



**Universidad Andina Del Cusco**

**Escuela de Posgrado**

**Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible**



**TESIS**

---

---

**PELIGRO SISMICO EN LA SUBCUENCA DEL CUSCO- 2019**

---

---

Presentado por: **MS.c. Carlos Walter Barrientos Guzmán**  
Para optar al Grado Académico de Doctor en  
Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

**Asesor:**

**Dr. Jorge Ramón Silva Sierra**

**CUSCO-PERÚ**

**2020**



## DEDICATORIA

A Dios que ilumina mi camino, me protege y me guía con su amor inconmensurable.

A mi Padres José y Rosa que me iluminan del cielo, quienes me dieron la vida y fueron el pilar fundamental de lo que soy, me enseñaron a ser luchador con valores de perseverancia y superación, a mi esposa e hijos de quienes tengo el apoyo y ayuda que me hace cada día más fuerte.

Asimismo, agradecer a todos mis profesores la Escuela de posgrado de la UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO, a los dictaminadores Dr. Luis Mendoza, Dr. Donato Holguín que engrandecieron el trabajo y en especial a mi asesor el doctor Jorge Silva.



## PRESENTACIÓN

Uno de los principales objetivos del Desarrollo Sostenible al 2030, las Ciudades y Comunidades sean sostenibles, donde la ciudad del Cusco debe ser segura, integradora, resiliente y sustentable; debe actualizarse el desarrollo de Plan Urbano de la ciudad del Cusco, este estudio nos brinda las aceleraciones pico y las amplificaciones sísmicas en la ciudad y será de mucha utilidad para el desarrollo de la ciudad.

Los sismos en la región del Cusco se caracterizan por ser continentales, producto del reajuste del aparato Andino. En la región del Cusco los sismos son de magnitud moderada, muy superficiales con hipocentros promedio de 12 km. Producto del sistema de fallas Cusco que están emplazadas en el Altiplano y cordillera oriental.

El área de estudio se halla enclavado en la depresión del Cusco abarca una superficie 497.01 km<sup>2</sup> del divortium aquarum y con una altitud media de 3350m.s.n.m. el sistema de fallas muestran deformaciones Cuaternarias compresionales y extensionales que dieron como resultado un sistema de fallas siendo las más cercanas a la ciudad del Cusco, la falla de Tambomachay (20km de longitud), y la de Qoricocha (8km. de longitud) y la probable falla Cusco que pasaría por el medio de la ciudad, generadoras del peligro sísmico, la mencionada cuenca ha sido rellenada por la formación San Sebastián Cuaternaria lacustre, formadas por arenas, limos, arcillas, diatomitas con densidades relativamente bajas poco cohesivas en donde el nivel freático es superficial, estas características incrementan el peligro. El 80% de las viviendas están ubicadas sobre la formación lacustre San Sebastián el cual es una formación geológica incompetente, y la expansión urbana es desordenada, caótica sin planificación.

La información sobre sismos en el Cusco es insuficiente para realizar trabajos sobre peligro sísmico, pero nos apoyamos en los sismos históricos, donde se tienen crónicas históricas de Silgado donde mencionan la ocurrencia de sismos muy devastadores para la ciudad del Cusco, siendo los últimos sismos más importantes el de 1650, 1950 y 1986, donde los peligros sísmicos están asociados a fallas neotectónicas.

Estos estudios permiten conocer el comportamiento más probable de los eventos sísmicos y así poder planificar y mitigar los grandes efectos que trae consigo; una forma de conocer el probable comportamiento sísmico de la zona de estudio es mediante la evaluación del peligro sísmico en términos determinísticos y probabilísticos, es decir predecir las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en la ciudad del Cusco.



Los mapas de peligrosidad sísmica sirven para la expansión urbana, planificación de la ciudad, construyendo en zonas seguras y los desastres sean mínimos.

La falla Tambomachay es la mayor estructura local de deformación frágil que establece todo el comportamiento dinámico de la subcuenca con una longitud definida de 20km. La falla de Qoricocha se encuentra fuera de la subcuenca del Cusco, es la última falla que se movió el 5 de abril de 1986, siendo su epicentro en Corao, de magnitud 5.2 Mb causo la muerte de 7 personas, 80 heridos y 13,000 damnificados en la ciudad del Cusco, el estudio de las intensidades en el ámbito urbano de la ciudad del Cusco, indica que las intensidades oscilaron entre IV, y VI en la escala modificada de Mercalli.

El presente trabajo de investigación está estructurado en cuatro capítulos.

El **capítulo I**, se dedica al planteamiento del problema: la descripción y formulación del problema, planteamiento de los objetivos de la investigación, justificación y delimitación de la investigación.

En el **capítulo II**; se desarrolla el marco teórico, engloba los antecedentes de estudio a nivel nacional y local, asimismo se aborda las bases legales y normas generales establecidas por la constitución política del estado y leyes emanadas por el Ministerio del medio ambiente con relación con los objetivos del desarrollo sostenible, también se exponen las bases históricas y bases teóricas, definición de términos básicos, desarrollo de las variables de estudio y la proposición de las hipótesis general.

En el **capítulo III**, abarca el desarrollo del diseño de la investigación, estableciendo en primer lugar, el tipo y diseño de la investigación, población y muestra de estudio, las técnicas para el procesamiento de datos, asimismo los aspectos administrativos del proyecto de investigación.

En el **capítulo IV**, están todos los resultados del análisis del peligro sísmico de la ciudad del Cusco, caracterización de la fuente sismogénica, catalogo sísmico actualizado, microzonificación sísmica, mapa de peligrosidad, lineamientos generales para el desarrollo del peligro sísmico y mapa de peligrosidad por la actividad sísmica el cual será un instrumento para la planificación y el ordenamiento territorial de la ciudad del Cusco.



ÍNDICE

Pag.

<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Formulación del problema .....	3
1.2.1 Problema general .....	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3. Objetivos de la investigación .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación de la investigación .....	4
1.5. Delimitación de la investigación.....	5
1.5.1 Delimitación espacial .....	5
1.5.2 Delimitación temporal .....	5
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
2.1. Antecedentes de estudio.....	6
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1 La magnitud sísmica.....	10
2.2.2 Escalas de magnitud .....	10
2.2.3 Intensidad sísmica.....	12
2.2.4 Fuente sismogénica.....	13
2.2.5 Catálogo sísmico uniforme para la región Cusco.....	14
2.3. Definición de términos.....	17
2.4. Variables de estudio .....	19
2.5. Hipótesis .....	21
2.5.1. Hipótesis general.....	21
2.5.2. Hipótesis específico .....	21
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>22</b>
3.1. Tipo y diseño de la investigación.....	22
3.2. Secuencia del estudio .....	22
3.3. Población de estudio .....	23



3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	23
3.5. Técnicas para análisis de resultados.....	24
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>25</b>
4.1.Ubicación y extensión del área investigada .....	25
4.2.Análisis de la fuente sismogénica y el sistema de fallas geológicas.....	27
4.2.1. Contexto Neotectónico del cusco.....	28
4.2.2. Peligro sísmico determinístico .....	37
4.2.3. Fundamentos del análisis .....	37
4.2.4. Cálculo del peligro sísmico determinístico .....	38
4.2.5. Evaluación del peligro sísmico determinístico de las fallas más cercanas a la ciudad de cusco .....	40
4.3.Peligro sísmico probabilístico .....	46
4.4.Catalogo sísmico uniforme .....	46
4.5.Transformación de sismos históricos de 1650 y 1950 a magnitud .....	47
4.6.Estudios de microzonificación sísmica en la subcuenca del cusco y elaboracion de un mapa de peligrosidad.....	68
4.6.1. Microzonificación sísmica .....	68
4.6.2. Instalación y operación del acelerómetro Ref Tek 130-smhr .....	69
4.6.3. Recolección de datos.....	70
4.6.4. Resultados .....	71
4.6.5. Resultado de los datos de campo .....	74
4.6.6. Mapa de Isoperiodos .....	79
4.7.Peligro sísmico de la sub cuenca del cusco en términos de la aceleración de la gravedad de la tierra .....	81
4.8.Análisis de la susceptibilidad a la peligrosidad sísmica en la ciudad del cusco ..	83
4.8.1. Parámetros y descriptores ponderados para la caracterización de la susceptibilidad.....	83
4.9.Lineamientos generales de prevención y mitigación de desastres, en la subcuenca del cusco.....	93
4.9.1. Los gobiernos regionales y locales deben:.....	94
4.9.2. Evaluación del riesgo y su aceptabilidad .....	95



CONCLUSIONES .....	101
RECOMENDACIONES .....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÉNDICE.....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura N° 01. Fuente sismogénica.
- Figura N° 02. Mapa de epicentros de los sismos históricos e instrumentales ocurridos en la región del Cusco, información tomada de Silgado (1978).
- Figura N° 03. Sismos continentales de la Región Cusco.
- Figura N° 04. Fuente-Cabrera- Tectónico
- Figura N° 05. Sistema de fallas Cusco (fuente CENEPRED-SIGRID)
- Figura N° 06. Sistema de fallas Cusco (fuente INGEMMET).
- Figura N° 07. Fallas Neotectónicas de la ciudad del Cusco. Fuente: Propia
- Figura N° 08. Desplazamiento de la falla evidenciado por las flechas rojas en el escarpe
- Figura N° 09. Escarpes falla de Chincheros (flechas rojas)- trincheras (rectángulos azules)
- Figura N° 10. Desplazamiento de la falla de Qoricocha
- Figura N° 11. Control estructural del sistema de fallas Pachatusan ubicado al noreste de la ciudad del Cusco. INGEMMET
- Figura N° 12. Falla Tambomachay, fuente: propia
- Figura N° 13. Falla Qoricocha, fuente: Propia
- Figura N° 14. Falla Pachatusan, fuente: Propia
- Figura N° 15. Falla Chincheros, fuente: Propia
- Figura N° 16. Falla Tamboray, Fuente: Propia
- Figura N° 17. Área seleccionada para la obtención de los registros sísmico.
- Figura N° 18. Pantalla de inicio del Software R-Crisis
- Figura N° 19. Fuentes de sismos corticales en el Perú.
- Figura N° 20. Introducción de mapa al Software R-Crisis
- Figura N° 21. Malla de trabajo Software R-Crisis
- Figura N° 22. Geometría de las fuentes sísmicas Software R-Crisis



- Figura N° 23. Parámetros sismológicos de la fuente Sismica Software R-Crisis
- Figura N° 24. Ordenadas espectrales Software R-Crisis
- Figura N° 25. Ley de atenuación de Sadigh Software R-Crisis
- Figura N° 26. Periodo de retorno Software R-Crisis
- Figura N° 27. Mapa de peligro sísmico Software R-Crisis
- Figura N° 28. Tasa de excedencia y espectro de peligro Software R-Crisis
- Figura N° 29. Reporte sísmico del Instituto Geofísico del Perú.
- Figura N° 30. Definiciones básicas del Instituto Geofísico del Perú, para la interpretación de los reportes sísmicos.
- Figura N° 31. Data obtenida por el acelerómetro
- Figura N° 32. Medición del ruido sísmico ambiental para calcular Cociente Espectral H/V
- Figura N° 33. Mapa de Isoperiodos  $1/f = T$ ,  $f =$  frecuencia,  $T =$  Periodo
- Figura N° 34. Influencia del tipo de suelos en la aceleración espectral
- Figura N° 35. Parámetros del plan de prevención.
- Figura N° 36. Medidas en caso de sismo.

### **ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS**

- Fotografía N° 01. Vista panorámica del flanco sur de la Ciudad del Cusco.
- Fotografía N° 02. Escarpe principal de la falla Pachatusan. (Benavente, C. et. al. 2013).
- Fotografía N° 03. Destrucción del templo Santo Domingo
- Fotografía N° 04. Acelerómetro Triaxial Ref Tek; G.P.S
- Fotografía N° 05. Equipo de trabajo dirigido por el Mgt. Carlos Barrientos
- Fotografía N° 06. Instalación del Acelerómetro Ref Tek

### **ÍNDICE DE TABLAS**

- Tabla N° 01. Magnitud en la escala de Richter.
- Tabla N° 02. Escala de intensidades de Mercalli modificada.
- Tabla N° 03. Operacionalización de variables.
- Tabla N° 04. Falla de Tambomachay
- Tabla N° 05. Probable falla Cusco
- Tabla N° 06. Falla de Chinchero
- Tabla N° 07. Falla de Qoricocha
- Tabla N° 08. Falla de Pachatusan





Tabla N° 09. Falla de Tamboray

Tabla N° 10. Correlación Aceleración con la Escala de Mercalli

Tabla N° 11. Escala intensidad de mercalli modificada comparada con la magnitud de richter

Tabla N° 12. Este catálogo fue reprocesado por el Ing. Carlos Barrientos en el IGP y datos del servicio de Geología de los Estados Unidos. Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 13. Esta tabla es referencial para los suelos de la ciudad del Cusco.

Elaboración propia

Tabla N° 14. Periodo y amplificación sísmica del suelo-plaza de armas- Cusco

Tabla N° 15. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito Santiago

Tabla N° 16. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito San Sebastián 4to paradero

Tabla N° 17. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito Wánchaq- parque industrial

Tabla N° 18. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito San Sebastián-Alto Qosqo Pumamarca.

Tabla N° 19. Pesos ponderados de los parámetros de evaluación

Tabla N° 20. Pesos ponderados de los factores condicionantes.

Tabla N° 21. Pesos ponderados de los factores desencadenantes.

Tabla N° 22. PROCESO DE ANALISIS JERARQUICO (Thomas L. Saaty (1980).

Tabla N° 23. Escala de Thomas Saaty

Tabla N° 24. Valores hallados con la matriz de Saaty 4x4

Tabla N° 25. Pesos ponderados de los factores condicionantes

Tabla N° 26. Pesos ponderados de los factores desencadenantes

Tabla N° 27. Niveles de peligro

Tabla N° 28. Parámetros del probable sismo originado por la falla de Tambomachay

## **ÍNDICE DE DIAGRAMAS**

Diagrama N° 01. Relación distancia-PGA

Diagrama N° 02. Software R-Crisis.

Diagrama N° 03. Tipos de peligros naturales y antrópicos.

Diagrama N° 04. Proceso de análisis jerárquico.

Diagrama N° 05. Niveles del proceso de análisis jerárquico



## RESUMEN

El presente trabajo intitulado “Peligro sísmico en la subcuenca del Cusco-2019”, tiene un carácter integral, abarca los aspectos Sismológicos, Geológicos, Tectónicos para lograr una ciudad segura, resiliente y sostenible y cumplir con los objetivos del desarrollo sostenible.

La ciudad del Cusco se halla emplazada en la depresión del valle del Cusco, rellenada por un material lacustre inconsolidado, abarca un área de 497.01 km<sup>2</sup> (divortium aquarium) y con una altitud media de 3350m.s.n.m. emplazada dentro del sistema fallas Cusco, las que provocaron terremotos desastrosos siendo los últimos sismos más importantes el de 1650, 1950 y 1986, donde los peligros sísmicos están asociados a fallas neotectónicas, La fuente sismogénica principal es la falla de Tambomachay (22km de longitud), y la probable falla Cusco que pasaría por el medio de la ciudad, generadoras del peligro sísmico, con una litología de conos aluviales, gravas, arenas, limos, arcillas, diatomitas, poco cohesivas con nivel freático superficial, estas adicionan el peligro sísmico. El 80% de las viviendas en la subcuenca del Cusco están ubicadas sobre la formación lacustre San Sebastián el cual es una formación geológica incompetente, y la expansión urbana es desordenada, caótica sin planificación.

Se confecciono un catálogo sísmico, se muestran los reportes del año 1990 al 2019 con apoyo de algunos sismos históricos, con magnitudes moderadas, hallando la magnitud máxima de 6.5 que se produciría en la ciudad del Cusco.

Se realizó la microzonificación sísmica de la subcuenca del Cusco para la determinación del período fundamental de vibración de los suelos del Cusco a partir de mediciones de vibración ambiental con un acelerómetro triaxial avanzado. Se midieron 29 puntos usando ruido sísmico ambiental, calculándose el Cociente Espectral H/V. los resultados nos muestran que el suelo es malo a muy malo, con Amplificaciones sísmicas de 5 a 6 veces.

Se hizo una corrida del peligro sísmico de la ciudad del Cusco en el software R-CRISIS, dando como resultado una aceleración de 450 Gal. El cual causaría un gran desastre en la ciudad. Para el plano del peligro sísmico se utilizó la metodología del CENEPRED, los resultados nos indican que gran parte de la ciudad del Cusco es de peligro alto, especialmente el distrito de San Sebastián, Wánchaq, San Jerónimo, por tener mayores espesores de suelos, depósitos palustres, lacustres, con presencia de licuefacción de suelos y amplificaciones sísmicas.

Palabras clave: Peligro sísmico, Microzonificación, amplificación sísmica, Neotectónica



## ABSTRACT

The present work entitled "Seismic Hazard in the Cusco Sub-basin-2019", is comprehensive in nature, covers seismological, geological, and tectonic aspects to achieve a safe, resilient and sustainable city and meet the objectives of sustainable development.

The city of Cusco is located in the depression of the Cusco valley, filled with unconsolidated lake material, covers an area of 497.01 km<sup>2</sup> (divortium aquarium) and with an average altitude of 3350m.s.n.m. located within the Cusco fault system, which caused disastrous earthquakes, the last most important earthquakes being those of 1650, 1950 and 1986, where seismic hazards are associated with neotectonic faults, The main seismogenic source is the Tambomachay fault (22km long) , and the probable Cusco fault that would pass through the middle of the city, generators of seismic danger, with a lithology of alluvial cones, gravels, sands, silts, clays, diatomites, little cohesive with a superficial phreatic level, these add the seismic danger. 80% of the houses in the sub-basin of Cusco are located on the San Sebastián lake formation, which is an incompetent geological formation, and urban expansion is disorderly, chaotic without planning.

A seismic catalog was made, the reports from 1990 to 2019 are shown with the support of some historical earthquakes, with moderate magnitudes, finding the maximum magnitude of 6.5 that would occur in the city of Cusco.

The seismic microzoning of the Cusco sub-basin was carried out to determine the fundamental period of vibration of the Cusco soils from environmental vibration measurements with an advanced triaxial accelerometer. 29 points were measured using ambient seismic noise, calculating the H / V Spectral Ratio. The results show us that the soil is bad to very bad, with seismic amplifications of 5 to 6 times.

A run of the seismic hazard of the city of Cusco was made in the R-CRISIS software, resulting in an acceleration of 450 Gal. Which would cause a great disaster in the city. For the seismic hazard plan, the CENEPRED methodology was used, the results indicate that a large part of the city of Cusco is highly dangerous, especially the district of San Sebastián, Wanchaq, San Jerónimo, due to having greater thickness of soils, deposits marsh, lacustrine, with the presence of soil liquefaction and seismic amplifications.

Keywords: Seismic hazard, Microzonation, seismic amplification, Neotectonic



## SINTESI

Il presente lavoro intitolato "Pericolo sismico nel sottobacino di Cusco-2019", è di natura completa, copre aspetti sismologici, geologici e tettonici per raggiungere una città sicura, resiliente e sostenibile e soddisfare gli obiettivi di sviluppo sostenibile.

La città di Cusco si trova nella depressione della valle di Cusco, riempita da materiale lacustre non consolidato, copre un'area di 497,01 km<sup>2</sup> (acquario divortium) e con un'altitudine media di 3350 m.s.n.m. situato all'interno del sistema di faglie di Cusco, che ha causato terremoti disastrosi, gli ultimi terremoti più importanti sono stati quelli del 1650, 1950 e 1986, dove i rischi sismici sono associati a faglie neotettoniche, La principale fonte sismogenica è la faglia di Tambomachay (lunga 22 km), e la probabile faglia di Cusco che passerebbe per il centro della città, generatori di pericolo sismico, con una litologia di coni alluvionali, ghiaie, sabbie, limi, argille, diatomiti, poco coesive con un livello freatico superficiale, a queste si aggiunge il pericolo sismico. L'80% delle case nel sottobacino di Cusco si trova sulla formazione del lago di San Sebastián, che è una formazione geologica incompetente, e l'espansione urbana è disordinata, caotica senza pianificazione.

È stato realizzato un catalogo sismico, le relazioni dal 1990 al 2019 sono mostrate con il supporto di alcuni terremoti storici, con magnitudo moderate, trovando la magnitudo massima di 6.5 che si verificherebbe nella città di Cusco.

La microzonazione sismica del sottobacino di Cusco è stata effettuata per determinare il periodo fondamentale di vibrazione dei suoli di Cusco da misure di vibrazioni ambientali con un accelerometro triassiale avanzato. 29 punti sono stati misurati utilizzando il rumore sismico ambientale, calcolando il rapporto spettrale H / V. I risultati ci mostrano che il suolo è cattivo o molto cattivo, con amplificazioni sismiche da 5 a 6 volte.

Nel software R-CRISIS è stata eseguita un'analisi della pericolosità sismica della città di Cusco, con un'accelerazione di 450 Gal. Il che provocherebbe un grande disastro in città. Per il piano di pericolosità sismica è stata utilizzata la metodologia CENEPRED, i risultati indicano che gran parte della città di Cusco è altamente pericolosa, in particolare il distretto di San Sebastián, Wánchaq, San Jerónimo, a causa del maggiore spessore dei suoli, depositi palustri, lago, con presenza di liquefazione del suolo e amplificazioni sismiche.

parole chiave: Rischio sismico, microzonazione, amplificazione sismica, neotettonica



## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

“El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra, por lo tanto, está expuesto a este peligro, que trae consigo la pérdida de vidas humanas y pérdidas materiales. Es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento más probable de este fenómeno para poder planificar y mitigar los grandes efectos que trae consigo. Una forma de conocer el probable comportamiento sísmico de un lugar es mediante la evaluación del peligro sísmico en términos probabilísticos, es decir predecir las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un lugar determinado” (Alva Hurtado, Jorge E.; Castillo Aedo, Jorge L., 1994) .

La dinámica de la placas tectónicas produce un reajuste tectónico del aparato Andino, la región del Cusco se caracteriza por presentar sismos continentales de magnitud moderada, gran intensidad y una atenuación rápida de las ondas sísmicas, subcuenca del Cusco pertenece a la fuente de sismos continentales cuya fuente sismogénica es el sistema de fallas Cusco; el choque entre placas oceánica y continental, ha formado la geomorfología de la cordillera de los Andes y la “aparición de importantes fallas geológicas de diferentes longitudes que son las causantes de la actividad sísmica en los andes peruanos” (Cabrera J., 1998)

Por fuerzas compresivas se formó la cordillera de los Andes, las cuales originaron el sistema de fallas Cusco. Este sistema de fallas es la fuente sismogénica que generaría sismos con magnitudes máximas de 6.9 Mw, magnitudes moderadas, estos serían de gran intensidad, debido a que la población está muy cerca a la fuente Sismogénica y sus hipocentros suelen tener profundidades menores a 15 km. “En general, en ambos extremos de la Cordillera Andina, los sismos son de tipo compresivo (fallas inversas) y en la cresta de la misma de tipo extensional (fallas normales)” (Tavera, Fuentes sismogenicas y tipo de sismos en el Perú, 2010).

Para estudiar la peligrosidad Sismica existen 2 caminos. El método determinístico que indica el terremoto de mayor magnitud que pueda ocurrir basado en expresiones matemáticas, utiliza la sismicidad ocurrida en el pasado de la región del Cusco. El método probabilístico cuantifica la peligrosidad sísmica en base a un catálogo sísmico y los terremotos que ocurrirán, asociados a un valor de probabilidad.



La ciudad imperial es considerada como una zona Sismica, por estar muy cerca del sistema de fallas Cusco, se encuentra dentro de la zona 2; dentro de la historia Sismica la ciudad Imperial ha tenido sismos devastadores, en 1650 un sismo de magnitud 6.5; el siguiente en 1950 la ciudad imperial fue afectada en más del 50% de sus viviendas; el último en suceder fue el sismo de magnitud 5.2 Mw, cuyo epicentro fue la falla de Qoricocha, cuyos daños fueron menores debido a que esta falla es de una longitud pequeña.

