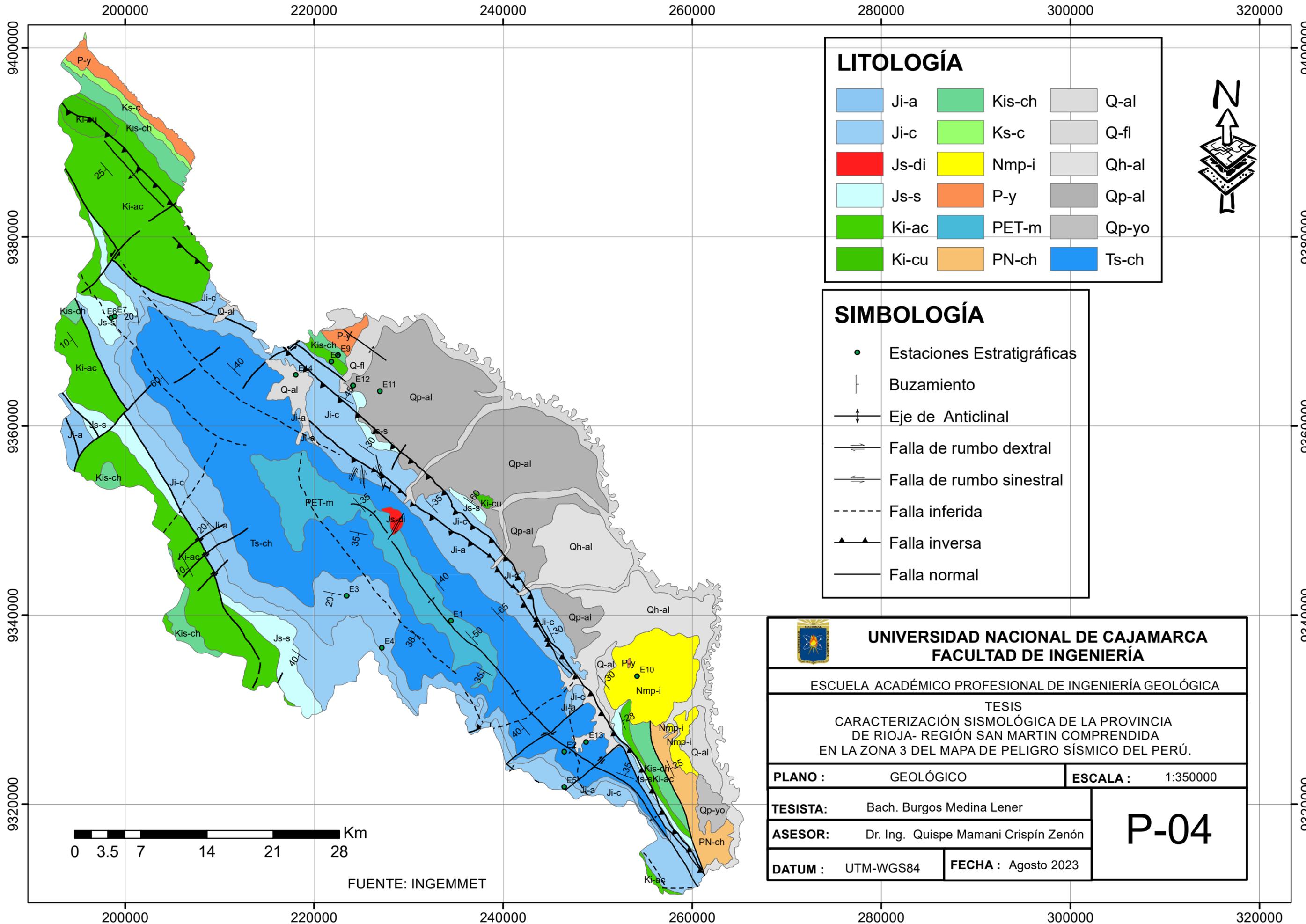


FUENTE: GLOBALMAPPER



LEYENDA	
	Carretera Asfaltada
	Curvas de Nivel Cada 400 m
	Drenaje
	Rioja

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA- REGIÓN SAN MARTÍN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ.	
PLANO : MDE	ESCALA : 1:350000
TESISTA: Bach. Burgos Medina Lener	
ASESOR: Dr.Ing. Quispe Mamani Crispín Zenón	
DATUM : UTM-WGS84	FECHA : Agosto 2023
P-03	



LITOLOGÍA

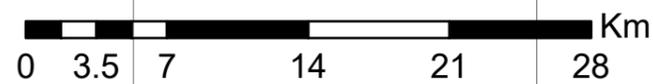
Ji-a	Kis-ch	Q-al
Ji-c	Ks-c	Q-fl
Js-di	Nmp-i	Qh-al
Js-s	P-y	Qp-al
Ki-ac	PET-m	Qp-yo
Ki-cu	PN-ch	Ts-ch

SIMBOLOGÍA

- Estaciones Estratigráficas
- ┆ Buzamiento
- ↕ Eje de Anticlinal
- ⇌ Falla de rumbo dextral
- ⇐ Falla de rumbo sinistral
- - - - - Falla inferida
- ▲▲ Falla inversa
- Falla normal

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS CARACTERIZACIÓN SISMOLÓGICA DE LA PROVINCIA DE RIOJA- REGIÓN SAN MARTIN COMPRENDIDA EN LA ZONA 3 DEL MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL PERÚ.	
PLANO : GEOLÓGICO	ESCALA : 1:350000
TESISTA: Bach. Burgos Medina Lener	
ASESOR: Dr. Ing. Quispe Mamani Crispín Zenón	
DATUM : UTM-WGS84	FECHA : Agosto 2023

P-04



FUENTE: INGEMMET