“La Subcuenca del Cusco en la parte norte tiene varias fallas geológicas siendo estas muy cercanas a la ciudad imperial, la Falla de Tambomachay (22km de longitud); Pachatusan (7km. de longitud); Qoricocha (6km. de longitud); Chincheros (10km. de longitud)” (INGEMMET - Silgado, 1974); y la falla que provoco el sismo de 1950 esta pasaría por el medio del valle, responsables del peligro sísmico, la ciudad imperial ha sufrido sismos destructores que han causado la muerte de cientos de personas, miles de heridos y damnificados por lo que se hace necesario realizar trabajos de investigación para conocer a las fuentes generadoras de estos sismos (fallas sismogénicas), a fin de tomar medidas de prevención en la calidad de las construcciones de las diferentes obras civiles. Por su composición litología lacustre la ciudad imperial en un evento sísmico, generaría efecto de sitio, deslizamiento en los taludes, etc.; los eventos sísmicos serian generados por el sistema de fallas Cusco, denominados sismos continentales o corticales, estos sismos se caracterizan por ser de magnitud moderada, gran intensidad por la cercanía de las fallas, estas investigaciones serian importantes para hallar el espectro de respuesta y aceleraciones del suelo y hallar el espectro de respuesta para el diseño sismoresistente de las viviendas. La respuesta de la exposición de las viviendas, está en función de la naturaleza del suelo y el comportamiento estructural con sus características físicas y dinámicas; Para realizar una evaluación de la vulnerabilidad Sismica del efecto de los sismos es importante la antigüedad de la edificación, el tipo de suelo, siempre aplicando la norma 030 sismoresistente. El peligro estará en función a las aceleraciones pico, la intensidad del movimiento y la respuesta estructural.

“El ultimo sismo que se produjo en la ciudad del Cusco el 11 de noviembre del 2018, al promediar las 06:11 (UTC 11:11), y su epicentro se localizó a 9 kilómetros al noreste de la ciudad de Cusco fue de magnitud 4.0 en la escala de Richter, con una profundidad de 18 kilómetros. Según la escala de Mercalli Modificada (MM), el temblor tuvo una intensidad de nivel entre **IV** y **V** en la ciudad de Cusco” (IGP, sismos, 2018), lo que nos indica que hubo



una amplificación sísmica debido a la calidad de los suelos, no se han reportado daños personales ni materiales, pero fue perceptible por toda la ciudad del Cusco, lo que amerita también un estudio de Microzonificación sísmica de la provincia del Cusco que difiere por su información de acuerdo a los trabajos de las instituciones científicas que no tienen su área de actividad en nuestra ciudad.

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

Debido a la existencia de un sistema de fallas geológicas activas muy cerca de la ciudad del Cusco, se hace imprescindible el estudio del peligro sísmico en la subcuenca del Cusco para mitigar los efectos que este produciría en la Ciudad.

### **1.2.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Cuál es la probabilidad del peligro sísmico en la subcuenca del Cusco 2019?

### **1.2.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS**

1. ¿Cuál es el Peligro Sísmico, por el método determinístico para caracterizar la fuente sismogénica y la aceleración pico en la subcuenca del Cusco?
2. ¿Como es el Peligro Sísmico Probabilístico para la estimación de probabilidad de ocurrencia y espectros de peligro uniforme?
3. ¿Porque la microzonificación sísmica es importante para determinar los periodos fundamentales de los suelos, amplificaciones sísmicas en la subcuenca del Cusco?
4. ¿Cómo es posible proponer lineamientos generales de Prevención y Mitigación en base a los resultados del estudio?

## **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el peligro sísmico en la Subcuenca del Cusco, obteniendo los resultados del análisis del peligro sísmico por el método determinístico y probabilístico de la fuente sismogénicas aledañas a la zona de estudio, incluyendo la microzonificación sísmica, para finalmente proponer medidas estructurales de prevención y mitigación de desastres.



### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el peligro sísmico, por el método determinístico para caracterizar la fuente sismogénica y la aceleración pico en la subcuenca del Cusco
2. Analizar el peligro sísmico probabilístico para la estimación de probabilidad de ocurrencia y espectros de peligro uniforme
3. Analizar la microzonificación sísmica, para determinar los periodos fundamentales de los suelos, amplificaciones sísmicas en la subcuenca del Cusco.
4. Proponer lineamientos generales de Prevención y Mitigación en base a los resultados del estudio, en la zona de estudio.

### 1.4. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

- a. En cuanto al tema carece de investigaciones, debido a que la investigación se realiza principalmente para la fuente sismogénica de la subducción y muy poco para sismos continentales, utilizando la metodología del CENEPRED
- b. Los resultados del análisis del peligro sísmico son muy valiosos para el Plan de Desarrollo Urbano y ordenamiento de la subcuenca del Cusco.
- c. La ciudad Imperial en su historia sísmica se caracterizó por tener sismos moderados que causo la destrucción y muerte de cientos de personas, miles de heridos y damnificados por lo que se hace necesario realizar trabajos de investigación para conocer a las fuentes generadoras de estos sismos (fallas sismogénicas) y la amplificación sísmica que sufriría el valle del Cusco, realizar una gestión de riesgos Prospectiva, Correctiva y Reactiva, con el fin de atenuar los desastres por la actividad sísmica en el valle del Cusco.
- d. Actualmente la ciudad del Cusco no cuenta con un mapa de peligrosidad sísmica que es muy importante para la planificación de la ciudad.
- e. La presente investigación es uno de los primeros que se dan en esta área geográfica lo que contribuirá con los resultados a obtenerse medidas de prevención y mitigación.





## **1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL**

Esta investigación se desarrolló en la ciudad Imperial en los distritos del Cusco, Santiago, Wánchaq, San Sebastián, San Jerónimo, Saylla, Oropesa Provincia del Cusco, tiene un promedio de 500,000 habitantes.

### **1.5.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL**

El trabajo de campo del presente trabajo de investigación corresponderá al período histórico 2019.



## CAPITULO II MARCO TEORICO

### 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Dado las características del área de investigación, donde la subcuenca del Cusco tiene una Neotectónica activa; sismos continentales, suelos blandos, por ello adjuntamos algunas referencias similares para tener una visión integral de estos fenómenos naturales, enfatizando en los objetivos, metodologías, resultados y conclusiones de estudios similares.

Cada fuente sismogénica es diferente; este estudio es el primero que se realiza porque consigna datos de salida de campo, para la verificación de los sismos recientes. como referencia se mencionan algunos antecedentes internacionales y nacionales que tienen características peculiares a la subcuenca del cusco

solo los antecedentes se concretan los que tienen relevancia con los objetivos del presente estudio.

#### a. INTERNACIONAL

- **Aracena J., Germoso C. (2019), Respuesta Sísmica local de la presa LAS DOS BOCAS utilizando un análisis no lineal (SANTO DOMINGO), objetivo** es la evaluación de la respuesta del terreno donde se ubica la edificación. La respuesta dinámica del suelo es compleja, depende de varias variables, propiedades del suelo y excitación a la que se encuentre sometida. “El comportamiento no lineal del suelo en el evento sísmico es importante en el análisis de la respuesta del sitio, indica que su relación esfuerzo-deformación es no lineal, debido a esto, el enfoque lineal debe ser modificado para proporcionar estimaciones razonables de respuesta del terreno para los problemas prácticos de interés. La no linealidad puede afectar la amplificación del suelo en función de diferentes fuentes de excitación. Aquí, el comportamiento no lineal con un enfoque en la respuesta del sitio 1-D se desarrolla aplicando un **método** iterativo; concluye lograr la aproximación lineal equivalente del suelo, basada en las propiedades no lineales del material” (Aracena J.; Germoso C., 2019).
- (Lantada, 2007) **Realiza** la caracterización del riesgo sísmico a las zonas urbanas de Barcelona donde hay peligro sísmico, con sismos de magnitud moderada, aplicando una metodología moderna. Las metodologías de modelado del riesgo sísmico se adaptaron al



nivel de información disponible y con los sistemas de información geográfica; “en la metodología se utilizó el programa HAZUS, utiliza metodologías integrales involucra la estimación de daños y simulaciones de eventos sísmicos, mediante el uso de la herramienta de los Sistemas de Información Geográfica utilizadas por organismos oficiales locales, regionales y estatales, para que puedan planificar y estimular los esfuerzos de mitigación para reducir pérdidas antes de que ocurra un terremoto y prepararse para una respuesta de emergencia y recuperación de cara a terremotos posteriores. Se concluye que el riesgo sísmico va más allá del peligro sísmico porque involucra la vulnerabilidad sísmica de los edificios, se deben efectuar análisis de todos los edificios, estructuras e infraestructuras diferentes de los edificios de viviendas” (Lantada, 2007).

- **“Adrián David García Soto, Adrián Pozos-Estrada (2012), Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad Universitaria, CP 04510, México, objetivo** estudiar la ocurrencia de grandes sismos que causan excitaciones muy intensas del terreno en México que pueden provocar el colapso de edificios y puentes, tomando en cuenta la incertidumbre y diseñar las estructuras en base a las aceleraciones pico del lugar, la evaluación probabilística del peligro sísmico es empleada para desarrollar espectros de peligro uniforme (EPU) y mapas de contorno de peligro sísmico. Aunque existe mucha información en relación al cálculo del peligro sísmico en México y su inclusión en reglamentos, no hay en la literatura un reporte detallado, que incluya un modelo de peligro sísmico útil para obtener los EPU, estructural. Se concluye con un modelo de peligro sísmico útil para para desarrollar mapas de contorno para una parte de México; se calcula la contribución al peligro sísmico de cada tipo de sismo” (Adrian Garcia, 2012)”.

**b. NACIONAL.**

- **Doctor Aguilar Bardales, SENCICO (2016). Análisis de Peligro Sísmico en el Perú.** El objetivo es la evaluación del peligro sísmico es aplicar un método de estimación de la peligrosidad sísmica con R-CRISIS y obtener la aceleración espectral; “empleo el modelo de atenuación para aceleraciones espectrales propuestas por Sadigh, et al, (1997) para sismos continentales. Se han utilizado catorce fuentes sismogénicas de subducción, en las cuales se han diferenciado los mecanismos de interfase (F1, F2, F3, F4 y F5) y de intraplaca superficial (F6, F7, F8, F9 y F10) e intermedias (F11, F12, F13 y F14). Así mismo se han utilizado seis



fuentes sísmicas continentales (F15, F16, F17, F18, F19 y F20). La geometría de estas fuentes es concordante con el modelo de subducción propuesto por Cahill e Isacks (1992). La conclusión más importante es que la evaluación del peligro sísmico realizada para el Perú está basada en la teoría desarrollada por Cornell (1968) y ha sido realizada empleando en el programa de cómputo CRISIS 2007” (Bardeles, 2016) .

- **Tavera H., Bernal I., (2014), IGP. Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú.** El IGP con su red de estaciones sísmicas elabora los catálogos sísmicos, más la disponibilidad de nuevas leyes de atenuación propuestas por Young et al (1987) y Sadigh et al (1987) con un modelo sismotectónico actualizado para el territorio peruano y hallando la peligrosidad sísmica con el R-CRISIS-2007. “Los resultados se presentan para periodos de retorno de 50 y 100 años con el 10% de excedencia y ordenadas espectrales para diferentes periodos estructurales. Concluyen que es un insumo necesario para la realización de estudios de microzonificación y de Riesgo Sísmico dentro del territorio nacional de la República de Perú” (Tavera, Evaluacion del peligro sismico en el Perú, 2014).
- **Gamarra C. (2009). *Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú.*** El objetivo de esta investigación fue definir y caracterizar las nuevas fuentes sismogénicas con un catálogo actualizado para cada fuente sismogénica; “elaboró un nuevo mapa de 20 fuentes sismogénicas para el Perú, de las cuales 14 corresponden a fuentes de subducción y 6 a fuentes continentales. Para la compilación de la data sísmica se utilizaron los catálogos del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y de la National Earthquake Information Center (NEIC) para el período de mayor homogeneidad y con menor magnitud umbral de detección, es decir, datos posteriores a 1963 y magnitudes  $M_s \geq 2.0$ ” (Gamarra, 2009)

**Bolaños Ana (2004), Tesis de Maestría - PUCP. *Espectros de Peligro Sísmico Uniforme.*** Su objetivo fue determinar las aceleraciones pico del suelo, la amplitud de las aceleraciones máximas esperadas en un lugar específico está en función de las fuentes que representan la sismicidad de la zona y la ley de atenuación usada para representar el movimiento en cada fuente, utilizo 20 fuentes, siendo de 0.45 gal en la costa y 0.04 gal al este de Loreto, las aceleraciones obtenidas en roca para el resto del País presentan valores menores hasta en 10% con respecto a los obtenidos por Castillo y Alva. importantes para determinar un espectro de respuesta y determinar la altura de los edificios a construir. “se empleó la magnitud de momento ( $M_w$ ) y se usó por primera vez para todo el País una ley de atenuación



que distinga sismos de subducción de interfase e intraplaca, como resultado, se obtuvieron mapas de distribución de aceleraciones y ordenadas espectrales para todo el País correspondientes a un periodo de retorno de 475 años” (Luna, 2004).

- **Castillo Jorge (1994), *Peligro Sísmico en el Perú*. Tesis UNI.** Esta investigación determina la peligrosidad sísmica, obteniendo las aceleraciones pico que podrían ocurrir en cualquier punto parte del territorio, pero en basamento rocoso. “Se realiza una breve descripción de los principales rasgos tectónicos y se analizan la sismicidad histórica e instrumental. Se procede a elaborar un catálogo sísmico depurado y actualizado, así como la determinación de una relación entre las magnitudes  $M_b$  y  $M_w$ , Se concluye en que las aceleraciones máximas esperadas en roca para todo el país y áreas vecinas, obteniéndose mapas de isoaceleraciones horizontales para el 10 % de nivel de excedencia en 50 y 100 años” (Castillo Aedo, 1994).
- **“Casaverde y Vargas (1980)**, empleo la metodología para el cálculo de peligro sísmico fue implementada en el Perú por estos autores, habiendo sido utilizada también por otros investigadores del país en diversos proyectos de Ingeniería. Casaverde y Vargas utilizaron el catálogo sísmico del IGP (Instituto Geofísico del Perú) y propusieron 27 fuentes sismogénicas con sus respectivos parámetros sismológicos y la ley de atenuación basada en registros de acelerogramas de diez sismos peruanos registrados en Lima” (Vargas, 1980)
- **“CISMID (1992)** (Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, realizo trabajos de peligro sísmico para ELECTROPERU S.A. como parte de los estudios requeridos para la construcción de importantes obras civiles en nuestro país” (Cismid, 1992)
- **“SISMICIDAD Y RIESGO SÍSMICO EN LA REGIÓN ANDINA (SISRA)** con la participación de todos los países sudamericanos. **SISRA (1995)**. Los objetivos fueron la obtención de un catálogo sísmico actualizado, su condición geológica y geodésica y una mejor localización de los epicentros e hipocentros; “educación técnica y entrenamiento; mejoramiento de las estaciones sísmicas existentes y la instalación de nuevas estaciones Catalogo de Terremotos para América del Sur, Proyecto SISRA – CERESIS, Lima, Perú” (Sisra, 2006)
- **“Silgado E. (1978), *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú* (1513-1974)**, su objetivo fue recolectar información durante 10 años en las diferentes bibliotecas de España las crónicas de los terremotos que ocurrieron en el siglo XV, durante el incanato y publicar un catálogo sísmico histórico que sirva de base para los trabajos estadísticos en peligro



sísmico probabilístico, en el Instituto de Geología y Minería, boletín N°3, serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú. (Silgado, 1978)” (INGEMMET - Silgado, 1974).

- “**Gregory (1916)**, estudia la geología y fisiografía de la subcuenca del Cusco, supuso que el valle del cusco se formó por un movimiento tectónico de falla que ocurrió en el Terciario o es sus postrimerías. Luego el valle fue ocupado por un lago glaciar en la época Plio-pleistocenica, al que denomino Lago morkill, la información preliminar para el presente estudio ha considerado información bibliográfica básica de estudios y publicaciones realizados por Gregory, Newell (1948), Marocco (1978); estudios realizados por el INGEMMET en la base geológica del “Cuadrángulo de Cuzco 28-S” (Carlotto, 2002).

## 2.2. BASES TEORICAS.

Son las bases que se crearon con un conocimiento científico sísmico a lo largo de la historia de la vida, con la contribución de grandes filósofos y científicos. Siendo las más importantes las siguientes:

### 2.2.1. LA MAGNITUD SÍSMICA

La **magnitud** es la cantidad de energía liberada en el hipocentro del espejo de falla. Es una medida cuantitativa registrada en los sismógrafos, la magnitud es la misma en todas las estaciones sismológicas.

#### **Magnitud de Richter:**

$$M_b = \log (A/T) + Q(D,h)$$

**A:** amplitud del movimiento del suelo

**T:** periodo de la onda considerada

**Q:** función entre distancia (D) y profundidad (h)

En algunos casos la magnitud se determina por relaciones entre la magnitud e intensidad, pero estas determinaciones tienen un alto grado de incertidumbre. La forma más común es a partir de mediciones de la amplitud, amplitud y periodo, duración o nivel de espectro. El tipo de magnitud depende del equipamiento usado para registrar los sismos. Las magnitudes más confiables son la magnitud de momento ( $M_w$ ) no se satura, se determina por el nivel del espectro de las ondas P, que es plano antes de la frecuencia de corte y magnitud de las ondas de cuerpo ( $M_b$ ). El terremoto de mayor magnitud en la historia de la



tierra ocurrió en Chile, valdivia en mayo de 1960 con una magnitud de 9.5 Mw y desde esa fecha los registros instrumentales son más precisos.

### 2.2.2. ESCALAS DE MAGNITUD

Las magnitudes más utilizadas por las agencias sismológicas y confiables son las siguientes:

- **Magnitud Momento  $M_w$** : Es la más confiable basada en el momento sísmico  $M_0$  de la fuente generadora del sismo; es una escala de magnitud establecida por H. Kanamori.
- **Magnitud de Ondas de Superficie  $M_s$** : su registro se basa en la amplitud máxima de las ondas de superficie con períodos de aproximadamente 20 segundos.
- **Magnitud de Ondas de Cuerpo  $M_b$** : registro basado en la amplitud máxima de las ondas de cuerpo con periodos cercanos a 1,0 segundo.
- **Magnitud Richter  $M$** : Magnitud medida en la escala establecida por Ch. Richter en 1933, llamada también magnitud local  $M_L$ . **Richter y Gutenberg (1935)**.

En las investigaciones de peligrosidad Sismica las magnitudes deben expresarse en una escala única. Se debe uniformizar las escalas con la relación empírica del tipo:

$$M_1 = a + b \cdot M_2$$

Donde  $M_1$  = Magnitud

$a, b$  = Parámetros de la amplitud y periodo

Aunque a veces se usan dependencias no lineales; de forma general

$$M_1 = f(M_2)$$

En los últimos años se ha generalizado el uso de la  $M_w$  para las fórmulas de atenuación de los parámetros del movimiento del terreno. Es necesario transformar las magnitudes a  $M_w$ .

$(m_b, M_s) \rightarrow M_w$  - formulas globales

$(M_L, M_D) \rightarrow M_w$  - formulas locales

Para la magnitud, es muy importante recopilarlas todas y analizarlas detenidamente.



### ESCALAS DE MAGNITUD

Magnitud Escala de Richter	Efectos Del Terremoto
Menos de 3.5	Usualmente no se siente, pero los sensores registran
3.5 - 5.4	Se siente, los daños generalmente son leves
5.5 - 6.0	Ocasiona pequeños daños a las construcciones.
6.1 - 6.9	Ocasionan fuertes daños, en zonas pobladas y suelos malos.
7.0 - 7.9	Sismo mayor. Se presentan graves daños
8.0 o mayor	Gran terremoto. Destrucción general de las construcciones.

*Tabla N° 01. Magnitud en la escala de Richter.*

Esta escala es la más adecuada para los sismos continentales de la región del cusco, debido a que registra hasta una magnitud de 7 Mb. En forma clara y sin saturarse.

#### **2.2.3. INTENSIDAD SISMICA**

Es el grado de destrucción y violencia con que se siente un sismo está en función de la atenuación de las ondas sísmicas. Se caracteriza por el daño producido a las viviendas, y habitantes. Su intensidad está en función a la distancia del hipocentro, calidad de diseño, suelos y del lugar que ocupan las personas (en los edificios varía de acuerdo al número de pisos, etc.)

La Intensidad es un indicativo subjetivo de los desastres y está en función de la naturaleza del suelo, la exposición de las construcciones y la longitud al hipocentro. La Escala Mercalli Modificada (MM), es la más adecuada para los andes peruanos, desde 1961 la escala modificada de Mercalli es la que se adecuada para los Andes Peruanos. Esta escala tiene 12 grados. Los desastres empiezan generalmente del grado VI.





**- Escalas de Intensidad.**

Hay varias escalas para medir la intensidad sísmica. La más adecuada para nuestra región es del italiano G. Mercalli se basó en trabajos anteriores para definir su escala. La modificada tiene 12 grados de intensidad, se usa en el territorio peruano.

La Intensidad varía en función de la ubicación para un mismo sismo, está en función a la atenuación de las ondas sísmicas y dependerá de:

- La cantidad de energía que posee el sismo.
- La distancia al espejo de falla que libero las ondas sísmicas.
- La dirección de las ondas sísmicas, que arriban a la zona donde se registra (oblicua, perpendicular)
- Las condiciones geológicas y nivel freático donde se registra la Intensidad
- Cómo la comunidad sintió el sismo y las huellas que dejo el sismo.

**ESCALA DE INTENSIDADES DE MERCALLI MODIFICADA**

I	Nadie lo siente, solo detecta los instrumentos sísmicos.
II	Sentido por unas cuantas personas, las que están en reposo
III	Notado por algunos, se capta en el interior de los edificios
IV	Sentidos por muchos, algunos lo captan en el exterior
V	Sentidos por casi todos, la gente se despierta y se caen algunos objetos inestables.
VI	Sentidos por todos, la población sale de sus viviendas, se quiebran los vidrios y aparecen grietas en los muros.
VII	Todos salen al exterior; se observan daños considerables en las viviendas de adobe y daños menores en los edificios de concreto.
VIII	Daños ligeros en estructuras sismoresistentes, colapsan las de adobe
IX	Todos los edificios resultan con daños severos, aberturas en el piso, pánico general.
X	Las vigas y columnas sismoresistente son afectadas, el piso muy fracturado
XI	Las vigas y columnas sismoresistentes fallan, aparecen grietas, se destruyen las cañerías subterráneas, casi nada queda en pie.

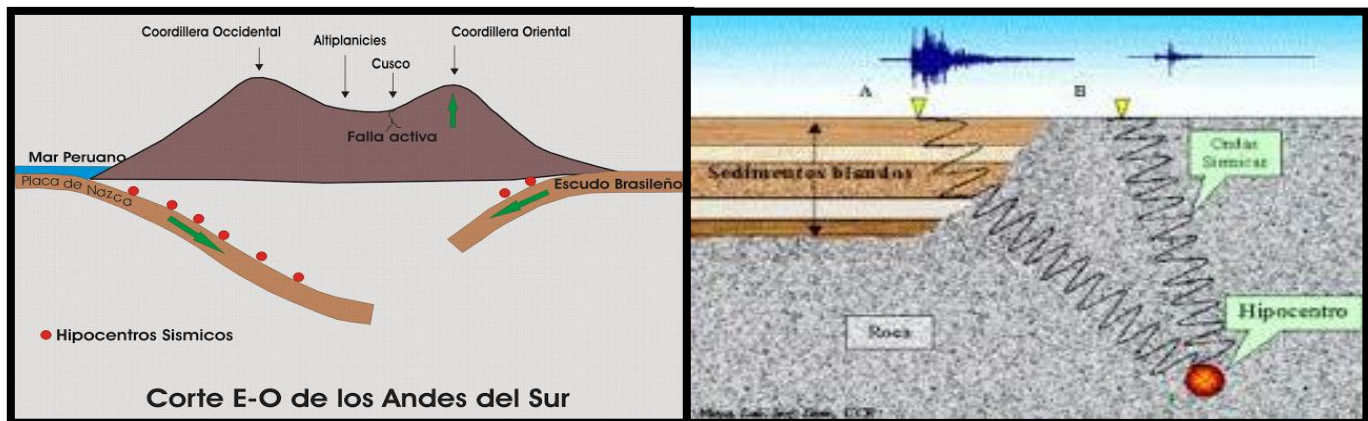
XII

Caos total, las ondas superficiales afectaron totalmente, todas las cosas se derriban totalmente, catástrofe.

*Tabla N° 02. Escala de intensidades de Mercalli modificada.*

#### 2.2.4. FUENTE SISMOGENICA.

La fuente sismogénica es aquel volumen, área o línea geográfica que presenta similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, a tal punto que puede asegurarse que su potencial sísmico es homogéneo en toda la fuente, es necesario distinguir su geometría, su magnitud mínima y máxima. En la subcuenca del Cusco la principal fuente sismogénica son el sistema de fallas Cusco muy cercanas a la ciudad del Cusco. Es importante realizar trabajos de investigación para caracterizar el sistema de fallas Cusco. Este sistema de fallas actualmente se viene estudiando para caracterizar su actividad Sismica a lo largo de la falla, especialmente la falla Cusco, Tambomachay, Pachatusan, Qoricocha, Chincheros, Tamboray las que más afectarían a la ciudad imperial por sus longitudes y cercanía.

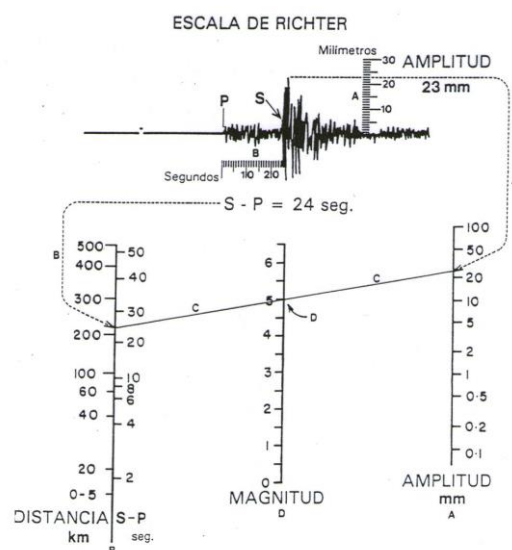
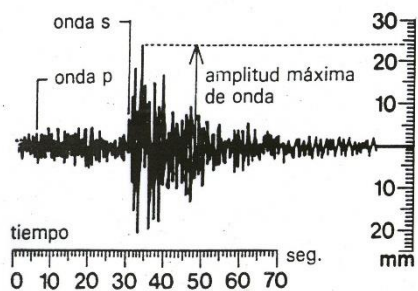


*Figura N° 01. Fuente sismogénica*

#### 2.2.5. CATÁLOGO SÍSMICO UNIFORME PARA LA REGION CUSCO.

El catálogo sísmico se procesó de los sismogramas del Instituto Geofísico del Perú, servicio de geología de los Estados Unidos, en algunos casos verificando el lugar de mayor afectación.

Sismograma para conocer el comportamiento de llegada de las ondas sísmicas.



El catálogo sísmico con fines de investigación de peligrosidad Sismica deben estar en la misma escala, es decir convertirlos a las magnitudes más adecuadas con un largo intervalo temporal y una magnitud mínima no muy baja; los sismos en la región del Cusco se caracterizan por ser superficiales. El catálogo sísmico tiene por lo general los siguientes datos:

- Fecha y hora de origen
- Coordenadas epicentrales
- Profundidad
- Magnitud
- Intensidad
- Otros efectos
- Error en las determinaciones

La **magnitud** es la cantidad de energía que se libera en el hipocentro, es registrada por los sensores de un sismógrafo; la **magnitud** no cambia con la distancia del epicentro. La escala de magnitud más reconocida en nuestro país es la RICHTER, esta escala registra hasta una magnitud de 7 Mb la cual es suficiente para los sismos continentales. La escala



RICHTER es logarítmica es decir un sismo de magnitud 5 a 6 la energía liberada es 30 veces más.

La *intensidad* es el grado de destrucción y es subjetiva, de acuerdo a la distancia del epicentro por la atenuación de las ondas elásticas. La **ESCALA MODIFICADA DE MERCALI (MM)**. Es la más adecuada para los Andes.

El 31 de marzo de 1650, un terremoto de magnitud 6.5 derribó templos, conventos y edificaciones de casi toda la ciudad del Cusco; además, se produjeron grandes deslizamientos en Pisac, aparecieron grietas en varios lugares, y se alteró las aguas subterráneas y superficiales cerca al Pueblo de Oropesa (Silgado, 1978).

El 21 de mayo de 1950, un terremoto de magnitud instrumental 6.5 con una profundidad focal de 9 km la fuente sismogénica fue el sistema de fallas Cusco, dañó seriamente más de la mitad de las edificaciones en la ciudad del Cusco, el área epicentral cubría alrededor de 12km<sup>2</sup> dentro del valle del Cusco, murieron 120 personas y 275 fueron heridas.

“El terremoto fue de origen tectónico, observaciones posteriores narran que el lado Sur del valle del Cusco, al SE del pueblo de San Sebastián se observaba una longitud de 10 a 50 km con intensa fisuración, las grietas eran de forma irregular, su apertura variaba de centímetros a metros, y las alturas medían hasta 2 m como máximo” (INGEMMET - Silgado, 1974).

Como se observa los registros sísmicos histórico e instrumental de la región de Cusco, reflejan una sismicidad baja debido a la escasez de datos; sin embargo, la distribución geográfica de los epicentros registrados, muestra hacia el sector sureste de la región una tendencia se sismos de magnitud moderada, con profundidades de entre 10 a 30 km, por estas características son clasificados como sismos continentales, generados por la reactivación de las fallas geológicas activas que se hallan distribuidas en el altiplano y algunas muy cerca de la cordillera oriental.

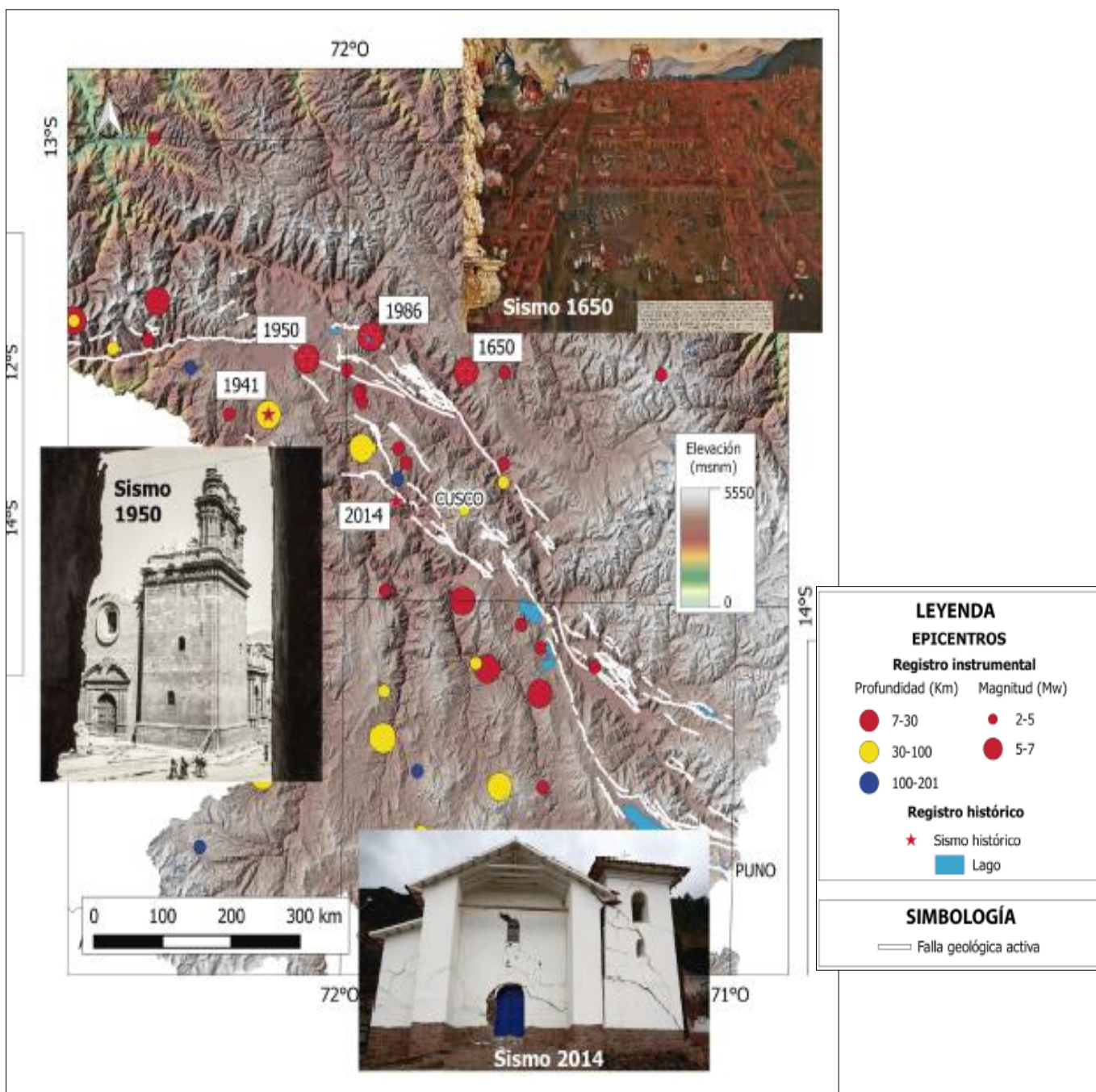


Figura N° 02. Mapa de epicentros de los sismos históricos e instrumentales ocurridos en la región del Cusco, información tomada de Silgado (1978).



### 2.3. DEFINICIONES DE TÉRMINOS

**Sismo.** - Los sismos pueden ser naturales y artificiales; los movimientos vibratorios intensos se pueden considerar como terremotos, también conocidos como macrosismos y se caracterizan por la fricción en el espejo de falla.

**Ondas P.-** también conocidas como ondas primarias, son ondas internas porque atraviesan toda la estructura de la tierra y son las primeras en llegar a los sismógrafos, son análogas a las ondas sonoras, se comprimen y dilatan en su trayectoria, en roca pueden alcanzar velocidad promedio de 6 a 7 km/seg.

**Ondas S.-** Son más conocidas como ondas de corte, son las segundas en llegar a los sismógrafos y son transversales a la dirección de propagación, son los responsables de las destrucciones, no atraviesan los medios líquidos, en roca pueden alcanzar velocidades promedio de 4 a 5 km/seg.

**Ondas superficiales.** – Estas ondas aparecen en la superficie entre el contacto del suelo con la atmosfera y disminuyen exponencialmente con la profundidad; son de dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Las ondas Rayleigh son de periodo largo y producen en las partículas afectadas, movimientos elípticos sobre planos verticales y en sentido opuesto a la dirección de propagación.

Las ondas Love solo se producen en estratos rocosos, caracterizados por una baja velocidad de propagación.

**Peligro Sísmico:** “Es la Probabilidad de que un fenómeno sísmico, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014)

**Sismógrafo:** Es un sensor, están diseñados en base a péndulos, estos equipos se encuentran conectados a las computadoras y permiten analizar los sismos en tiempo real. Registra la amplitud de las oscilaciones del sismo.

**Fuente Sismogénica.** – La fuente sismogénica es el espacio geográfico que presenta similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, a tal punto que puede asegurarse que su potencial sísmico es homogéneo en toda la fuente, se ha determinado 20 fuentes sismogénicas para el territorio peruano.



**Catalogo Sísmico.** – Es un registro de datos sísmicos históricos, sismicidad instrumental e historia, en una misma magnitud.

**Sismicidad.** - Distribución geográfica de los terremotos y de sus efectos

**Microtrépidaciones:** Vibraciones ambientales de baja magnitud, conformada por ondas sísmicas internas y superficiales.

**Amplificación sísmica:** Se caracteriza su presencia en estratos inconsolidados y suelos tipo S3 suelos blando flexibles con velocidades de las ondas de corte  $V_s$  menor a 180 m/seg. Y suelos tipo S4 muy desfavorables. Varía de acuerdo a las características del suelo, espesor del suelos y nivel freático.

**Efecto de Sitio:** Es la amplificación del movimiento sísmico en áreas de condiciones geológicas superficiales muy desfavorables, se presenta zonas con presencia de arenas y nivel freático casi superficial, tienen un comportamiento débil frente a la vibración inducida por las ondas sísmicas.

**Resiliencia:** “Capacidad de la población y sus medios de vida, para asimilar, absorber, adaptarse, cambiar, resistir y recuperarse, del impacto de un peligro sísmico, los desastres pasados deben servir para protegerse mejor en el futuro” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014)

**Riesgo sísmico:** Es el grado de pérdidas, esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen a la acción sísmica. Es la relación de Peligro sísmico más vulnerabilidad más costo

**Vulnerabilidad sísmica:** Efecto combinado de sismos y respuesta de las estructuras de sufrir daños asociado a las características estructurales de diseño.

**Intensidad sísmica:** Es la afectación en un sismo en la zona destruida.

**Magnitud sísmica:** La magnitud es la liberación de las ondas sísmicas y calor en un sismo. Se registran mediante los sismógrafos y acelerógrafos. En cualquier lugar del mundo la magnitud debe ser igual.

**Escala de Mercalli Modificada (MM):** Ideada por Giuseppe Mercalli. Es una medida cualitativa, de acuerdo a la intensidad de destrucción sentida por las personas. (INTENSIDAD = EFECTO)

**Primera respuesta:** “Es la primera intervención, de INDECI y las fuerzas armadas, en la zona afectada por una emergencia o desastre, con la finalidad de salvar vidas humanas” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014).



**Cuenca:** es una depresión en la superficie, un valle rodeado de alturas. La «**cuenca hidrográfica**» tiene mayor amplitud, desde la naciente hasta el final y fluyen hacia un mismo río.

**Subcuenca:** Son los afluentes que desembocan al río principal. La ciudad del Cusco se encuentra dentro una subcuenca.

**Acuífero:** Formaciones geológicas, capaz de almacenar y permitir la circulación del agua subterránea en sus poros o grietas, en cantidades económicamente rentables, gravas.

## 2.4.VARIABLES DE ESTUDIO

Se refiere a una característica medible en una unidad de estudio, Siendo la variable principal **peligro sísmico** en la Subcuenca del Cusco, en base a los eventos sísmicos generados por las Fallas Geológicas aledaños a la ciudad del Cusco, por tanto, la variable implicada es:

➤ **Peligro Sísmico.**

### **DIMENSIONES.**

#### **a. Peligro Sísmico Determinístico**

##### **Indicadores:**

- ✓ Caracterización de la Fuente Sismogénica
- ✓ Radio entre las fallas Geológicas y la ciudad
- ✓ Magnitudes generadas por la fuente sismogénica
- ✓ Aceleración Pico.

#### **b. Peligro Sísmico Probabilístico**

##### **Indicadores:**

- ✓ Determinar el estilo Tectónico de la fuente sismogénica.
- ✓ Catalogo Sísmico, homogeneidad y recurrencia
- ✓ Leyes de Atenuación Sísmica.
- ✓ Espectro de Peligro Uniforme.

#### **c. Microzonificación Sísmica**

- Periodo fundamental de los suelos.
- Frecuencia de vibración de los suelos
- Amplificaciones sísmicas
- Mapa de Isoperiodos de los suelos.





<b>OPERACIONALIZACION DE VARIABLES: Es traducir la variable a indicadores</b>			
<b>VARIABLES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>ESCALA DE MEDICION</b>
<p><b>PELIGRO SÍSMICO</b> Probabilidad de que un fenómeno sísmico, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos.</p>	<p>Peligro Sísmico Determinístico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterización de la Fuente Sismogénica</li> <li>• Radio entre las fallas geológicas y la ciudad</li> <li>• Magnitudes generadas por la fuente sismogénica</li> <li>• Aceleración Pico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo y longitud de las Fallas en km.</li> <li>• Distancia entre el epicentro y la ciudad en km.</li> <li>• Magnitud máxima.</li> <li>• Aceleración del suelo en gals, <math>\text{cm}/\text{seg}^2</math></li> </ul>
	<p>Peligro Sísmico Probabilístico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar el estilo Tectónico de la fuente sismogénica.</li> <li>• Catalogo Sísmico, homogeneidad y recurrencia</li> <li>• Leyes de Atenuación Sísmica.</li> <li>• Estimación de la probabilidad de ocurrencia, espectro de Peligro Uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mecanismos focales, tipos de fallas normales, inversas, rumbo y profundidades.</li> <li>• Magnitud Momento, Escala Richter, Ondas de Cuerpo.</li> <li>• Modelo de Sadigh et al (1997). Youngs et al. (1997).</li> <li>• Curvas de tasa de excedencia en Gals.</li> </ul>
	<p>Micro Zonificación Sísmica</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodo fundamental de los suelos.</li> <li>• Frecuencia de vibración de los suelos</li> <li>• Amplificaciones sísmicas</li> <li>• Mapa de Isoperiodos de los suelos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodo de los suelos en Segundos</li> <li>• Frecuencia de los suelos en Ciclos/Seg., Hertz</li> <li>• Ondas superficiales</li> <li>• Comparación de periodos predominantes de los suelos.</li> </ul>

Tabla N° 03. Operacionalización de variables



## **2.5. HIPOTESIS**

### **2.5.1. HIPÓTESIS GENERAL**

El análisis del Peligro Sísmico, proporcionara los espectros de peligro uniforme, tasa de excedencia, aceleraciones de los suelos de la ciudad, con los elementos expuestos en sus dimensiones social, física, económica, que servirán para diseñar las nuevas construcciones sismorresistentes en la ciudad del Cusco.

### **2.5.2. HIPÓTESIS ESPECIFICAS**

- a.** El análisis determinístico, nos brindara las intensidades máximas de los efectos de los terremotos que hubo en el pasado.
- b.** El análisis Probabilístico, nos proporcionara la probabilidad de recurrencia de los terremotos y el espectro de peligro uniforme.
- c.** La microzonificación Sísmica, mediante la técnica del cociente espectral horizontal/vertical (H/V), nos mostrara las características de los suelos a través del período natural fundamental del suelo.
- d.** Los lineamientos de Prevención y Mitigación de desastres, estarán en función de los resultados del análisis determinístico, probabilístico y microzonificación sísmica.



## CAPITULO III

### METODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DEL ESTUDIO

##### a. Enfoque

El enfoque que corresponde a la presente investigación por su naturaleza es Cuantitativa, cuyo propósito es hallar bases generales que expliquen el peligro sísmico a partir de los datos sísmicos y su comprobación.

##### b. Tipo de investigación

Es importante para explicar el tipo de investigación descriptiva, explicativa, propositiva o de propuesta dentro de la **Investigación Aplicada**. (busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad).

##### c. Diseño de la investigación

Es no experimental, con datos de las estaciones sismológicas y campo al 2019, sin la manipulación de la variable; según el análisis y alcance de los resultados se hará una descripción de la variable de estudio.

**Mo**: Donde **M** es la muestra de estudio y “**o**” son las observaciones de las variables de estudio, **Po** es la propuesta.

**Mo** —————> **Po**

Los datos son **NO PARAMETRICOS**, cabe resaltar que una prueba no paramétrica es una prueba de hipótesis que no requiere que la distribución de la población sea caracterizada por ciertos parámetros, muchas pruebas de hipótesis parten del supuesto de que la población sigue una distribución normal con los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ . estas no parten de este supuesto, y son muy útiles cuando los datos son no normales y resistentes a transformaciones.

#### 3.2. SECUENCIA DEL ESTUDIO

La presente investigación es la primera fase es de tipo histórica, es decir descriptivo y comparativo, tuvo varias secuencias, haciendo una recopilación y análisis de la bibliografía existente, salidas de campo, procesamiento de la información, se empleó 2 etapas marcadas:

**La primera etapa** conseguir trabajos y artículos de investigación de la peligrosidad sísmica en el territorio peruano y algunos trabajos en la región del Cusco, la mayor



información fue del del Instituto Geofísico del Perú (IGP), y del Centro de Información Nacional de Sismos (NEIC) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); y otros estudios de actualizaciones de datos sísmicos, los cuales se resumió y utilizo

**La segunda etapa**, salidas al centro histórico de la ciudad Imperial y zonas aledañas para conseguir los datos como los parámetros de evaluación, factores condicionantes y desencadenantes; procesarlos posteriormente con diversos softwares, elaboración de planos obteniendo el mapa de peligrosidad sísmica y el mapa de isoperiodos.

### 3.3. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La unidad de estudio son el conjunto los elementos que forman parte del espacio territorial de la subcuenca del Cusco, formaciones geológicas, fuente sismogénica, sistema de fallas Cusco, tipos de suelos, aguas subterráneas. la población de estudio se clasifica en:

- Fuente sismogénica; sistema de fallas Cusco.
- Tipos de suelos; Espectros de peligro uniforme
- Formaciones Geológicas
- Aguas Subterráneas.

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS

Las técnicas de muestreo se hicieron en base a un mapeo geológico y geotécnico, para la recolección de las muestras y puntos de observación; los instrumentos fueron calibrados por las instituciones científicas y empresas que venden los equipos utilizados, basados en la siguiente secuencia:

- Técnica de la observación, mediciones de campo
- Técnica documental, sismos históricos, fichas de registros sismográficos, fichas de registro, libreta de campo, validado científicamente por el Instituto Geofísico del Perú.
- Técnica de laboratorio, ensayos de mecánica de suelos.

### VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

La **validez** le otorga la confiabilidad y calibración al **instrumento** de medición para cuantificar de forma segura el resultado para el cual ha sido diseñado, la calibración y verificación del instrumento nos arrojará resultados reales con bajo grado de incertidumbre.



La empresa proveedora de los sensores calibra anualmente los sensores GURALP, los instrumentos para la toma de datos sismológicos tienen validez y confiabilidad de acuerdo a las normas tomadas IGP y el servicio de Geología de los Estados Unidos (USGS), considerando los aportes de los científicos Charles Richter y Mercalli. La ficha para la captura de datos se adjunta en apéndice.

#### **FICHA DE CATALOGO SISMICO.**

La ficha de catálogo sísmico, se recolecta los sismos que contiene la historia sísmica del área de estudio del año de 1650 al 2022 con un total de 77 sismos de diferentes magnitudes, como se muestra en la tabla N°12.

### **3.5. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Son las técnicas estadísticas con datos sísmicos temporales para deducir la magnitud máxima del sismo más probable que se puede dar en el futuro cercano, mediante una estadística descriptiva inferencial, considerando las escalas de medición del peligro sísmico, la estadística aplicada para el análisis de resultados es la descriptiva con la frecuencia de medidas de tendencia central.

Utilizando las técnicas adecuadas nos mostrara el análisis de los sismos históricos y los sismos que pudieran ocurrir en el futuro, se realizará mediante:

- Técnica cuantitativa, mediante procedimientos de una estadística descriptiva e inferencial
- Técnica cualitativa, teniendo como sustento los antecedentes de estudio, las bases teóricas de la escala de Richter, la escala modificada de Mercalli, etc.



## CAPITULO IV RESULTADOS

### 4.1 AREA Y LIMITES DEL LA SUBCUENCA DEL CUSCO

#### a. Ubicación Política:

La provincia del Cusco, está ubicada entre el altiplano y la cordillera oriental, tiene los siguientes distritos; (Plano 01):

- Distritos de Cusco, Santiago, Wánchaq, San Sebastián, San Jerónimo Poroy, Ccorca, Saylla.

#### b. Ubicación Geográfica:

La ciudad imperial se encuentra en la parte sur oriental del territorio peruano con las coordenadas UTM, siguientes:

**Norte:** 177274.21m E 8513460.47 m N

**Sur:** 165461.84m E 8488915.96 m N

**Este:** 157115.95m E 8494959.30 m N

**Oeste:** 196417.97m E 8504930.11 m N

Geográficamente la ciudad del Cusco, se encuentra dentro de la Cuenca Vilcanota, Subcuenca Cusco, cuyo centro de gravedad presenta las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud Sur: 13° 27' 45"

Longitud Oeste: 72° 10' 40"

Con un área de 497.01 km<sup>2</sup> (divortium aquarium)

#### c. Ubicación Hidrográfica:

Jerárquicamente se denomina Cuenca del Vilcanota, subcuenca del Cusco y consta de varias microcuencas, pertenece a la siguiente red hidrográfica:

- Cuenca del Vilcanota
- Desembocadura final en el atlántico

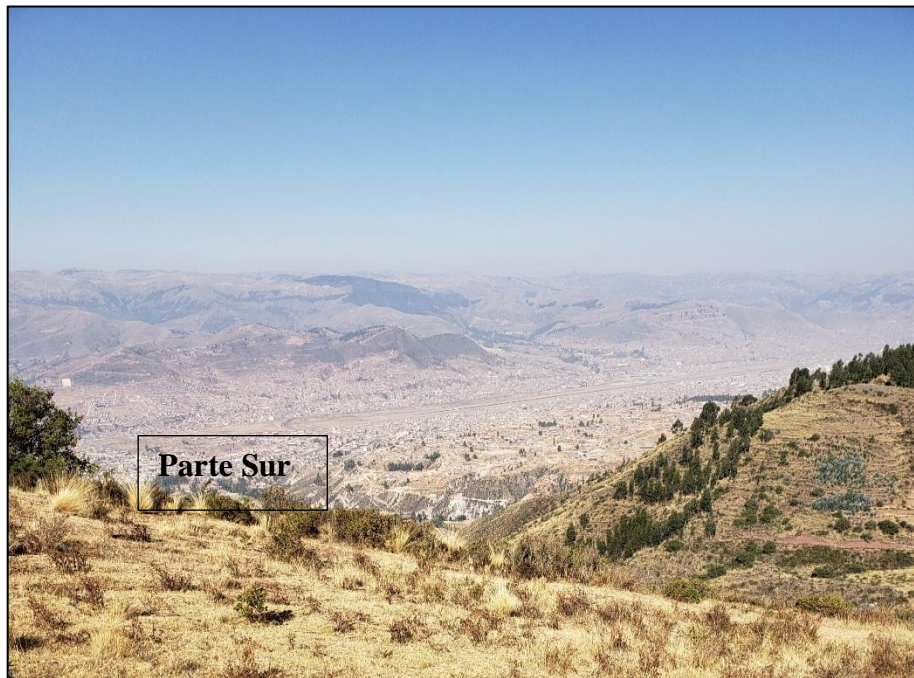


- subcuenca del Cusco tiene las siguientes microcuencas:
  - 1.- Microcuenca de Saphy: 20km<sup>2</sup>
  - 2.- Microcuenca Huancaro: 20km<sup>2</sup>
  - 3.- Valle del río Huatanay:
- Flanco Norte: 30km<sup>2</sup>

Comprende: Salineras, Aucalle, Acción Popular, Primero de Mayo, Norte De San Sebastián, Ticapata, Santa María, Larapa Grande, Larapa Chico, San Jerónimo, Angostura, Condebamba, Huasao.
- Flanco sur: 24km<sup>2</sup> (fotografía No 1)

Comprende: Viva el Perú, General Ollanta, Tancarpata, Quispiquilla, Pillao Matao, Petro Perú, Kayra, Saylla, Huasao, Oropesa y Lucre.

En total el área investigada o divortium aquarium suma aproximadamente 497km<sup>2</sup>.



*Fotografía N° 01. Vista panorámica del flanco sur de la Ciudad del Cusco.*

## 4.2 ANALISIS DE LA FUENTE SISMOGÉNICA Y EL SISTEMA DE FALLAS CUSCO.

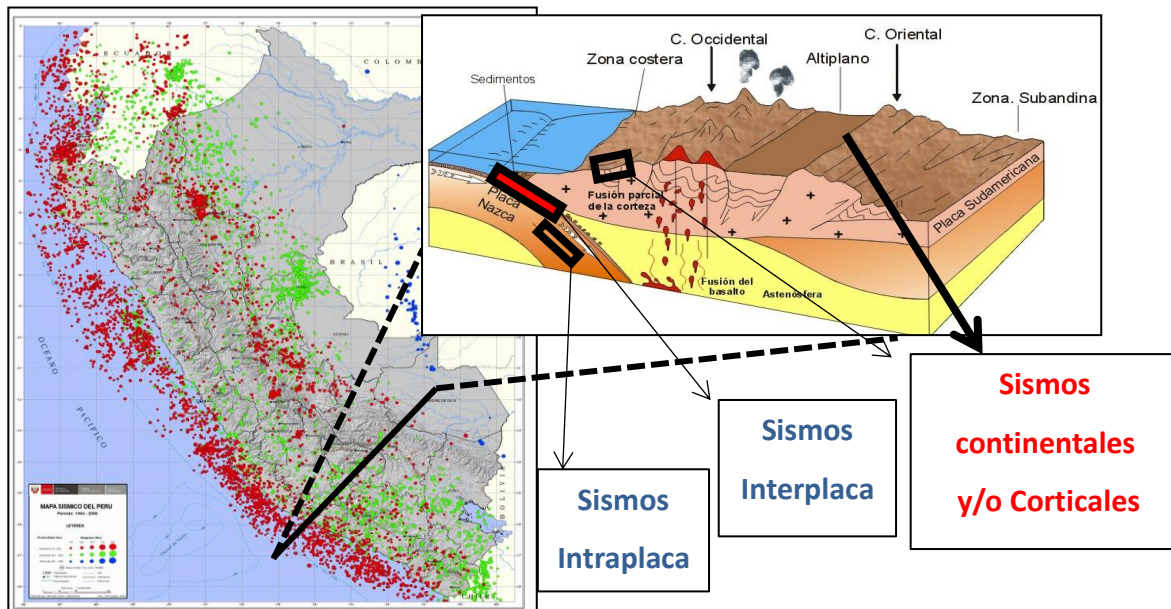


Figura N° 03. Sismos continentales de la Región Cusco.

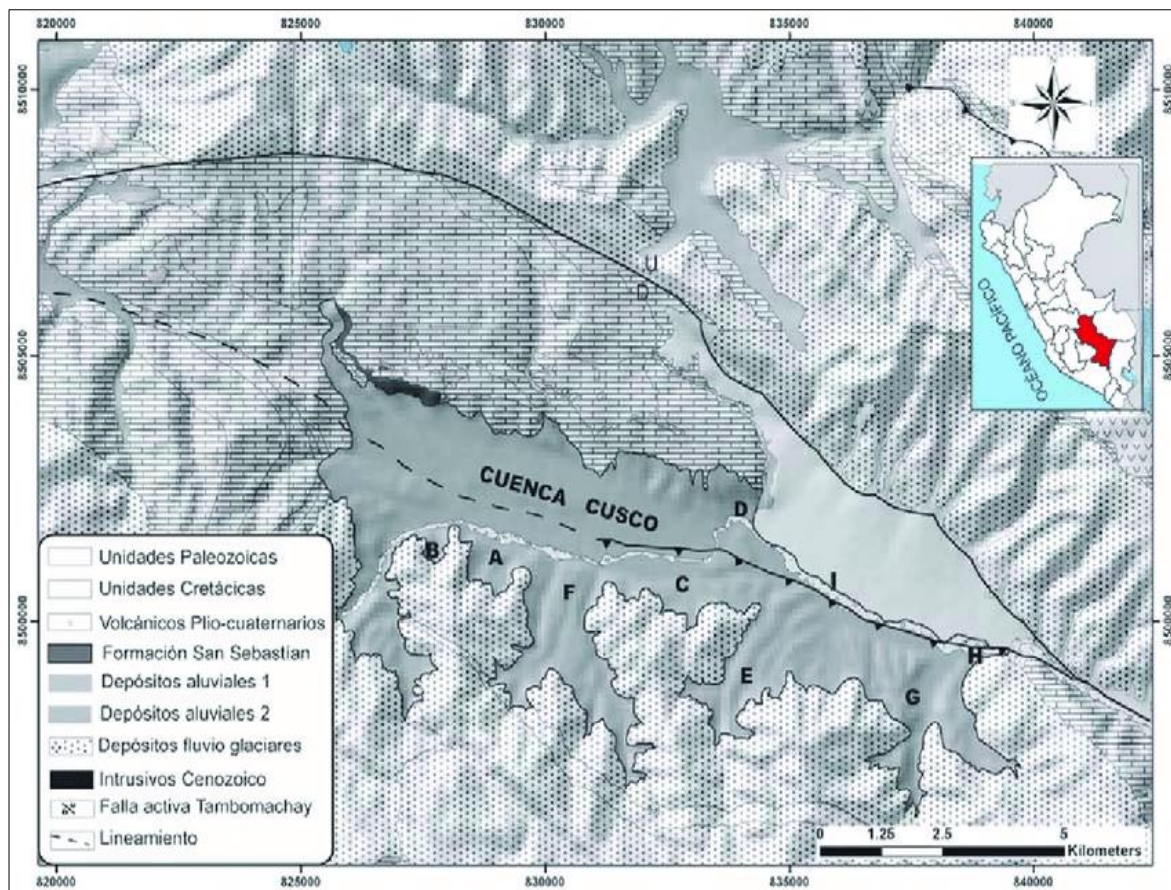


Figura N° 04. (Fuente- Sebrier-Cabrera (Sébrier, 1990))





#### 4.2.1. CONTEXTO NEOTECTONICO DEL CUSCO

El aparato andino está dentro de la placa Sudamericana, que colisiona frontalmente con la placa de Nazca con velocidades del orden de 6 cm/año. (IGP, 29 Fuentes Sismogenicas, 2015) Siendo la subducción la principal fuente sismogénica del territorio peruano. La región del Cusco se encuentra en los Andes peruanos, siendo la fuente sismogénica el sistema de falla Cusco, activas por el reajuste del aparato andino; Los sismos son cíclicos y no podremos evitarlos, los sismos se presentarán en cualquier momento.

Los sismos en la región del Cusco son continentales, se caracterizan por ser de gran intensidad, magnitud moderada y se atenúan rápidamente, debido a que las ondas sísmicas se convierten en calor en los macizos rocosos de la cordillera. La ocurrencia de sismos es sinónimo de vida, es decir, la Tierra es dinámicamente activa. El día que no ocurran sismos, sería el inicio de un gran desastre a nivel mundial.

“La subcuenca del Cusco, se encuentra dentro del sistema de fallas Cusco, las que provocaron terremotos desastrosos desde tiempos pasados, han sido estudiadas por Cabrera (1984). Estas fallas han controlado la evolución tectónica y sedimentaria pliocuaternaria de la región y particularmente de las cuencas Cusco y Ccatca. Las fallas activas se hallan en el límite Altiplano-Cordillera Oriental, estas fallas han sido divididas en dos sectores” (Carlotto, 2002).

El sistema de fallas Cusco y sistema de fallas Vilcanota (Cabrera, 1988). Dentro del sistema Cusco se han reconocido las fallas, Tambomachay, probable falla Cusco, Chincheros, Qoricocha, Pachatusan y Tamboray, está caracterizada por una importante actividad sísmica cortical, la que está relacionada a los sistemas de fallas activas. “Hasta hace algún tiempo se consideraba como activa una falla que había experimentado una o varias reactivaciones holocenas, es decir, en los últimos 10,000 años” (Benavente C., Delgado F., Taipe M., Audin L., Pari W., 2013).

Sin embargo, ahora se considera falla activa, aquella que ha tenido juegos durante el Cuaternario, es decir desde hace 2.5 Ma y que potencialmente se va a reactivar en el futuro. Siendo las más cercanas y las que causarían daños a la ciudad del Cusco las siguientes:



Figura N° 05. Sistema de fallas Cusco (fuente CENEPRED-SIGRID)

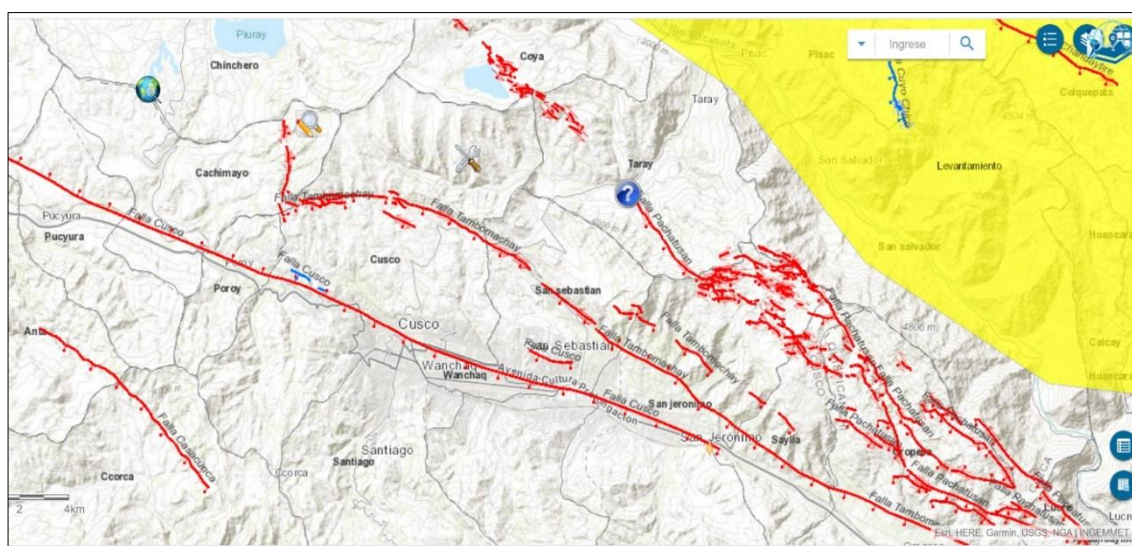


Figura N° 06. Sistema de fallas Cusco (fuente INGEMMET)

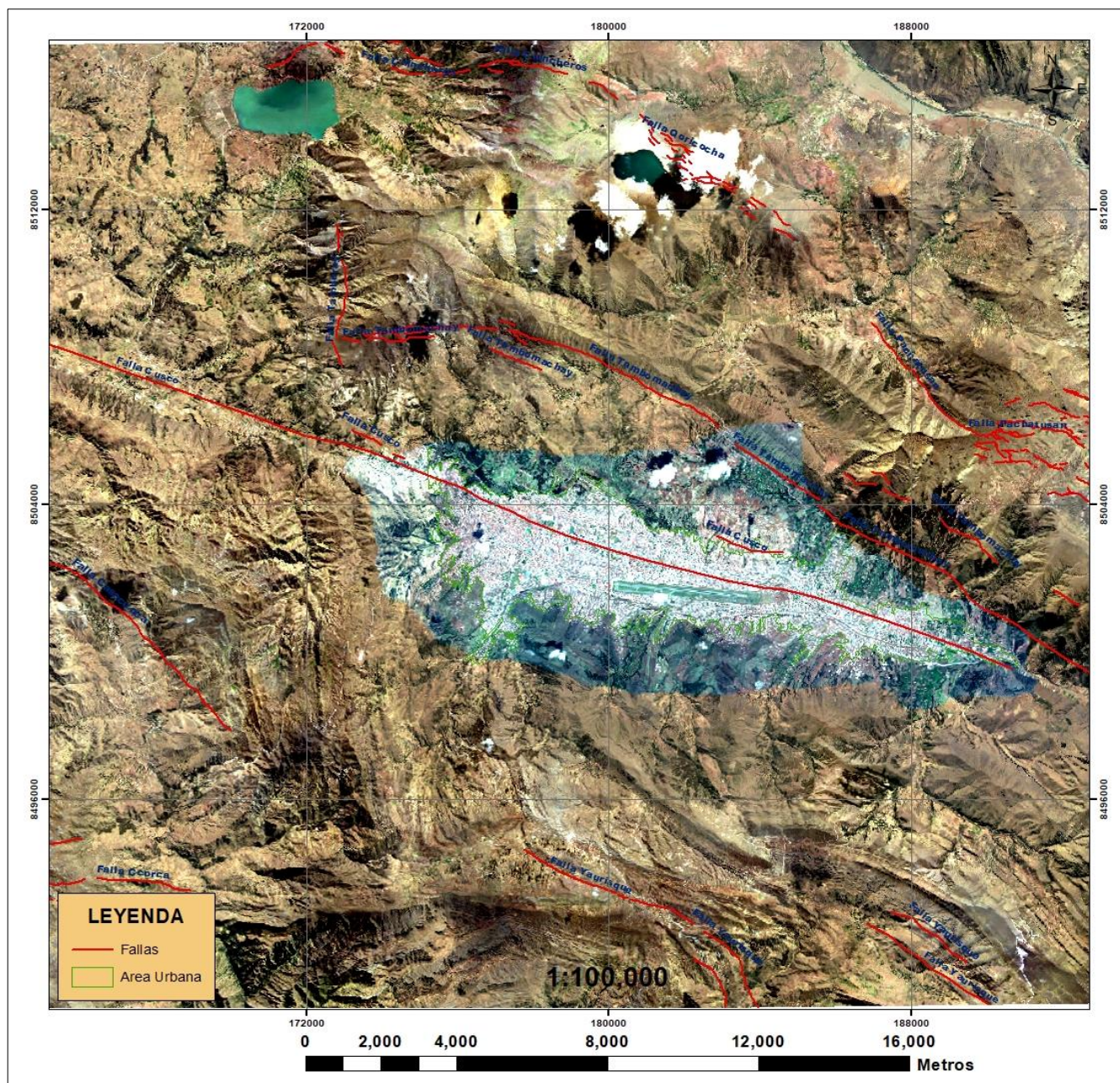


Figura N° 07. Fallas Neotectónicas de la ciudad del Cusco. Fuente: Google map



### 1. Falla de Tambomachay:

<b>Tipo de falla</b>	Fallas normales, inversas y flexuras.
<b>Buzamiento</b>	55° a 70 °
<b>Altura máxima de escarpe</b>	600 m.
<b>Longitud de la falla</b>	22 km.
<b>Tipo de deposito</b>	Aluviales.
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	Grupo Yuncaypata - Grupo San Jerónimo.
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	5.2km

Tabla N° 04. Falla de Tambomachay.

Se Falla geológica se encuentra en la parte norte de la ciudad del Cusco. “Con un rumbo de N 120° E a lo largo de 22 kilómetros, separa la meseta de Sacsayhuamán de las Montañas del Cusco, pone en contacto las formaciones del Grupo Yuncaypata (Cretácico) con las del Grupo San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno)” (Carlotto, 2002) . Limitando una cuenca rellena por depósitos fluviales y lacustres del Cuaternario.

Es la estructura de mayor dimensión que se orienta en la dirección NW-SE en su origen fue falla inversa poniendo contacto el grupo san jerónimo (piso) con la formación yuncaypata (techo) posteriormente (fines del Terciario y cuaternario) ha jugado en una falla transcurrete (falla rumbo) dando lugar a la abertura de la subcuenca el Cusco, actualmente se comporta como una falla normal debido a la alta topografía, se encuentra aproximadamente a 5.2 km. al norte de la ciudad del Cusco.



Figura N° 08. Desplazamiento de la falla evidenciado por las flechas rojas en el escarpe



## 2. Probable falla Cusco

<b>Tipo de falla</b>	Ultima activación de tipo normal.
<b>Buzamiento/ Rb</b>	62°suroeste / N128°E
<b>Altura máxima de escarpe</b>	3m.
<b>Longitud de la falla</b>	25 km.
<b>Tipo de deposito</b>	Fluvial / Lacustre
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	formación San Sebastián formación Maras
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	1km

*Tabla N° 05. Probable falla Cusco.*

La subcuenca del Cusco tiene una orientación noroeste-sureste, las imágenes satelitales de la microcuenca del río Huatanay muestran un lineamiento con la misma dirección, que se prolonga hasta Oropesa por el sur y la pampa de Anta por el norte.

La probable falla se ubica a lo largo del valle del Cusco, tiene una extensión de ~ 25 km con una dirección Noroeste-Sureste; finaliza en la parte noroeste en la localidad de Cachimayo, donde se aprecia el escarpe de falla cortando depósitos cuaternarios con un movimiento normal; en la parte Sureste termina cerca de la localidad de Oropesa, esta estructura parece conectarse con segmentos de la falla Tambomachay, la falla se halla deformando depósitos lacustres de la formación San Sebastián, evidenciando una actividad compresiva, en este sector la falla presenta un buzamiento promedio de 62° hacia el Suroeste.

El sismo de 1950 tuvo un origen tectónico, siendo la probable falla Cusco la que origino el terremoto del 21 de mayo de 1950, dañó más de un 50% los edificios del Cusco y ocasiono 394 víctimas entre muertos y heridos. En dicha falla no se aprecian escarpes, en el eje de la microcuenca del río Huatanay, se originó licuefacción teniendo en cuenta que el nivel freático de la microcuenca del río Huatanay es superficial. Se presume que esta estructura estaría sellada por los depósitos cuaternarios de la formación San Sebastián.

### 3. Falla Chincheros

<b>Tipo de falla</b>	tipo normal.
<b>Buzamiento/ Rb</b>	60°/70°suroeste
<b>Escarpe promedio</b>	40 m.
<b>Longitud de la falla</b>	10 km.
<b>Tipo de deposito</b>	Aluviales -lacustres
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	Formación Muñani – Quilque -Chilca
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	11km

Tabla N° 06. Falla de Chinchero.

Se encuentra ubicada 8 km en dirección norte de la Falla Tambomachay, se extiende con dirección este-oeste a lo largo de 10km. aproximadamente, está representada por escarpes discontinuos que presentan hasta 10 m de desplazamiento vertical acumulado, sus segmentos de falla se exhiben sobre los 3700 m y 4300 m (Benavente et al., 2013).

Se determinó su actividad holocena a partir de la identificación de depósitos coluviales en forma de cuñas al pie de los escarpes de falla; asimismo, observa que las fallas cortan depósitos de morrenas inconsolidados, terrazas aluviales recientes y suelo actual. El análisis cinemático de la falla indica movimientos de tipo normal con componente sinextral de los segmentos mayores, mientras los segmentos menores tienden a planos de fallas subverticales induciendo movimientos de tipo normal con buzamiento 60° y 70° al suroeste.



Figura N° 09. Escarpes falla de Chincheros (flechas rojas)- trincheras (rectángulos azules)  
(cabrera 1988)

#### 4. Falla Qoricocha

<b>Tipo de falla</b>	tipo normal.
<b>Buzamiento/ Rb</b>	60°/70°suroeste
<b>Escarpe promedio</b>	40m.
<b>Longitud de la falla</b>	6 km.
<b>Tipo de deposito</b>	Aluviales-lacustres-fluvio glaciares.
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	Puquín – Maras - kayra
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	9.0 km

Tabla N° 07. Falla de Qoricocha.

Se ubica al norte de la ciudad del Cusco, al borde de la Laguna Qoricocha, y es la prolongación sur de la falla Chincheros. Tiene una extensión de 6 km en dirección noroeste-sureste, sus escarpes se emplazan sobre los 4000 m y 4300 m. Sus movimientos son de tipo normal con un buzamiento 60° y 70° al suroeste.

“Esta estructura se reactivó en abril, a las 15:14 hora de Cuzco, ocurrió un fuerte sismo con una magnitud de 5.4 Mb, en la escala de Richter, con un Hipocentro de 13km de profundidad focal con ruptura de superficie promedio de 0.15 metros” ((Sébrier, 1990)

Tuvo una intensidad variable de IV, V, VI en la escala modificada de Mercalli, dentro de la ciudad del Cusco, causó la muerte de 7 personas, 80 heridos y 13,000 damnificados.

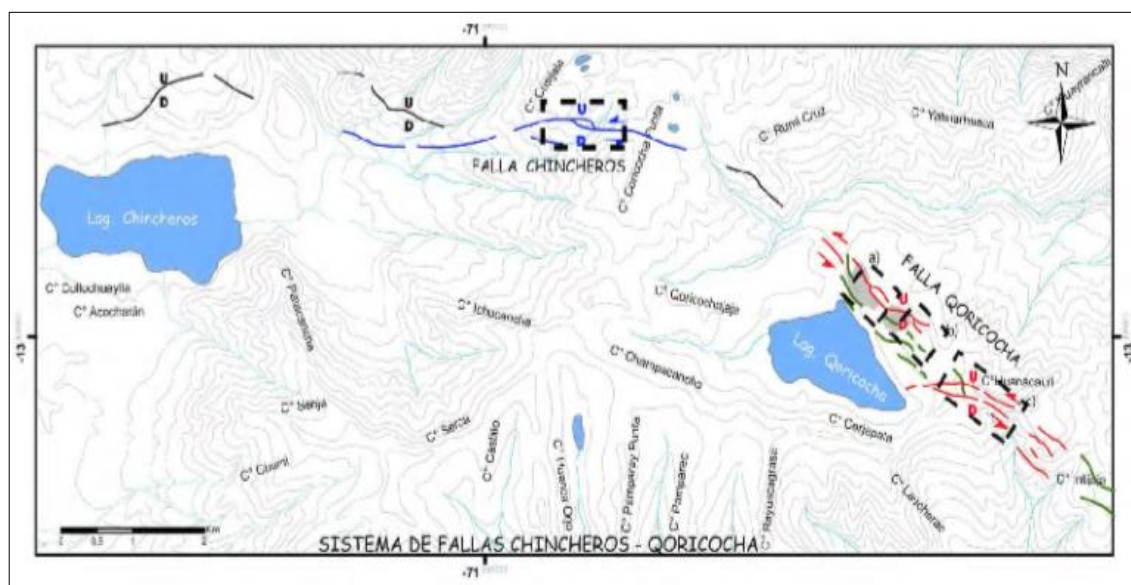


Figura N° 10. Desplazamiento de la falla de Qoricocha. INGEMMET



## 5. Falla Pachatusan

<b>Tipo de falla</b>	Ultima activación de tipo normal.
<b>Buzamiento/ Rb</b>	50°/70°suroeste
<b>Escarpe promedio</b>	6m.
<b>Longitud de la falla</b>	30 km.
<b>Tipo de deposito</b>	glaciares/fluvio glaciares
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	formación Rumicolca
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	10 km

Tabla N° 08. Falla de Pachatusan.

“Está representada por segmentos discontinuos y paralelos que se emplazan en un área de 21 kilómetros de largo por 3.5 kilómetros de ancho con dirección promedio N 130° E otros autores dicen que su extensión es de 30 Km., y en altitudes que varían entre 4100 y 4300 m.s.n.m. Se ubica al sureste de la ciudad del Cusco, aproximadamente a 5 kilómetros de distancia. Es considerada la prolongación sur de la Falla Qoricocha, presenta una orientación noroeste-sureste, se halla desplazando morrenas y depósitos cuaternarios con un buzamiento de 50° y 70° al suroeste” (Benavente C., Delgado F., Taipe M., Audin L., Pari W., 2013).



Fotografía N° 02. Escarpa principal de la falla Pachatusan. (Benavente, C. et. al. 2013).



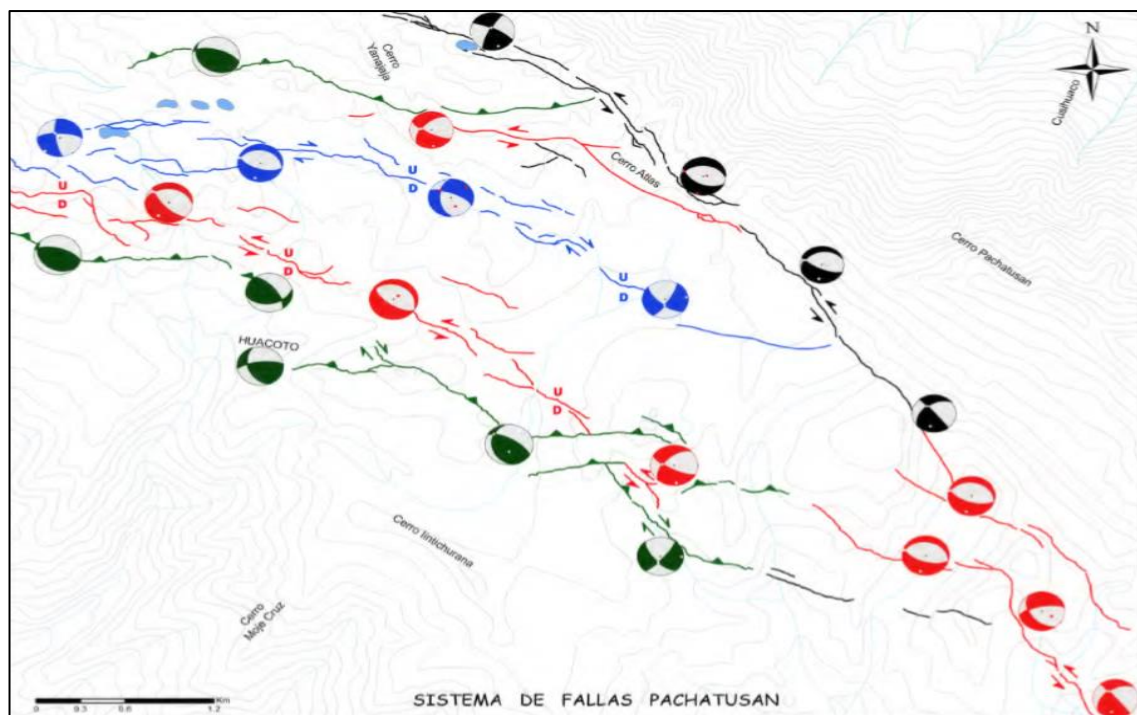


Figura N° 11. Control estructural del sistema de fallas Pachatusan ubicado al noreste de la ciudad del Cusco. INGEMMET

## 6. Falla Tamboray

<b>Tipo de falla</b>	tipo normal.
<b>Buzamiento/ Rb</b>	60-65°Nor-este
<b>Escarpe promedio</b>	3m.
<b>Longitud de la falla</b>	3,0 km.
<b>Tipo de deposito</b>	aluviales
<b>Formaciones que pone en contacto</b>	Formación Maras -San Sebastián
<b>Proximidad al cusco: (R)</b>	11km

Tabla N° 09. Falla de Tamboray.

Es la única Falla que tiene dirección N-S que se localiza en la parte norte, corta la falla de Tambomachay y separa la ladera baja de la ladera media. Se extiende en una longitud de 3.0 km a una altitud promedio de 4000 m. Esta falla es la más pequeña y tiene escarpes de 2 a 4 metros, que indica movimientos recientes. Al igual que las anteriores, se trata de una falla normal.



#### 4.2.2 ANALISIS DEL PELIGRO SISMICO DETERMINISTICO

El enfoque determinístico cuantifica el peligro considerando el sismo más destructivo que pueda ocurrir en el sitio, tomando en cuenta la historia sísmica pasada. El método Determinístico Busca determinar el valor máximo que puede alcanzar un parámetro sísmico. La evaluación del peligro sísmico por el método determinístico se desarrolla considerando un escenario sísmico específico para el área de estudio. Dicho escenario debe representar la generación de un evento sísmico característico en una fuente identificada y localizada a la menor distancia de la zona de estudio.

En el análisis del peligro sísmico determinístico se suele utilizar modelos matemáticos para definir el movimiento sísmico capaz de ser generado en la zona de estudio, los cuales deben ser iguales a los ocurridos anteriormente. Estos términos se mencionan y definen a continuación:

- A. Sismo Máximo Creíble (MCE):** Se utiliza el sismo más grande ocurrido en la fuente sismogénica producida, bajo condiciones sismo tectónicas conocidas.
- B. Sismo Máximo Probable (MPE):** Es el máximo sismo histórico registrado en la zona de estudio, se encontró la magnitud de 6.5 Mw.
- C. Sismo Base de Operación (OBE):** Es la magnitud máxima que podría ocurrir en un período de retorno de 300 años.

El sistema de fallas Cusco, es la principal fuente sismogénica considerada en el análisis, el Sismo Máximo se obtiene del catálogo sísmico (tabla N°12) y la información Neotectónica de la región. En ese sentido, se podría obtener la aceleración pico, en base a esta aceleración se debe realizar las obras de ingeniería en la ciudad del Cusco.

#### 4.2.3 FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS

Un análisis típico de peligro sísmico por el método determinístico puede ser descrito básicamente como un proceso de cuatro pasos que se describen a continuación:

1. Identificación y caracterización del sistema de fallas Cusco, generadora de los movimientos sísmicos significativos en el sitio de interés. La caracterización de la fuente incluye la definición de la geometría de cada fuente y su potencial sísmico.



2. Para el análisis de la peligrosidad determinística se midieron las longitudes de las fallas geológicas generadoras de los sismos y la distancia de la falla a la ciudad Imperial, así como el buzamiento de las fallas geológicas.
3. Los resultados de la peligrosidad sísmica muestran las aceleraciones pico o espectro uniforme de peligro que producirían las distintas fallas geológicas. Sus características son descritas por valores de la aceleración del suelo.

El resultado de la peligrosidad sísmica determinística es un valor cuantitativo obtenido mediante fórmulas matemáticas, estos resultados tienen un alto grado de incertidumbre debido a que se basa en sismos históricos algunos no fueron registrados, pero sirven como referencia para los geólogos, ingenieros Civiles y Arquitectos en sus obras de ingeniería.

#### 4.2.4 PELIGRO SÍSMICO DETERMINÍSTICO

Una de las formas de estimar el peligro sísmico es por el método determinístico, se fundamenta en que los terremotos que ocurrirán en el futuro serán muy similares a los que ocurrieron en el pasado, es decir, que en el futuro no se van a producir terremotos cuyo efecto en el emplazamiento sobrepase el de los ya observados. Además, se conoce que la sismicidad es estacionaria en el tiempo. Dicha expresión está dada por:

$$A = 224 * e^{0.823 * Ms} * (R + C(M))^{-1.56} \quad \dots\dots (1)$$

Donde:

- Ms: magnitud de onda superficiales.
- R: Distancia del hipocentro en km.
- C:  $0.864 e^{0.46 * Ms}$  .....(2)

La estimación de la magnitud de los sismos continentales producidos por la rotura de fallas superficiales se puede realizar utilizando la expresión de Steinmom (1982), para las fallas, la cual está expresada como:

$$Ms = 0.809 + 1.341 \text{ Log (L)}$$

Dónde:

- Ms: Magnitud de ondas superficiales.



- L: Longitud de rotura en metros.

La **aceleración sísmica** se refiere al espectro de respuesta o variación de la velocidad, es muy importante para el espectro de diseño de los ingenieros civiles. Estos resultados son determinantes para diseñar las estructuras de las construcciones siempre tomando en cuenta la norma peruana 030 sismoresistente; correlaciones de la escala modificada de Mercalli.

<u>Escala de Mercalli</u>	<u>Aceleración sísmica (g)</u>	<u>Velocidad sísmica (cm/s)</u>	<u>Percepción del temblor</u>	<u>Potencial de daño</u>
I	< 0.0017	< 0.1	No apreciable	Ninguno
II-III	0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	8.1 - 16	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	16 - 31	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 - 1.24	60 - 116	Violento	Fuerte
X+	> 1.24	> 116	Extremo	Muy fuerte

*Tabla N° 10. Correlación Aceleración con la Escala de Mercalli*

La aceleración Pico de un terremoto es primordial para los cálculos de ingeniería, y se utiliza para establecer normativas sísmicas y áreas de susceptibilidad al peligro alto. En un sismo, el daño a las estructuras está ligado a la aceleración Pico; la ciudad necesita de estudios de microzonificación sísmica para determinar los isoperiodos de los suelos, la aceleración pico nos daría una idea del grado de destrucción de la ciudad Imperial, por lo que es muy importante colocar acelerógrafos en puntos estratégicos de la ciudad Imperial.



## 4.2.5 EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO DETERMINÍSTICO DE LAS FALLAS MÁS CERCANAS A LA CIUDAD DE CUSCO

### 1. Falla Tambomachay

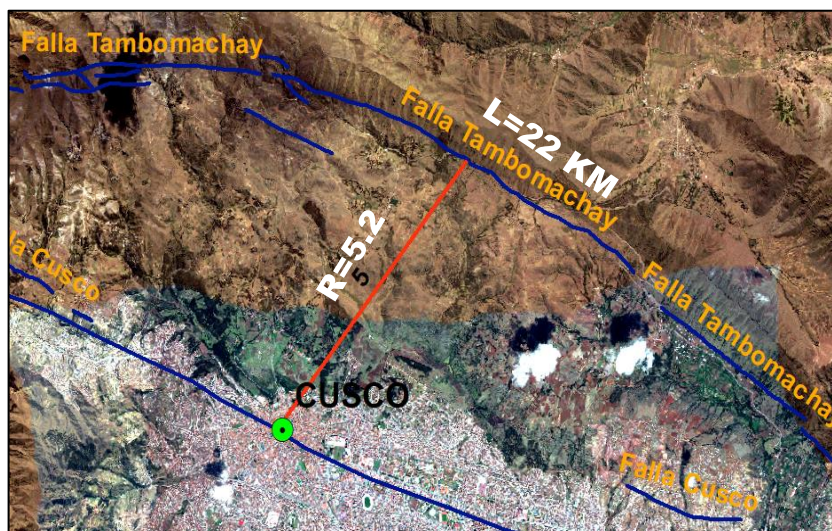


Figura N° 12. Falla Tambomachay, fuente: Google map

#### Método determinismo:

Longitud de la falla: 22 km R= 5.2 km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(22,000)$$

$$M_s = 6.71$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (6.71)}$$

$$C(M) = 18.92$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (6.71)} (5.2 + 18.92)^{-1.56}$$

$$A = 390 \frac{cm}{seg^2} = 0.39 \text{ Gal}$$

**Interpretación:** La aceleración es 0.39 gal, las construcciones en la ciudad del Cusco empiezan a sufrir daños de moderado a fuerte, con una intensidad de VIII en la escala modificada de Mercalli. (cuando es mayor a 0.25 gal las construcciones antiguas de adobe sufren daños).

	Aceleración	Veloc.	Percepción temblor	Daños
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a fuerte



## 2. Falla de Qoricocha

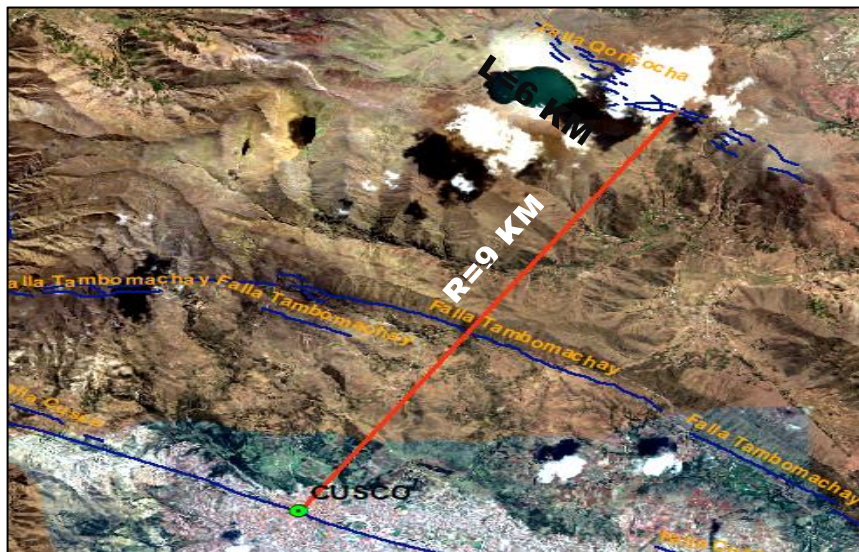


Figura N° 13. Falla Qoricocha, fuente: Google map

### Método determinismo:

Longitud de la falla: 6 km R= 9 km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (6,000)$$

$$M_s = 5.96$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (5.96)}$$

$$C(M) = 13.40$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (5.96)} (9 + 13.40)^{-1.56}$$

$$A = 237 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} = 0.24 \text{ Gals.}$$

**Interpretación:** La aceleración de la falla es 0.24 gals. Pequeños daños en las construcciones antiguas de adobe, solo las áreas cercanas a la falla sufrirán daños, como Patacancha y Corao. (cuando es mayor a 0.25 gal las construcciones comienzan a sufrir daños).



### 3. Probable Falla Cusco

#### Método determinismo:

Longitud de la falla: 25 km  $R= 1$  km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (25,000)$$

$$M_s = 6.79$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (6.79)}$$

$$C(M) = 19.63$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (6.79)} (1 + 19.63)^{-1.56}$$

$$A = 533 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} = \mathbf{0.54 \text{ gals}}$$

**Interpretación:** La aceleración aproximada es **0.54 gal**, esta posible falla no está del todo confirmada, no pueden hacerle cálculos exactos sobre su longitud, solamente se difiere; como está debajo de la subcuenca donde se encuentra la ciudad del Cusco; estas aceleraciones serian catastróficas, en las viviendas antiguas de adobe y las que se encuentran cerca de la falla Geológica. (cuando es mayor a 0.25 gals las construcciones comienzan a sufrir daños).



#### 4. Falla de Pachatusan

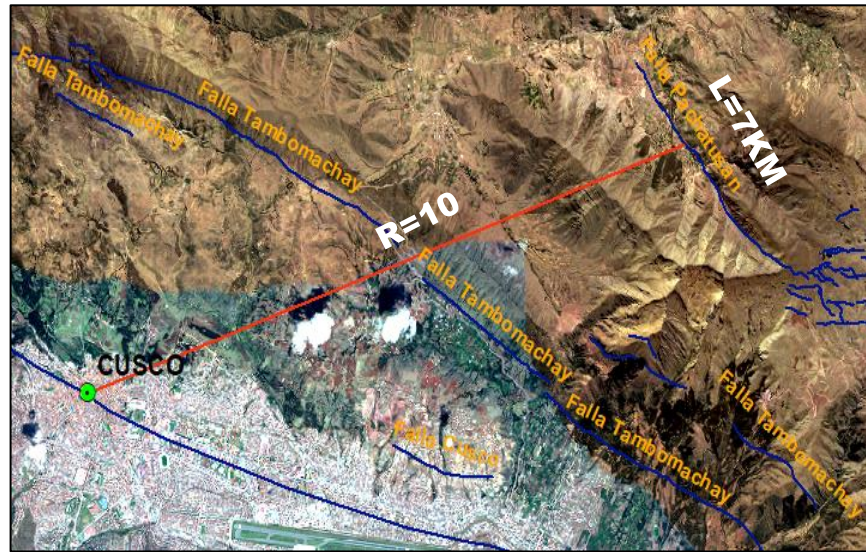


Figura N° 14. Falla Pachatusan, fuente: Google map

##### Método determinístico:

Longitud de la falla: 7 km R= 10 km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(7,000)$$

$$M_s = 6.05$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (6.05)}$$

$$C(M) = 13.97$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (6.05)} (10 + 13.97)^{-1.56}$$

$$A = 229 \frac{cm}{seg^2} = 0.23 gals$$

**Interpretación:** Al calcular con el método determinístico para roca sana, la aceleración es **0.23 gal**, produciría pequeñas destrucciones en la ciudad del Cusco, solamente donde el nivel freático es superficial. (cuando es mayor a 250gal las construcciones comienzan a sufrir daños.





## 5. Falla Chincheros

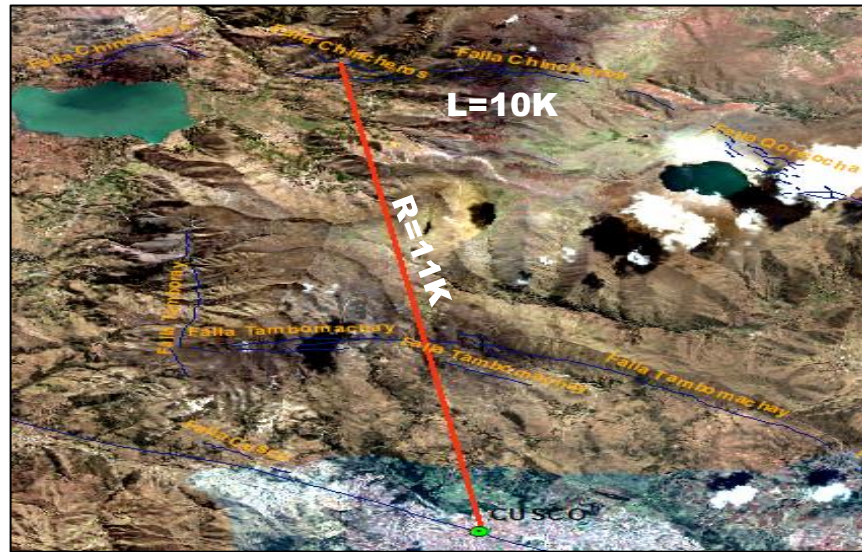


Figura N° 15. Falla Chincheros, fuente: Google map

### Método determinismo:

Longitud de la falla: 10 km R= 11 km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \text{Log} (10,000)$$

$$M_s = 6.25$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (6.25)}$$

$$C(M) = 15.31$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (6.25)} (11 + 15.31)^{-1.56}$$

$$A = 234 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} = 0.24 \text{ gal}$$

**Interpretación:** Esta falla produciría una aceleración de 0.24 gal. Causando una pequeña destrucción en el centro histórico en las construcciones antiguas de adobe por su cercanía. (cuando es mayor a 0.25gal las construcciones comienzan a sufrir daños).



## 6. Falla de Tamboray

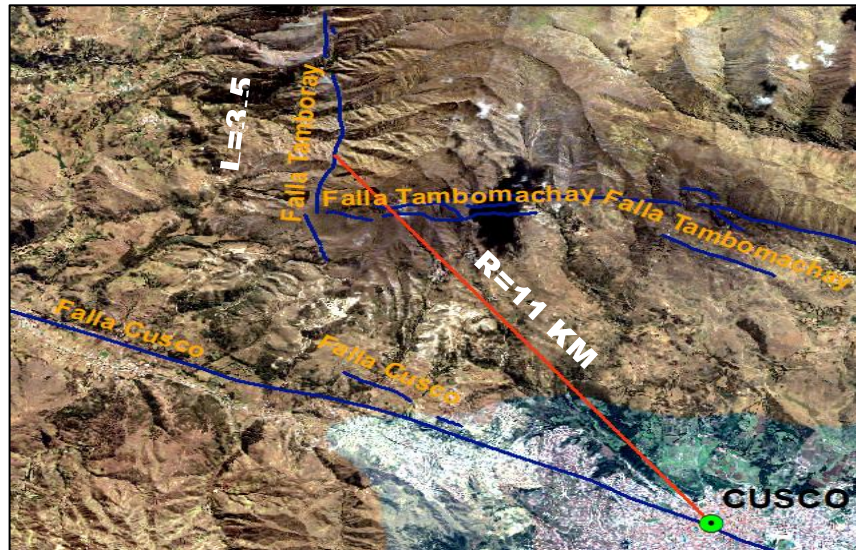


Figura N° 16. Falla Tamboray, Fuente: Google Map

### Método determinismo:

Longitud de la falla: 3.5 km R= 11 km.

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(L)$$

$$M_s = 0.89 + 1.341 \log(3,500)$$

$$M_s = 5.64$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 M_s}$$

$$C(M) = 0.864 e^{0.46 (5.64)}$$

$$C(M) = 11.57$$

$$A = 224 e^{0.823 M_s} (R + C(M))^{-1.56}$$

$$A = 224 e^{0.823 (5.64)} (11 + 11.57)^{-1.56}$$

$$A = 180 \frac{cm}{seg^2} = 0.18 gal$$

**Interpretación:** A=0.18 gal. (Cuando A>0.25 gal. las construcciones empiezan a sufrir daños, esto se considera para roca sana). Considerando para nuestro medio, afectaría en los lugares con nivel freático alto, en San Jerónimo, Saylla, Oropesa.



### 4.3 PELIGRO SISMICO PROBABILISTICO

Es el método más utilizado en la sismología por tener un menor grado de incertidumbre, para que funcione este método se deben tener datos registrados de unos 200 años, pero recién desde 1963 se registran los datos sísmicos, esta investigación se apoyó con los sismos históricos, los sismos ocurren cíclicamente en el tiempo; la peligrosidad está latente en las fuentes sismogénicas, en la región del Cusco se encuentra el sistema de fallas Cusco con probabilidades o frecuencias de ocurrencia. En esta investigación realizamos la elección de un modelo de cálculo de la peligrosidad sísmica apropiado para sismos continentales y su procesamiento se realizó en el software R-CRISIS- 2020. Los resultados se dan en términos probabilísticos (probabilidad de ocurrencia de un efecto en un intervalo temporal dado).

### 4.4.CATALOGO SÍSMICO UNIFORME

El catálogo, es un insumo para el análisis del peligro sísmico probabilístico, fue desarrollado en las mismas unidades, gran parte de los resultados del catálogo se procesó de los sismogramas del **Instituto Geofísico del Perú – IGP** y algunas agencias internacionales como el USGS, que determinan hipocentros y la magnitud de los terremotos históricos de la región, donde las magnitudes se han homogeneizado todos los datos están en magnitud de momento, deben estar en una misma unidad (igual magnitud), ser calculados con un mismo patrón y en igualdad de condiciones. El IGP tiene una Red Sísmica Nacional, consta de 31 estaciones (RSN); 20 estaciones son de Periodo Corto y 11 son de Banda Ancha, apropiada para el estudio de los sismos continentales de la región del Cusco. Actualmente esta red se ha modernizado y es vía satelital, el catalogo sismico esta compuesto por sismos historicos del año 1650 e instrumental del año 1960; este tiempo es muy corto para poder saber la evolucion de los sismos y magnitudes. Los datos del catálogo son de la fuente sismogénica y sus características litológicas, estructurales, de la subcuenca del Cusco

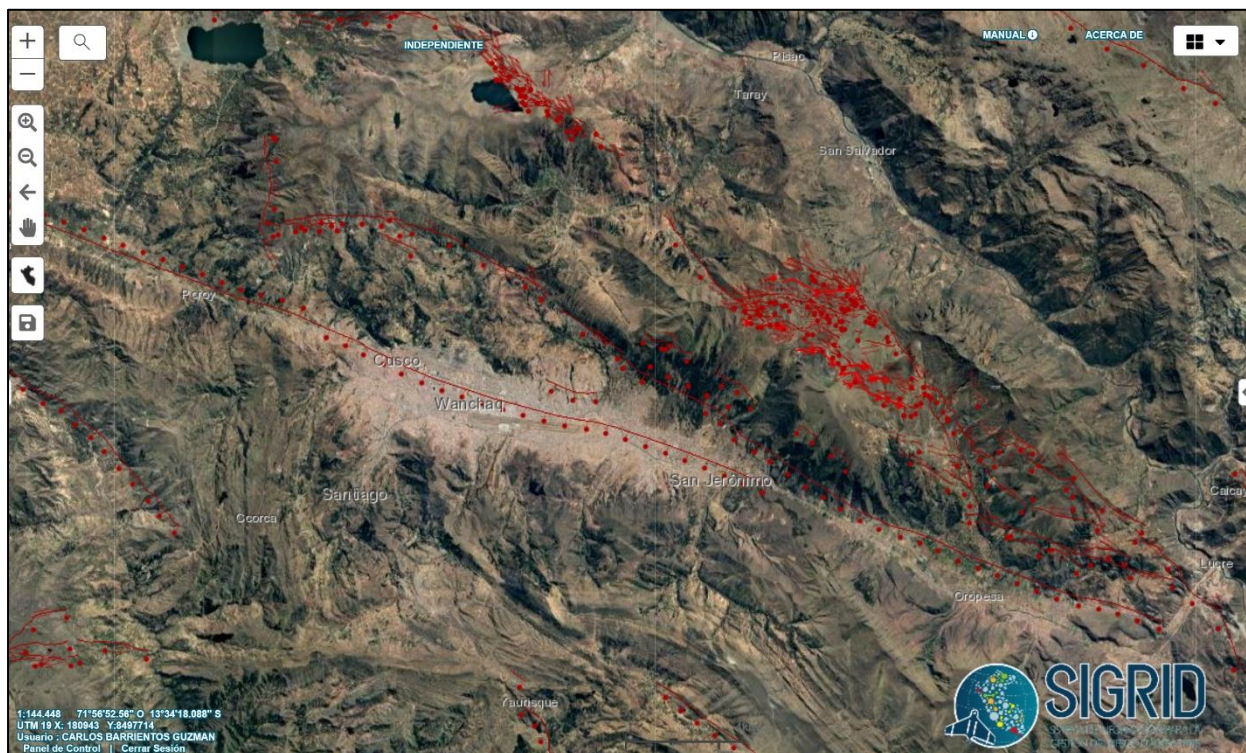


Figura N° 17. Área de los registros sísmicos fuente: SIGRID

#### 4.5. TRANSFORMACIÓN DE SISMOS HISTÓRICOS DE 1650 Y 1950 A MAGNITUD

Los relatos de los terremotos que ocurrieron en el antiguo Perú, datan desde la conquista española; es el relato de los efectos, de las pérdidas de vidas, junto con otras observaciones. “Lo agreste del territorio, la escasa densidad de la población, falta de medios de comunicación, las preocupaciones los conquistadores por su afianzamiento en estas nuevas tierras, todo ello unido a lo rudimentario de los conocimientos científicos de la época, no permitieron mayor información ni confeccionar lo que hoy podríamos llamar un catálogo sísmico –geográfico. El historiador don José Toribio polo (1904), analizo estas fuentes y otras, estimó que se habrían producido más de 2500 temblores en territorio peruano, desde la conquista hasta fines del siglo XIX y advirtió que por varias causas no se anotaron muchos sismos, en el periodo de 1600 a 1700”. (Silgado, 1978)

Para llevar los terremotos históricos a un catálogo de terremotos se debe:

- **Evaluar las Intensidades**
- **Ubicar el hipocentro**
- **Estimar la magnitud.**



## TERREMOTO 1650

**El terremoto de 1650, Intensidad** con epicentro en la ciudad del Cusco, marzo a las 14 horas. derribo todos los templos y la mayor parte de las edificaciones se sintió en Abancay, Andahuaylas y otros pueblos de la comarca. “Los Anales del Cusco dejan entrever la desolación que causo este sismo en toda la meseta del Collao hasta Sicasica (Bolivia). Otros perjuicios y efectos están descritos por el P. Juan de Córdova (25) que escribía; en el pueblo de Yaurisqui todo se asolo, en la casa del cura despidió los cimientos y apartándolos cayeron las paredes del lugar, muriendo 12 personas. El Br. Juan de arenas pereció con 20 indios yendo de Nuñoa al pueblo de Marcapata, Hasta el 3 de abril se contaron en el Cusco más de 260 temblores y entre más de 30 tan intensos como el primero y más breves en tiempo”. (Silgado, 1978).

Se activaron deslizamientos en Pisac y Paucartambo, se represó el curso del río Apurímac. La tierra se agrieto en varios lugares, observándose disturbios en el nivel freático de las aguas de escorrentía cerca del pueblo de Oropesa.

**Hipocentro**, el análisis de todas nuestras observaciones y la de otros, nos condujo a situar el epicentro al norte del Cuzco posiblemente la falla de Tambomachay. La profundidad del foco fue 12 km. de acuerdo con la fórmula de Gutenberg- Richter.

$$\frac{r}{h} = \sqrt{10^{\frac{I_0 - 1}{2}} - 1} \rightarrow r = 144 \text{ Km.}$$

h= hipocentro= 12 km

I<sub>0</sub>= intensidad VIII (8), según los relatos históricos.

**Terremoto 1650**, radio es 144 km. I<sub>0</sub> de grado VIII de la Escala Modificada de Mercalli, este radio es importante para confeccionar las Isosistas. El sismo de 1650 en función de la intensidad, el hipocentro es la falla Tambomachay, se estima que la magnitud es: **6.5 Mw**.



ESCALA INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA COMPARADA CON LA MAGNITUD DE RICHTER		
Intensidad Mercalli	Magnitud Richter	Descripción
VI - VII	5	Todas las personas sienten; algunos daños en las construcciones (objetos inestables se caen), grietas en las paredes.
VII - VIII	6	Difícil de pararse, gente en pánico. Difícil de conducir autos, daño a los edificios
IX - X	7	Daños mayores, pánico generalizado del público. Sería destrucción de casas, puentes y monumentos.
XI - XII	8 a más	Casi nada queda en pie. Destrucción total

*Tabla N° 11. Escala intensidad de Mercalli modificada comparada con la magnitud de Richter*

## TERREMOTO 1950

**Evaluando la intensidad**, el 21 de mayo de 1950, a 13:38 horas. “Terremoto en la ciudad del Cusco, que daño en más de un 50 % de sus edificios y viviendas. Perekieron unas 120 personas y heridas unas 275. El área epicentral estuvo confinada al valle del Cusco (unos 12 Km<sup>2</sup>), el movimiento se sintió en un área elíptica de 16000 Km<sup>2</sup>; efectos en el terreno: después del terremoto, en el parte Sur del valle, al SE del pueblo de san Sebastián, se observó en una longitud de 5 km. Una zona de extensa fisuración. Las grietas eran de forma irregular y variaban de abertura desde algunos centímetros hasta 2 metros de profundidad, y en longitud de 10 a 50 metros, encontrándose tanto en terrenos secos como húmedos. Los deslizamientos fueron de magnitud reducida y ocurrieron principalmente en algunas laderas escarpadas y en los taludes de gravas aluviales, El nivel freático se levantó en el lado Sur del valle.”. (Silgado, 1978).

**Hipocentro**, el análisis de las observaciones nos ayudó a situar el epicentro al norte del Cusco la falla de Pachatusan. La profundidad del foco 9 km. de acuerdo con la fórmula de Gutenberg- Richter.

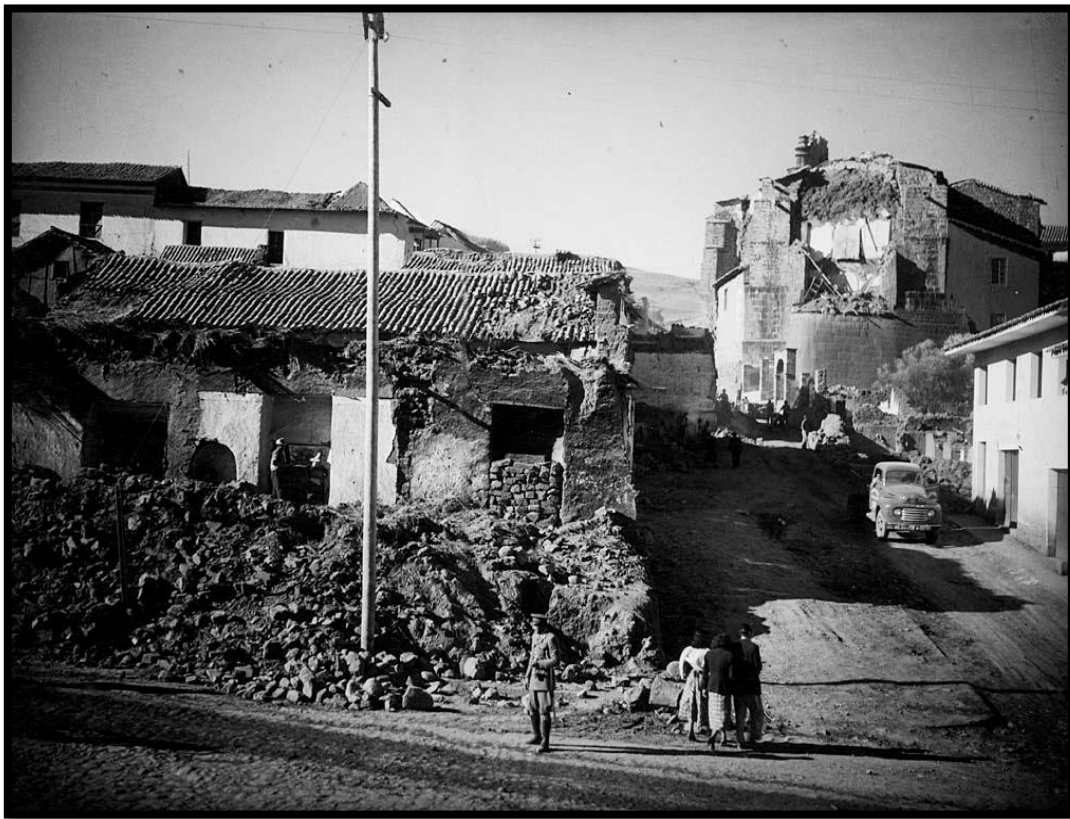


$$\frac{r}{h} = \sqrt{10^{\frac{I_0 - 1}{3}} - 1} \rightarrow r = 74 \text{ Km.}$$

h= hipocentro= 9 km

I<sub>0</sub>= intensidad VIII (8), según los relatos históricos.

**Para el terremoto de 1950**, radio es 74 km. I<sub>0</sub>, grado VIII de la Escala Modificada de Mercalli. El terremoto de 1950 en función de la intensidad, hipocentro falla Pachatusan se estima que la magnitud es: **6.5 Mw**.



*Fotografía N° 03. Destrucción del templo Santo Domingo*



CATALOGO SISMICO DESDE EL AÑO 1650-2019

AÑO	MES	DIA	LATITUD	LONGITUD	PROF.	MAG (M <sub>w</sub> )	EPICENTRO
1650	03	08	-13.987	-72.706	91.1	6.5	5km al norte del Cusco. Sismo histórico
1950	05	21	-13.987	-72.706	91.1	6.5	8 km al norte del Cusco. Sismo histórico
1990	11	13	-13.987	-72.706	91.1	4.3	Sur del Perú
1991	7	6	-13.108	-72.187	104.5	7	Sur del Perú
1994	8	10	-13.885	-72.621	87	5.1	Sur del Perú
1994	8	6	-14.138	-72.761	89	4.2	Sur del Perú
1995	4	15	-14.049	-72.932	88.9	4.1	Sur del Perú
1997	9	8	-13.907	-71.722	86.6	4.3	Sur del Perú
1998	5	27	-13.915	-72.725	95.7	5.3	Sur del Perú
1999	12	26	-14.084	-72.774	90.7	5.1	Sur del Perú
1999	10	17	-13.99	-71.92	10	3.5	8 km al NE Capacmarca
1999	11	6	-13.45	-71.98	10	2.7	6 km al N del Cuzco
1999	11	27	-15.03	-71.62	10	4.8	35 km al SO de Yauri
2000	3	9	-13.7	-72.11	10	3.4	26 km al SW de Cuzco
2000	4	7	-11.27	-73.13	10	4.3	91 km al SE de Atalaya
2000	9	21	-13.33	-72.07	10	3.1	22 km al NO de Cuzco
2001	2	12	-13.48	-72.01	10	2.2	5 km al NO de Cuzco
2001	7	6	-13.56	-71.85	12	3.8	Cuzco
2001	11	3	-13.61	-72.23	15	3.6	17 km al SO de Anta
2003	5	12	-13.63	-71.66	3	3.5	7 km al NO de Urcos
2003	5	17	-13.33	-71.9	3	2.8	Saylla
2003	5	16	-13.57	-72.06	10	3	11 km al SO de Cuzco
2003	5	18	-13.56	-71.89	4	3.5	11 km al SE de Cuzco
2003	5	24	-14.3	-71.35	47	4.7	Acomayo
2003	5	25	-13.94	-72.52	89	4.5	27km al NE Chuquibamba
2003	7	6	-13.45	-72.25	35	3.7	12 km al NO de Anta
2003	7	7	-13.36	-72.32	40	3.8	23 km al NO de Anta
2003	8	8	-14.11	-71.79	10	5	22 al SE de Capacmarca
2003	8	8	-14.12	-71.82	10	4.9	20 al SE de Capacmarca
2003	8	22	-13.45	-72.46	10	3.6	33 km al O de Anta





2003	9	22	-13.48	-72.07	5	3.4	Capacmarca
2004	6	16	-13.7	-71.31	10	2.5	33 km al E de Urcos
2005	7	11	-14.9	-72.92	10	3.2	35 km al N de Cotahuasi
2005	7	20	-13.94	-71.71	10	2.7	4km al SO de Acomayo
2005	9	5	-14.49	-71.61	10	3.8	37km al SO de Yanaoca
2006	6	1	-14.08	-72.26	7	2.9	29km al SO de Capacmarca
2006	8	9	-14.39	-70.91	33	4.7	37km al S de Macusani
2006	11	13	-13.9	-71.69	9	4.7	2km al NO de Acomayo
2006	11	13	-13.83	-71.66	19	4	9km al NE de Acomayo
2007	9	24	-12.93	-71.61	40	3.7	43km al N de Paucartambo
2008	4	19	-14.12	-71.19	33	3.5	Sicuani
2008	6	15	-14.58	-71.57	57	3.9	Yauri
2008	7	24	-14.56	-71.57	25	3.8	Yanaoca
2008	7	28	-14.06	-71.01	19	4.1	Sicuani
2009	2	15	-13.66	-71.86	33	2.7	11km al N de Paruro
2009	5	11	-13.96	-71.61	71	4	9km al SE de Acomayo
2009	7	2	-13.5	-72.19	24	4.0ML	Anta, Zurite, Huarconcho
2009	7	12	-15.18	-71.33	227	5.3	Yauri
2009	8	8	-14.16	-71.17	174	4.1	Yanaoca
2010	8	9	-13.1	-71.27	18	4.2	Paucartambo
2010	8	12	-12.29	-72.74	39	4.9	Quillabamba
2010	9	13	-14.68	-71.2	193	5.6	Yauri
2010	9	16	-12.11	72.58	90	4	Quillabamba
2010	11	24	14.74	-71.55	155	4.9	Yauri
2010	12	20	-14.86	-72.09	10	4.3	Santo Tomas
2011	7	16	-13.409	-72.591	44.7	4.4	Sur del Perú
2011	11	22	-14.056	-72.583	71.2	4.9	Sur del Perú
2011	5	14	-13.308	-71.617	35	4.2	Sur del Perú
2012	9	20	-13.906	-72.583	87.1	4.9	Sur del Perú
2013	9	9	-14.0784	-72.8475	68.77	4.2	49km al S de Abancay
2013	5	21	-13.787	-72.263	92	5.8	46km al SW de Anta
2013	1	18	-12.959	-71.253	47.3	4.5	Centro del Perú
2014	9	28	-13.8429	-71.6953	10	4.9	19km al SSW de Urcos
2015	12	24	-13.5325	-72.4189	47.43	4.2	30km al WSW de Anta



2015	7	6	-13.8479	-71.7295	36.66	4.9	21km al SSW de Urcos
2016	10	2	-13.8751	-72.6187	71.23	4.1	38km al SE de Abancay
2016	1	19	-14.0718	-72.9469	101.03	4.8	48km al S de Abancay
2017	12	26	-14.1828	-72.8738	71.83	4	60km al S de Abancay
2018	11	11	-13.25	-71.56	18	4	9 km al NE del Cuzco
2018	11	11	-13.4004	-71.8301	46.79	4.2	3km al NE de Písaq, Cuzco
2018	10	25	-13.936	-71.8573	43.02	4.3	37km al SW de Urcos
2018	6	16	-13.491	-72.5575	10	4.6	38km al ENE de Abancay
2018	4	8	-14.0232	-72.8244	69.93	4.5	43km al S de Abancay
2019	12	12	-14.0953	-72.7509	78.09	4.4	52km al SSE de Abancay
2019	9	2	-14.0458	-72.5498	80	5	57km al SE de Abancay
2019	5	16	-14.55	-70.99	16	4.3	33 km al SE de Langui
2020	3	21	-13.76	-71.96	10	3.4	12 km al W de Paruro

Tabla N° 12. Este catálogo reprocesado por el Instituto Geofísico del Perú.

Este catálogo sísmico uniforme, muestra reportes del año 1990 al 2019, con magnitudes moderadas, fechas exactas, ubicación del epicentro con latitudes, longitudes; la magnitud y la profundidad nos permite identificar el tipo y características del sismo. La mayor cantidad de datos procesados son de los sismogramas del Instituto Geofísico del Perú y reportes del Servicio de Geología de los Estados Unidos (USGS).

**Estimación de la magnitud máxima del catálogo para las distancias zonas delimitadas estimar la Mmax por el método "one step beyond".**

$$M_{\max}(\text{posible}) = M_{\max}(\text{reportada}) + \Delta M$$

$$M_{\max} = M_{\max}(\text{reportada}) + \Delta M$$

$$M_{\max} = 6.5 M_w + 0.5$$

$$M_{\max} = 7.00 M_w$$

**Método "One step beyond".** Toma en cuenta los datos del catálogo de cada zona sísmogénica y el período de recurrencia del terremoto máximo visto en el sistema de



fallas Cusco. Este método se basa en el contenido del catálogo y toma en cuenta la sismotectónica del sistema de fallas en la selección del período de recurrencia del terremoto máximo posible. Con este método se tienen buenos resultados en las zonas donde la sismicidad está bien documentada, pero en el caso de la fuente del sistema de fallas geológicas el catálogo sísmico no está bien documentado y no es posible realizar un buen ajuste del gráfico magnitud – frecuencia.

## LEYES DE ATENUACION PARA SISMOS CONTINENTALES

La estimación del movimiento de roca y/o suelo, están en función del valor de la magnitud y del tipo de litología que atraviesan las ondas elásticas, cada vez que se alejan del epicentro se atenúan más.

Existen diferentes modelos matemáticas de atenuación, se deben utilizar de acuerdo a las características litológicas, tectónicas y topográficas del lugar a estudiar.

### a) Leyes de Atenuación utilizadas para el Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico

Para determinar los efectos que produciría la actividad sísmica en un lugar determinado, es necesario relacionar la magnitud, la distancia del sitio de interés a una fuente dada y la intensidad sísmica que se presentaría si ocurriera un sismo en dicha fuente. A las expresiones que permiten establecer este tipo de relaciones se las conoce como leyes de atenuación.

- **Ley de Atenuación para aceleraciones espectrales de Sadigh et al (1997):**  
(sadigh, 1997)

#### Caso 1: Suelo tipo Roca

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5-M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6 M)) + C_7 \ln(r_{rup} + 2)$$

.- Ley de Atenuación para depósitos de suelos firmes profundos:

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M - C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M}) + C_6 + C_7 (8.5 - M)^{2.5}$$

Dónde: y = aceleración espectral (g)

M = magnitud momento (Mw)



$C_1 = -2.17$  para strike-slip,  $-1.92$  para reverse

$C_2 = 1.0$

$C_3 = 1.70$

$C_4 = 2.1863$ ,  $C_5 = 0.32$  para  $M \leq 6.5$

$C_4 = 0.3825$ ,  $C_5 = 0.5882$  para  $M > 6.5$

$r_{rup}$  = distancia más cercana a la superficie de rotura

La ley de atenuación de Sadigh et al (1997) es la más adecuada para sismos continentales, estos deben estar relacionados con la tectónica y sismotectónica del aparato andino. Cuando uno aplica la ley de atenuación correcta el grado de incertidumbre es pequeña y el resultado de las aceleraciones pico es la más aproximada.

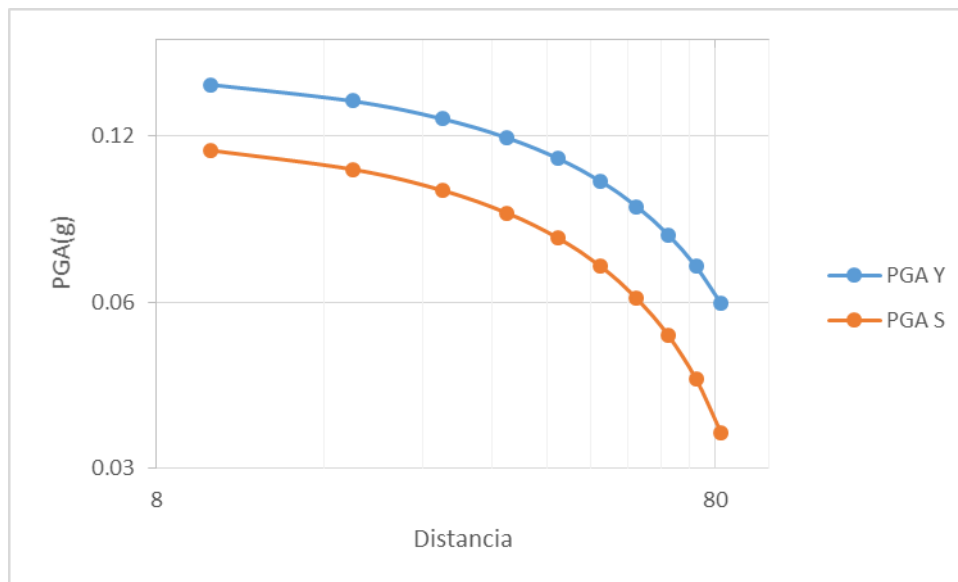


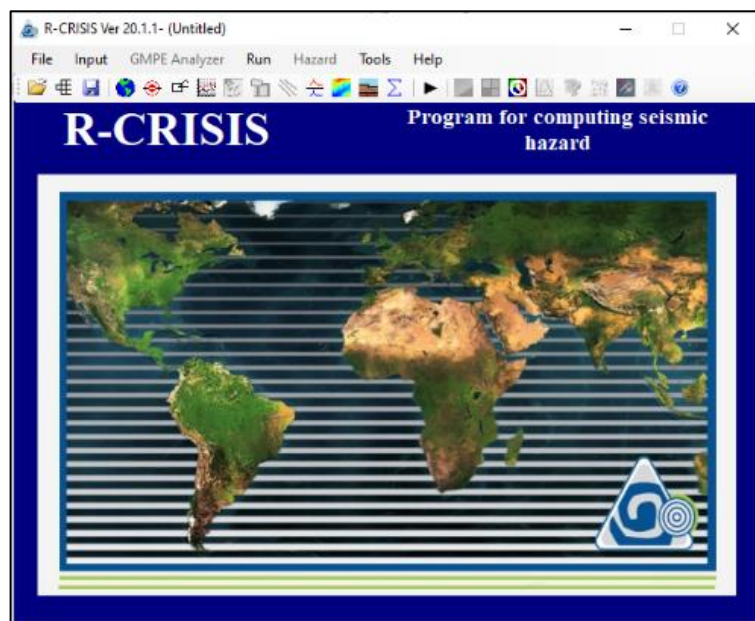
Diagrama N° 01. Relación distancia-PGA



## SOFTWARE R- CRISIS

Para realizar las evaluaciones probabilísticas del Peligro Sísmico se utilizó el Software R – CRISIS. Utiliza la metodología clásica de evaluación probabilista del peligro sísmico propuesta por Esteva (1967) y Cornell (1968), que es una forma del teorema de probabilidad total. Así entonces, se necesita la definición de un conjunto de fuentes sísmicas donde cada una se asume con una actividad sísmica uniforme y que se caracterizan a partir de modelos de recurrencia tales como distribuciones de magnitud y frecuencia. Dichas fuentes se subdividen en una serie de elementos con un tamaño adecuado en los cuales se distribuye proporcionalmente la sismicidad. Con esto el programa calcula las probabilidades de excedencia de intensidades de movimiento en un punto de interés cuando un terremoto con cierta magnitud y distancia ocurre.

R-CRISIS es un programa de cálculo de riesgo sísmico. R-CRISIS se utilizó la versión más reciente de CRISIS 2020, una solución mundialmente conocida para realizar análisis probabilísticos de peligros sísmicos (PSHA). El programa es el resultado de más de 30 años de continuas innovaciones por la Universidad Autónoma de México, desarrollo y mejoras, proporcionando el software más completo, pero fácil de usar, adecuado para usos académicos y comerciales.



*Figura N° 18. Pantalla de inicio del Software R-Crisis*



Fuentes sismogénicas de corteza continental.

### Fuente de Sismos Continentales

- ✓ **Fuente:** Fracturas, fallas geológicas de decenas de kilómetros, el proceso de compresión continuo de la corteza continental y la colisión del escudo brasilero con la Cordillera Andina.
- ✓ **Características:** Magnitudes de hasta 6,5  $M_w$ , en áreas reducidas.

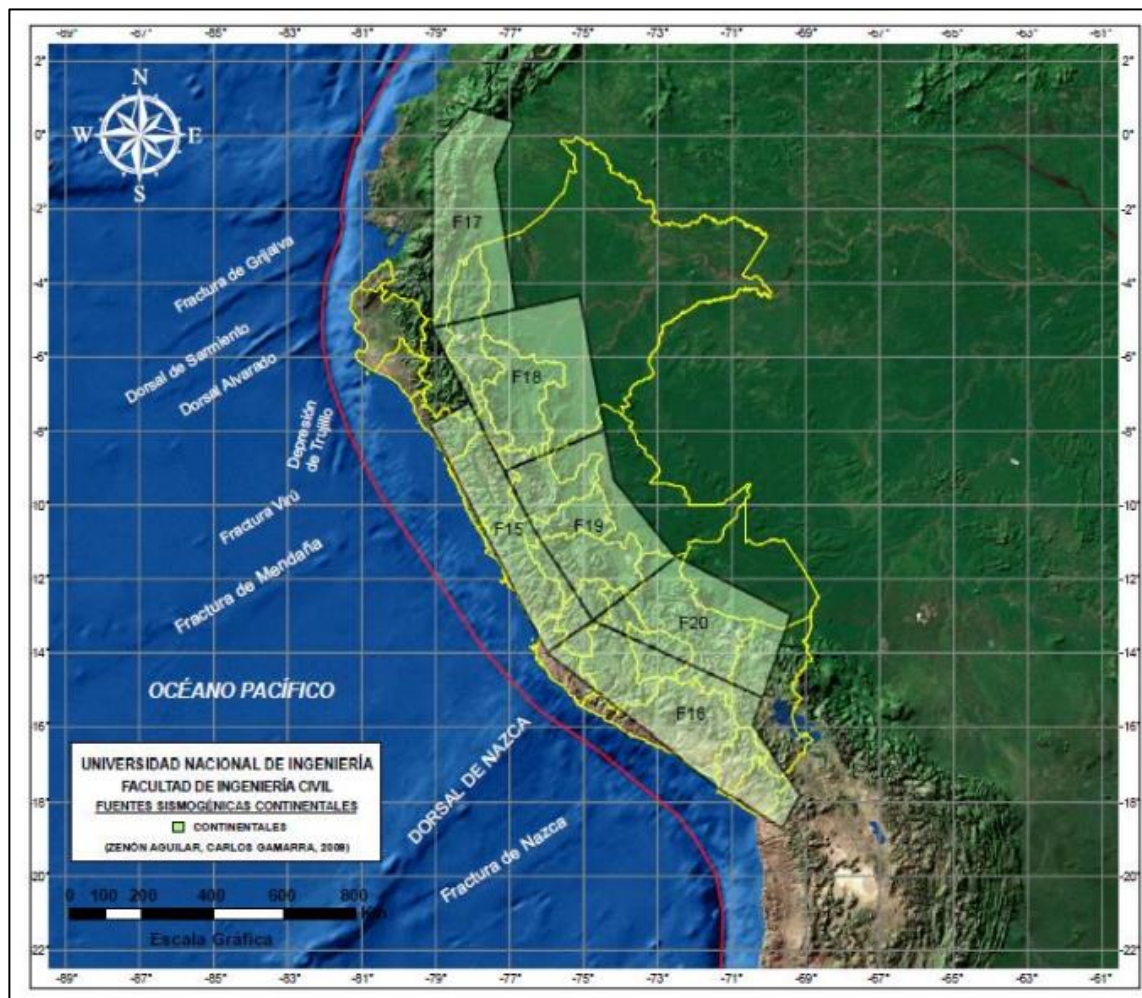


Figura N° 19. Fuentes de sismos corticales en el Perú.



## MAPA DE PELIGROSIDAD SISMICA DE LA REGION DEL CUSCO

Se utilizó la información básica para elaborar el mapa de la peligrosidad sísmica de la región del Cusco, se utilizó los datos de la fuente sismogénica 20 del territorio peruano. También algunos parámetros sísmicos de fuentes que están dentro del área de estudio. Así mismo se identificó los parámetros del número de Ordenadas Espectrales y el periodo estructural para cada ordenada espectral y leyes de atenuación (las cuales son muy determinantes para los resultados). Cabe resaltar que las diversas fuentes de información existentes para el Perú han permitido elaborar este trabajo. Siendo el resultado final de la corrida la siguiente figura.

### a) METODOLOGIA DEL R-CRISIS.

R crisis es un software basado en Windows con la capacidad de realizar análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA) utilizando un enfoque totalmente probabilístico que permite el cálculo de resultados en términos de salidas con diferentes características (es decir, gráficos de probabilidad de excedencia, conjunto de eventos estocásticos).

Es una herramienta reconocida mundialmente que se ha utilizado en el desarrollo de diferentes proyectos a diferentes escalas y la zonificación sísmica para la definición de coeficientes de diseño sísmico en más de 10 países de la región de América Latina y el Caribe. CRISIS ha sido escrito y desarrollado principalmente por profesionales de PSHA.

R-CRISIS proporciona un entorno amigable para realizar cálculos de riesgo sísmico dentro de un marco completamente probabilístico. El programa calcula la amenaza sísmica considerando las probabilidades de ocurrencia de terremotos, las características de atenuación y la distribución geográfica de los terremotos. Los resultados de peligrosidad sísmica se obtienen principalmente, para cada sitio de cálculo, en términos de probabilidades de exceder un valor de intensidad dado dentro de diferentes marcos de tiempo, mientras que también es posible obtener los resultados en términos de probabilidades de no excedencia y tasas de excedencia anual equivalentes.



MAPS - R-CRISIS Ver 20.1.1

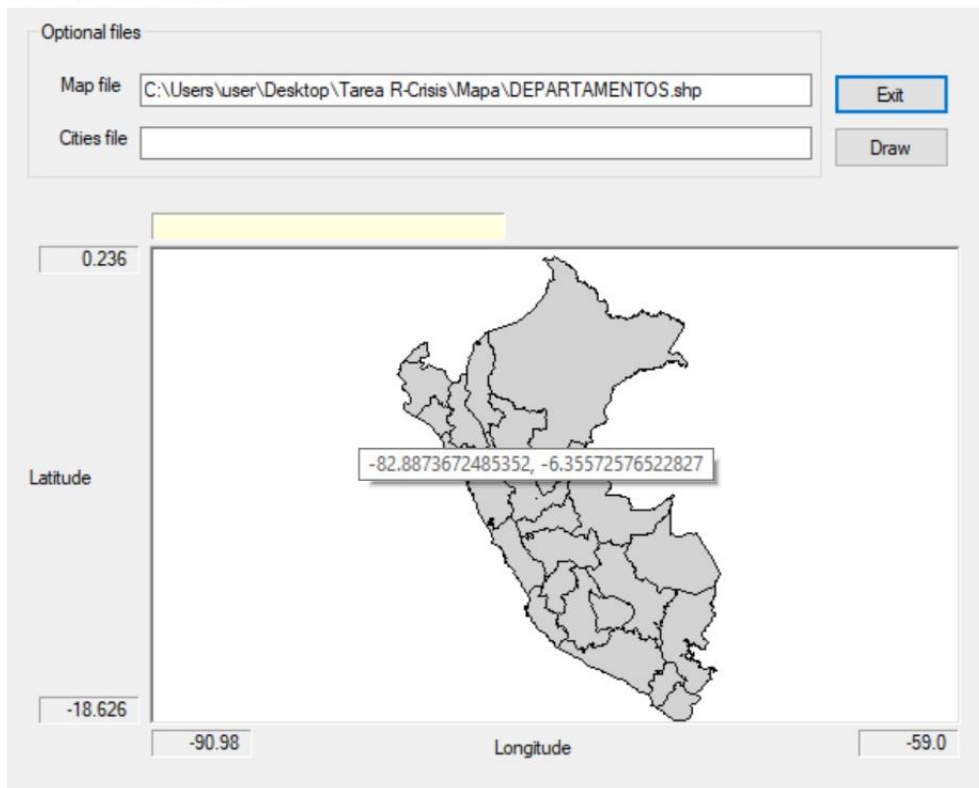


Figura N° 20. Introducción de mapa al Software R-Crisis

- **Malla de trabajo**

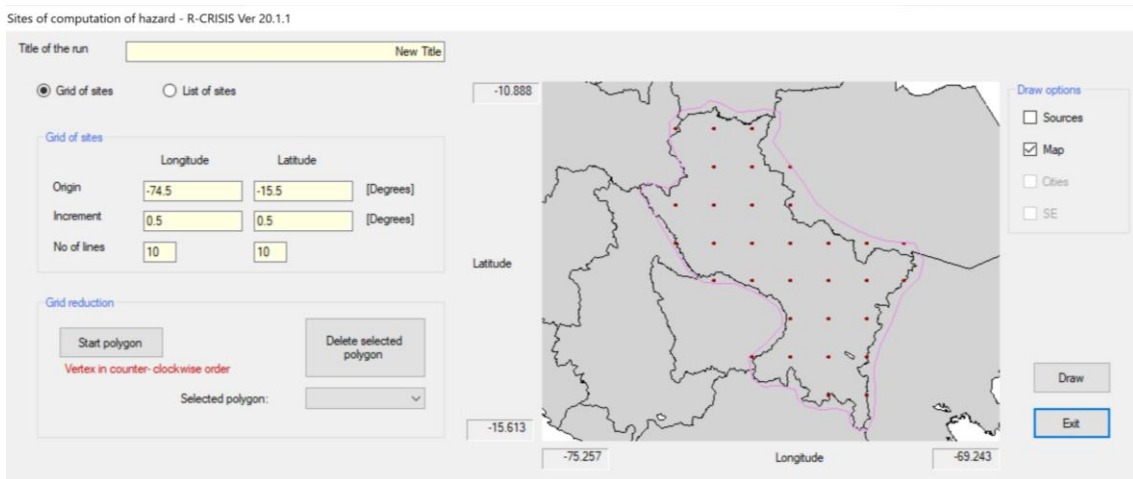


Figura N° 21. Malla de trabajo Software R-Crisis





Primeramente, se realiza la grilla de trabajo en la zona de Perú, en aquí podremos observar al departamento de Cusco con incrementos de la grilla o cuadrícula de  $0.5^\circ$ , con un origen en su longitud de  $-82^\circ$  con 10 líneas en ella y origen en su latitud de  $-19^\circ$  con 10 líneas en ella; se ha hecho el dibujo del polígono haciendo click sobre “start polygon” de esta manera se procede con el dibujo del mapa.

- **GEOMETRIA DE LAS FUENTES SISMICAS**

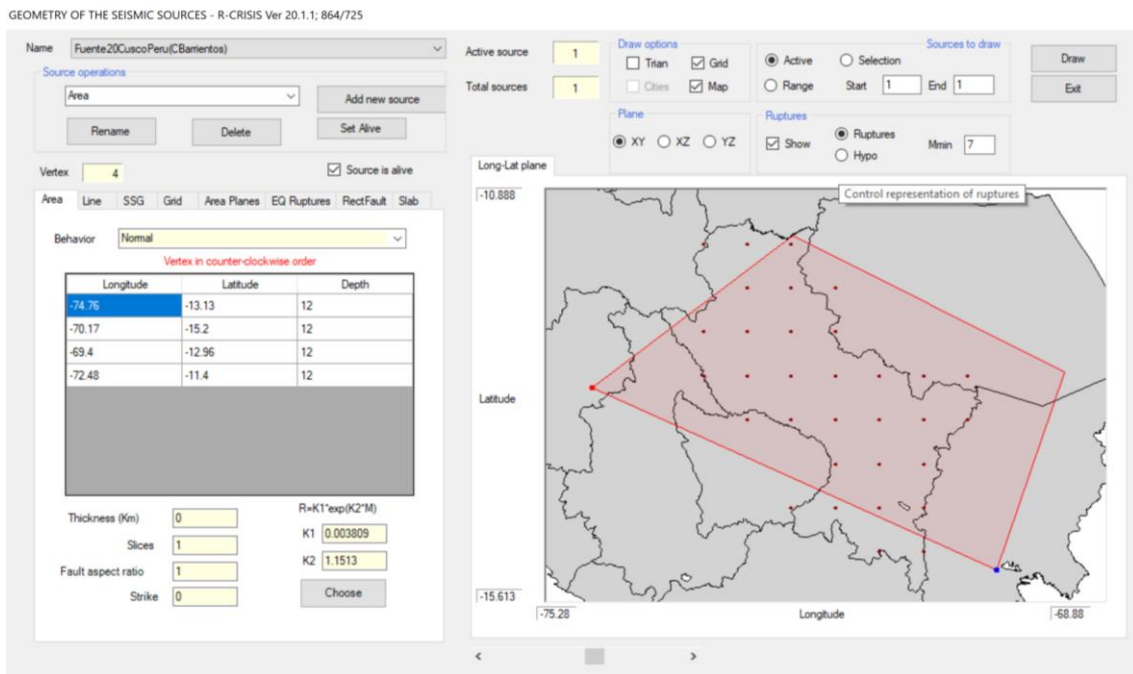


Figura N° 22. Geometría de las fuentes sísmicas Software R-Crisis

Luego la fuente de geometría, los parámetros geográficos a nivel de coordenadas de las fuentes sismogénicas trabajadas de la bibliografía de gamarra (2009) en este caso la fuente 20 nos dará a conocer los parámetros geográficos del Cusco en el cual dibujaremos “draw” con sus 4 vértices en sentido contrario a las agujas del reloj, llenando sus 4 datos respectivos de longitudes, latitudes y profundidades, que también nos dará un valor de su radio de estudio, aquí podemos observar en diferentes planos, en este caso XY.

- **PARAMETROS SISMOLOGICOS DE LA FUENTE**

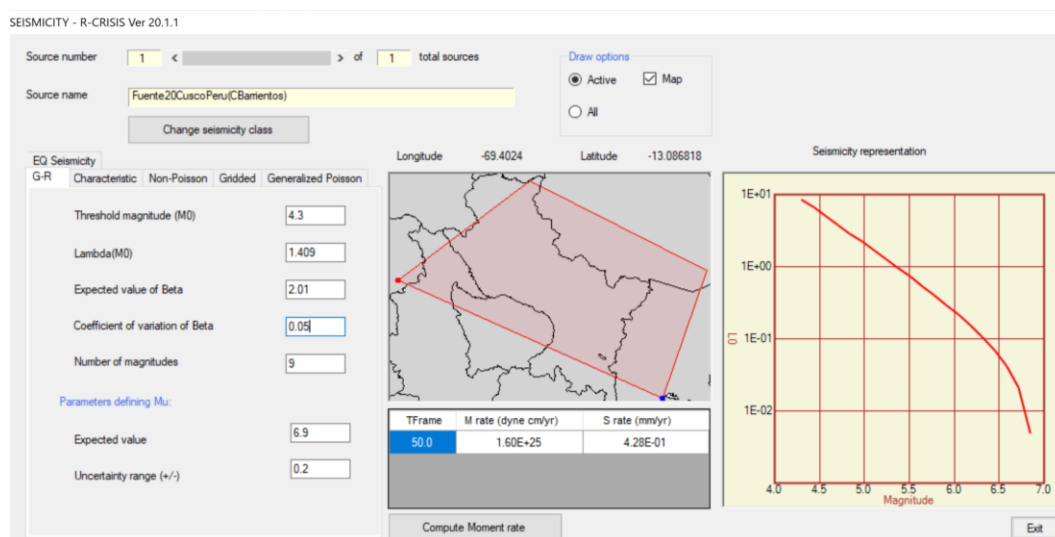


Figura N° 23. Parámetros sismológicos de la fuente Sismica Software R-Crisis

Seguidamente los parámetros sismológicos de cada fuente, en este caso la fuente 20 que es la fuente de Cusco, estos parámetros se han obtenido de la bibliografía de Gamarra, para este modelo se ha trabajado con el modelo exponencial de recurrencia de Gutenberg y Richter que son parámetros por fuente indicándonos la magnitud mínima (4.3), magnitud máxima (6.9), parámetro beta (2.010) y un parámetro de excedencia de magnitudes (1.409) obteniéndose el momento rate y la representación sísmica.

- **ORDENADAS ESPECTRALES**

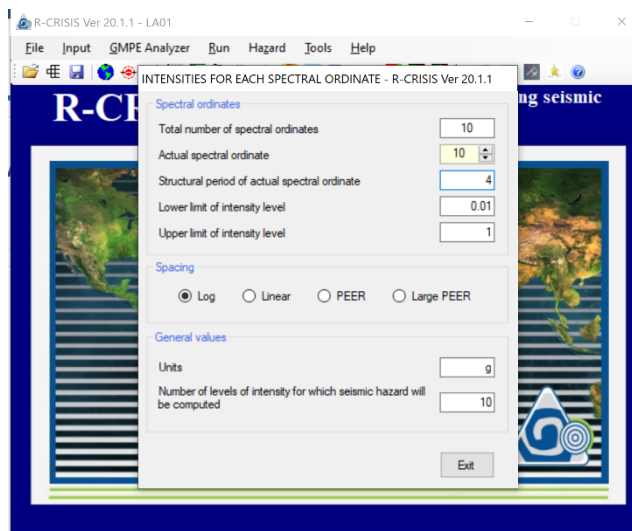


Figura N° 24. Ordenadas espectrales Software R-Crisis



Los datos de ordenadas espectrales, son los parámetros espectrales de periodos, intensidades y aceleración a evaluar para ello hemos considerado 10 parámetros en las abscisas y para 10 ordenadas espectrales y cada uno con sus respectivos periodos de 0 a 4.

### LEYES DE ATENUACION DE SADIGH (1997)

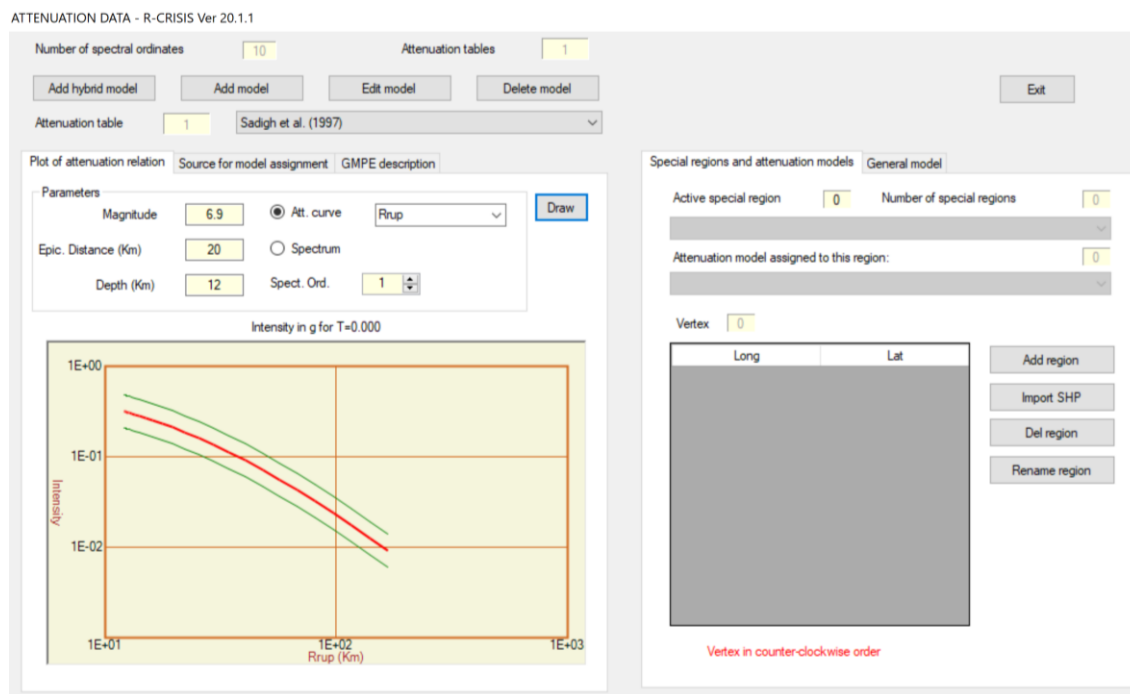


Figura N° 25. Ley de atenuación de Sadigh Software R-Crisis

Luego las leyes de atenuación para ello hemos trabajado con las leyes de atenuación de sadigh, con una magnitud 7, distancia del epicentro 20 y con una profundidad de 10, en el caso de nuestra Fuente 20 será asignada la de Sadigh y finalmente obtendremos un gráfico de la intensidad en gals para un tiempo de 0.000 seg.



### EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO

Fundamento del análisis: Probabilidad de ocurrencia, período de exposición y período de retorno.

$$P(\lambda, \Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$$

2% PE in 50 years

$$0.02 = 1 - e^{-\lambda(50)}$$

$$\lambda = 0.000404$$

Return Period

$$= \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.000404} = 2,475 \text{ years}$$

10% PE in 50 years

$$0.10 = 1 - e^{-\lambda(50)}$$

$$\lambda = 0.002107$$

Return Period

$$= \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.002107} = 474.6 \text{ years}$$

GLOBAL PARAMETERS - R-CRISIS Ver 20.1.1

The screenshot shows the 'GLOBAL PARAMETERS - R-CRISIS Ver 20.1.1' window. It is divided into several sections:

- Integration parameters:**
  - Maximum integration distance: 200 km
  - Minimum triangle size: 11 km
  - Minimum Distance/Triangle Size ratio: 7
- CAV filter:**
  - Filter type: None
- Time frame:** A vertical list with '50' selected.
- Map return period (years) / PE in 50 years table:**

Map return period (years)	PE in 50 years
100	3.93E-01
250	1.81E-01
500	9.52E-02
1000	4.88E-02
2500	1.98E-02
- Exit:** A button at the bottom right.

Figura N° 26. Periodo de retorno Software R-Crisis

Luego llenaremos nuestros parámetros globales el cual representaran la máxima distancia para cada ley de atenuación el cual será 500 km de radio, con una triangulación de 11km de lado y una relación de distancia de ambos de lado del triángulo, los periodos de retorno a analizar serán de 100, 250, 500, 1000, 2500 años.

## PELIGRO SÍSMICO DE LA REGION DEL CUSCO (Sadigh et al. (1997)).

Finalmente procedemos las curvas de tasa de excedencia y el espectro del peligro, en este caso del departamento de Cusco será para la tasa de excedencia en 0 segundos con una intensidad de 0.25 gal para un periodo de 50 añosde retorno.

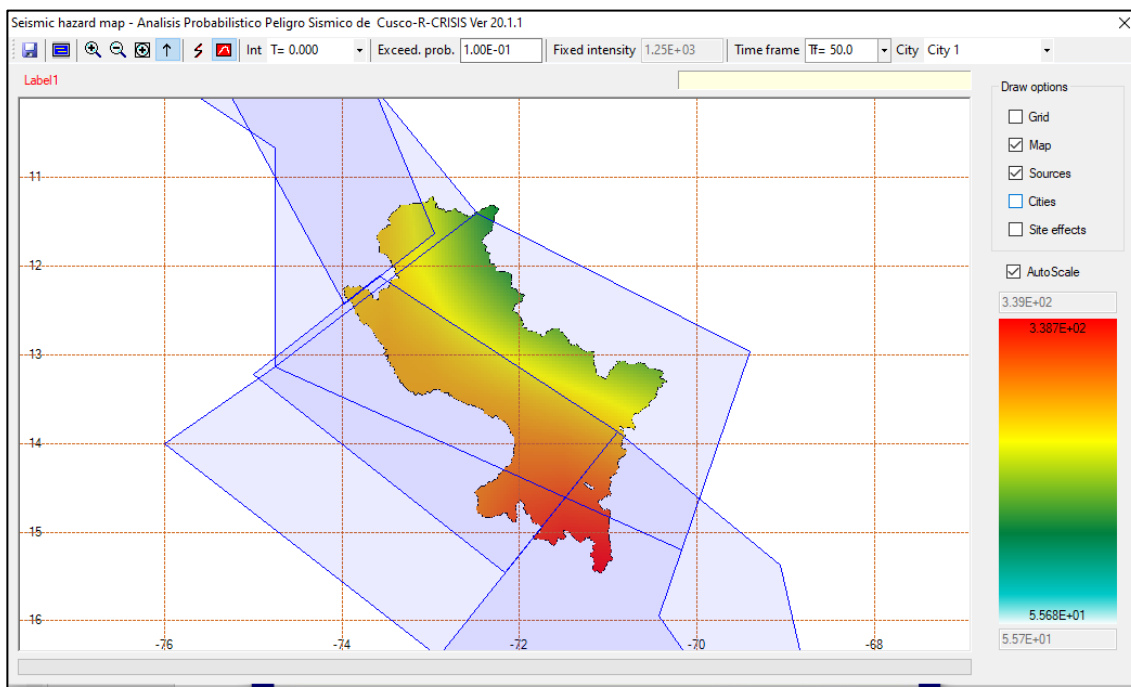


Figura N° 27. Mapa de peligro sísmico Software R-Crisis

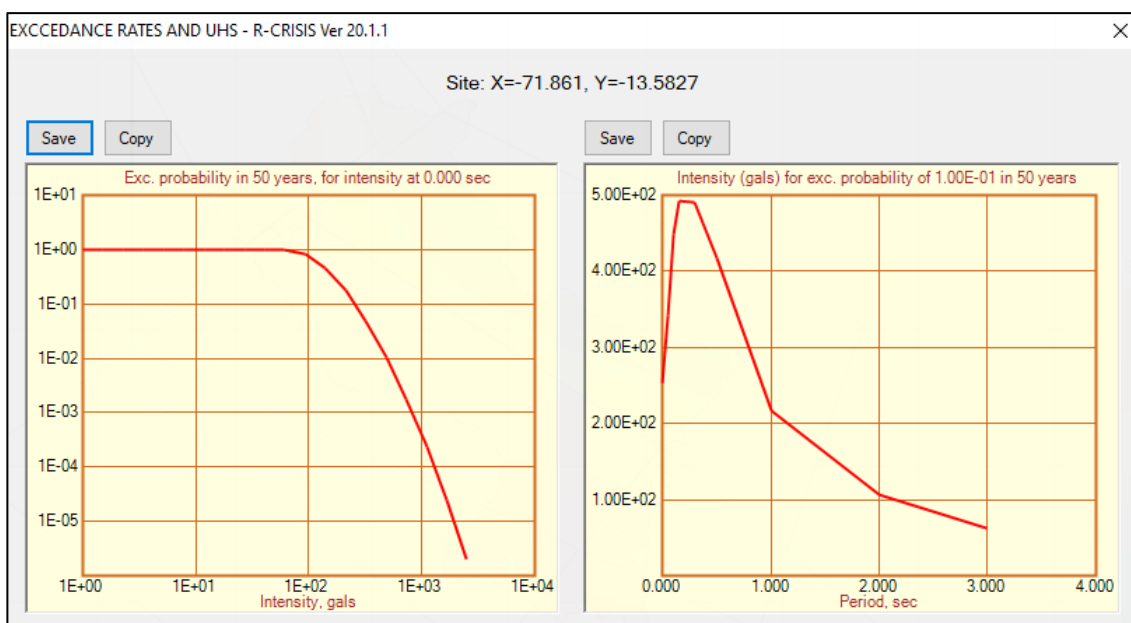


Figura N° 28. Tasa de excedencia y espectro de peligro Software R-Crisis



- Derecha: (Grafico N° 28) indica la tasa de excedencia o de intensidades Tenemos los siguientes resultados, donde tenemos una tasa de excedencia para un periodo de 0.01seg. esto significa que cada año la intensidad excederá 0.01 veces cada año para un periodo de retorno de 50 años.
- Izquierda: (Grafico N° 28) Espectro de peligro uniforme Buscamos diferentes aceleraciones máximas para diferentes periodos estructurales, donde podemos ver que tiene una probabilidad de excedencia de  $4.700E +02$  para diferentes periodos estructurales.
- Los espectros de diseño toman en cuenta el espectro de respuesta o aceleración pico del suelo. En el siguiente cuadro se presenta los espectros de peligro uniforme obtenidos para la región del Cusco tomando un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.
- Como podemos ver, en la zona NE de la fuente 20 hay menos probabilidad de excedencia, mientras que más hacia el Sur, la probabilidad de excedencia de la intensidad va aumentando, en donde se ubica Paruro, Acomayo y Chumbivilcas.

### **ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME (UHS)**

Los resultados de la peligrosidad sísmica es el espectro de peligro uniforme o espectro de respuesta de cualquier lugar del territorio peruano. Nos indica la aceleración máxima del suelo que se produciría durante un terremoto también conocido como medida de la intensidad; se utiliza para un análisis espectral del diseño sismoresistente.



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú



### CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL (CENSIS)

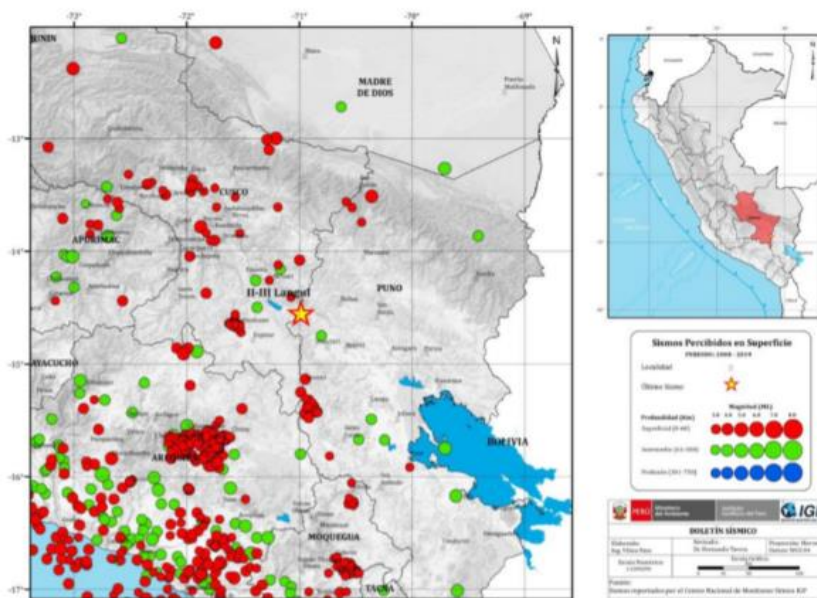


#### REPORTE SÍSMICO

#### Sismo del 16 de mayo del 2019

A las 18 horas – 49 minutos (Hora Local), se registró un sismo con los siguientes parámetros hipocentrales:

<b>Coordenadas del epicentro:</b> Latitud: Longitud:	-14.55° -70.99°	<b>CUSCO</b>
<b>Profundidad:</b>	16 km	<i>Evento de foco superficial</i>
<b>Magnitud:</b>	4.3	<i>Magnitud</i>
<b>Referencia:</b>	33 km al Este-SE de Langui	<i>Canas</i>
<b>Intensidad Máxima:</b>	II-III en Langui	<i>Escala Mercalli Modificada</i>
<b>Fecha (UTC)</b> <b>Hora Origen (UTC)</b>	16 de mayo, 2019 23 h 49 min	<i>Fecha/Hora, Tiempo Universal Coordinado</i>



**Epicentro:** Se toma como referencia la plaza de Armas de la ciudad y/o localidad  
**Intensidad Máxima:** Corresponde a la localidad más cercana al epicentro.  
**Magnitud:** Para sismos con magnitud  $\leq 6,5$  se utiliza la escala ML (Richter) y para mayor magnitud, la escala Mw (Magnitud momento).



Figura N° 29. Reporte sísmico del Instituto Geofísico del Perú.



### ÚLTIMO SISMO

Síguenos en:

IGP/CENSIS/RS 2020-0189

MAPAS TEMÁTICOS

Fecha	21/03/2020	
Hora Local	15:53:07	
Magnitud	3.4	
Referencia (Continente)	12 km al O de Paruro, Paruro - Cusco	
Latitud (°)	-13.76	
Longitud (°)	-71.96	
Profundidad (km)	10	
Intensidad	II-III Paruro	
Rango de Magnitud		
< 4.5	entre 4.5 y 6.0	> 6.0



**Intensidad:** La intensidad es un índice de los efectos causados por un sismo en las viviendas, naturaleza y comportamiento de las personas. Este índice depende de las condiciones del terreno, la vulnerabilidad de las edificaciones y de la distancia epicentral. Para estandarizar los niveles de intensidad se utiliza la Escala Mercalli Modificada (MM).

**III (MM):** Sentido por personas dentro de edificaciones, especialmente en pisos superiores. Vibraciones como las producidas por el paso de un camión. Duración apreciable.

**Magnitud:** La magnitud es un valor único y una medida cuantitativa de la energía liberada por el sismo. Teóricamente la magnitud no tiene límite superior, pero está limitada por la resistencia de las rocas a la ruptura y por la longitud de la misma sobre la falla.

**ML:** Magnitud local definida inicialmente por Richter en 1954, corresponde a una escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía que libera un sismo.

**Mw:** Nueva escala de magnitud denominada magnitud momento ( $M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7$ ) y fue desarrollada por H. Kanamori del Instituto CALTECH (EEUU). Define la cantidad de energía liberada por un sismo a partir del momento sísmico,  $M_0 = \mu DA$ ; donde,  $\mu$  es la rigidez de la roca, del desplazamiento promedio y A, es el área de ruptura.

Figura N° 30. Definiciones básicas del Instituto Geofísico del Perú, para los reportes sísmicos





## **4.6. ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA SUBCUENCA DEL CUSCO Y ELABORACION DE UN MAPA DE PELIGROSIDAD.**

### **4.6.1. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.**

Este método, se apoya en los mapeos Geológicos, Geomorfológicos, Sismológicos, Geotécnicos, Estructurales, de microtrepidaciones y de amplificación sísmica. Esta metodología se utilizó en el Japón con un 90% de precisión, es la más adecuada para utilizarse en la reducción del peligro sísmico en la ciudad del Cusco, aproximadamente el 80% de las viviendas se encuentra emplazada sobre un material inconsolidado lacustre en el fondo del valle, denominado Lago Morkill.

La microzonificación sísmica consiste en la identificación de la respuesta dinámica de los suelos frente a sismos moderado a fuerte. Esta técnica del cociente espectral horizontal/vertical (H/V), fue hecha por Nakamura en 1989, para la determinación del período fundamental de vibración de los suelos, esta técnica es la más adecuada para la ciudad del Cusco a partir de mediciones de vibración ambiental. Esta técnica se puede aplicar sin la necesidad de un terremoto, otras técnicas, necesitan la ocurrencia de un terremoto; mediante un acelerómetro se puede conocer los periodos predominantes de los suelos y clasificarlos como suelos tipo Si, S2, S3, S4.

La microzonificación sísmica nos da la frecuencia y periodos de los tipos de suelos, interpolar para obtener el mapa de isoperiodos que serían la base para un plan de desarrollo urbano. Es importante realizar estudios de microzonificación en todos los distritos y construir las obras grandes como colegios y hospitales en zonas seguras que resistan los terremotos.

Los mapas de isoperiodos determinara las zonas de alto, mediano y bajo peligro de la ciudad del Cusco, litología, tipo de suelos cuyas respuesta dinámica frente a terremotos son semejantes, además de estas unidades se incluyen los efectos inducidos (fallas, licuefacción, etc.). en los estudios de microzonificación sísmica es importante hallar las características geotécnicas de los suelos lacustres , espesor, densidad, velocidad de ondas secundarias, módulo de rigidez, resistencia, profundidad del nivel freático.



## PERIODOS Y FRECUENCIAS PREDOMINANTES DE LOS SUELOS

Periodos (seg,)	Frecuencias (Hertz)	Tipo de material
0.1	10	Roca
0.2	5	Roca fracturada
0.3	3.33	grava bien gradada
0.4	2.5	grava mal gradada
0.5	2	limo arcilloso
0.6	1.66	Arcilla
0.7	1.43	Turba, material orgánico

*Tabla N°13. Esta tabla es referencial para los suelos de la ciudad del Cusco. Mediante el acelerómetro REFTEK*

La metodología que se utilizó en la Microzonificación Sísmica, comprende las siguientes etapas:

### 4.6.2. INSTALACIÓN

Se utilizó el acelerómetro REF TEK 130-SMHR, que es un registrador de alta sensibilidad, triaxial, de bajo ruido, balance de fuerza, para brindar datos e información precisos y oportunos para eventos sísmicos, incluidos sus efectos en edificios y estructuras. Está diseñado específicamente para cumplir con las especificaciones del Sistema Sísmico Nacional Avanzado (ANSS) de USGS para estaciones de referencia de movimiento fuerte para su despliegue en áreas urbanas y se suministra con un acelerómetro interno de equilibrio de fuerza de alta resolución, modelo 147A-01/3 con un rango dinámico > 155dB, y un oscilador de alta precisión para un cronometraje preciso.



Fotografía N° 04. Acelerómetro Triaxial Ref Tek; G.P.S

### 4.6.3. RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos obtenidos en la memoria del acelerómetro, data de los 29 puntos estudiados.

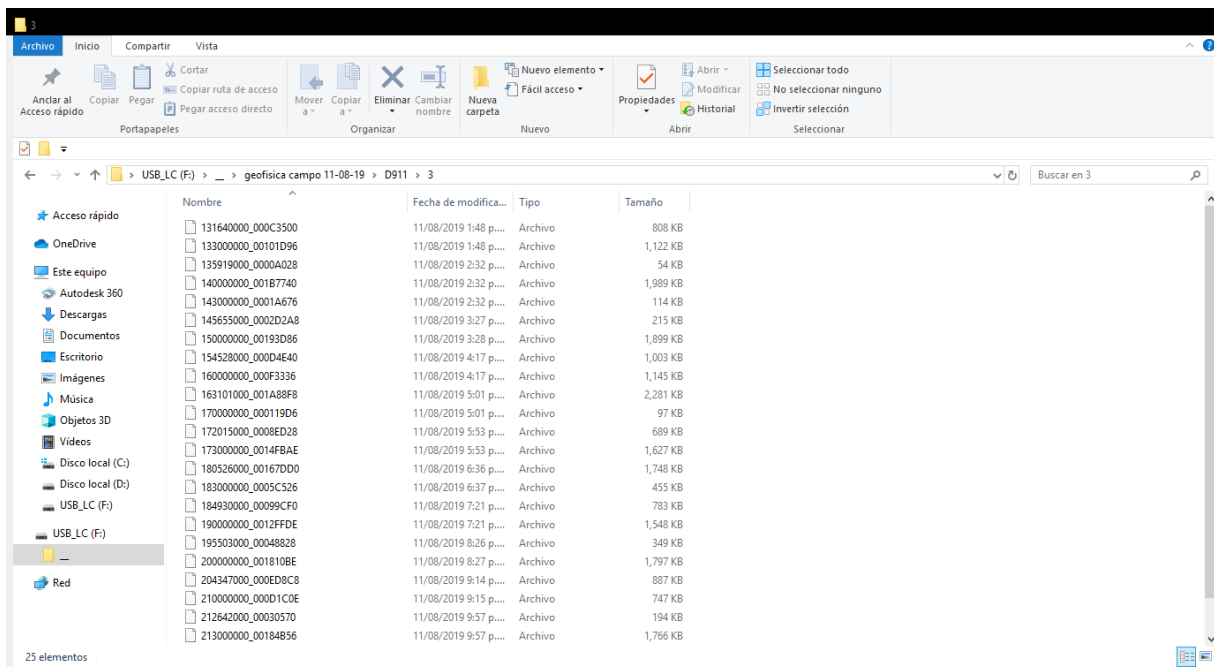


Figura N°31. Data obtenida por el acelerómetro



#### 4.6.4. RESULTADOS

Los resultados nos indican las condiciones de los suelos, cuál será su respuesta frente a los sismos, que zonas van a tener efectos inducidos; los datos de campo se procesan mediante el uso del programa Compass y Geopsy, estos programas nos ayudaran a analizar el tipo de suelo, la amplificación H/V y frecuencia de la onda emitida.

Los resultados nos han permitido estudiar el tipo de suelo, la amplificación sísmica, los periodos predominantes de los suelos y los efectos locales asociados a condiciones topográficas y perfiles de suelo representativos de esta ciudad. Además, nos permite predecir el comportamiento del suelo y análisis de los efectos locales de los diferentes sectores de la ciudad. Cabe indicar que la ciudad imperial se emplaza sobre diversos sedimentos lacustres inconsolidados los cuales sufrirían amplificaciones sísmicas en función a la naturaleza del suelo, espesor y nivel freático.

Cada uno de los registros se procesó siguiendo la técnica de Nakamura para determinar los periodos predominantes y la amplificación sísmica de los diferentes sectores. Adicionalmente, se realizó una recopilación de la información geotécnica disponible sobre estudios de suelos en la subcuenca del Cusco, logrando clasificar la litología, formación San Sebastián y las Rocas de acuerdo a la respuesta esperada.

Para la delimitación de los sectores se interpolaron las coordenadas y los periodos predominantes de los suelos, con las cuales se dibujó el mapa de Isoperiodos de la subcuenca del Cusco y se infirieron los efectos locales. Como resultado de este proceso se observa que la amplificación sísmica es el principal problema detectado, por el espesor del material inconsolidado y el agua subterránea en el valle del Cusco.

En este trabajo se midieron 29 puntos usando ruido sísmico ambiental, calculándose el Cociente Espectral H/V. Curvas de Isoperiodos de 0.06 seg a 0.79 seg., estos resultados nos permiten evaluar el peligro del valle del Cusco, mediante la construcción de mapas de isoperiodos i amplificación sísmica a partir de funciones de transferencia empíricas (FTE) del suelo obtenido con registros de ruido ambiental o microtemores (NHVSR, Noise Horizontal to Vertical Spectral Ratio). Con base en información previa sobre la geología, geomorfología, hidrogeología y otros estudios, se interpretan los resultados obtenidos y se generan mapas.



*Fotografía N° 05. Equipo de trabajo dirigido por el Mgt. Carlos Barrientos.*



*Fotografía N° 06. Instalación del Acelerómetro Ref Tek*

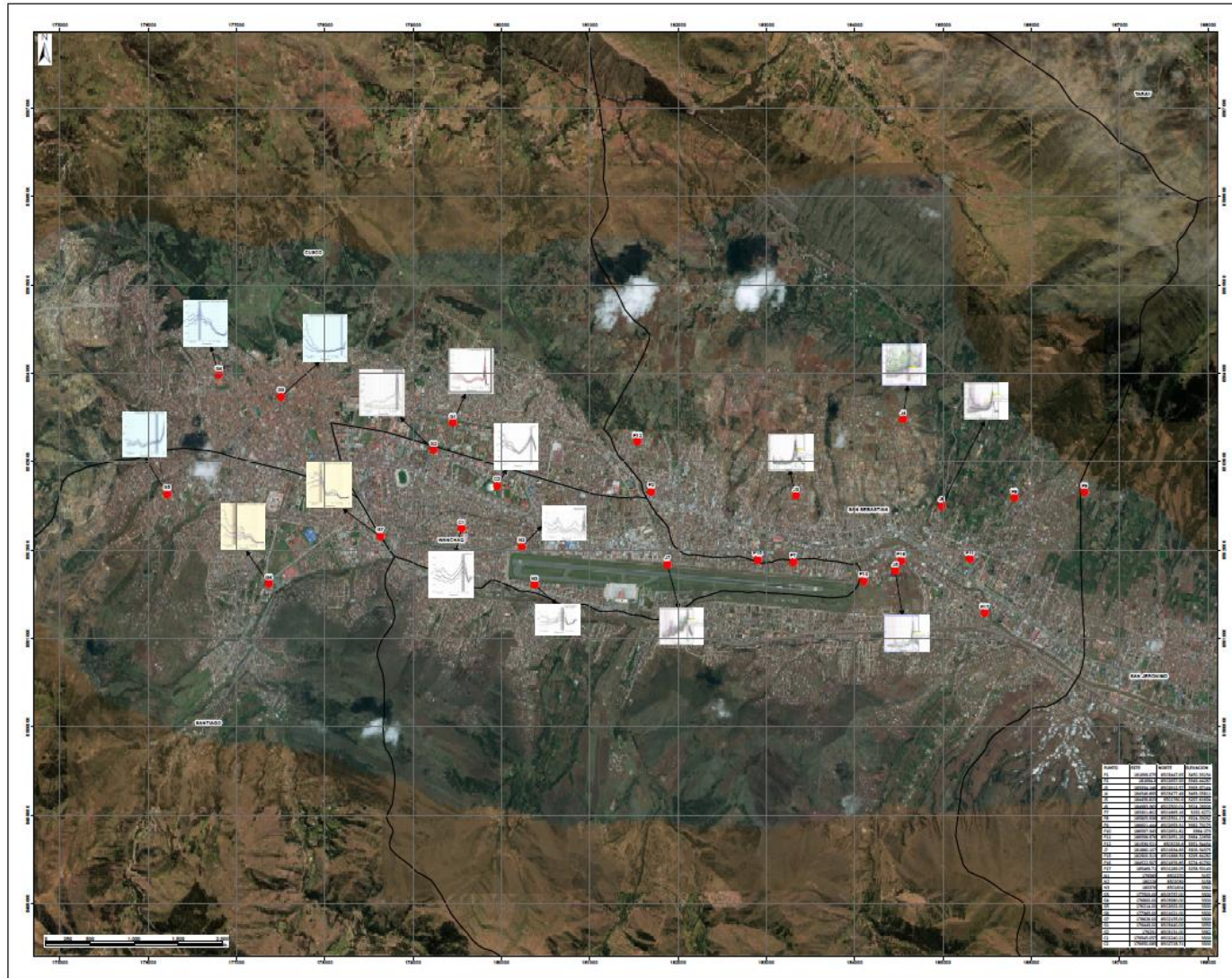


Figura N° 32. Medición del ruido sísmico ambiental para calcular Cociente Espectral H/V (29 Puntos)



#### 4.6.5. RESULTADOS PRINCIPALES DE LOS DATOS DE CAMPO

PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACION (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (seg)
P1	181699.08	8503447.65	3450.33	2.86	0.35
P2	181694.80	8502657.93	3349.44	6.13	0.16
J3	183334.15	8502612.57	3393.97	5.78	0.17
J4	184546.90	8503477.48	3483.06	4.61	0.22
J5	184456.82	8501760.90	3297.62	6.08	0.16
J6	184983.36	8502500.01	3324.29	5.70	0.18
P7	183301.80	8501865.16	3292.63	3.70	0.27
P8	185805.94	8502591.17	3324.33	7.26	0.14
P9	186601.44	8502653.31	3382.79	5.48	0.18
P10	186597.35	8502651.82	3384.07	6.13	0.16
P11	186598.98	8502651.28	3384.23	6.00	0.17
P12	181539.52	8503226.80	3351.94	6.79	0.15
J7	181880.11	8501834.83	3306.34	6.59	0.15
P15	182900.31	8501888.59	3295.64	6.24	0.16
P16	184522.51	8501876.85	3274.62	7.57	0.13
P17	185469.71	8501289.05	3258.53	6.33	0.16
N1	179585.00	8502270.00	3157.00	2.27	0.44
N2	180228.00	8502039.00	3158.00	13.50	0.07
N3	180376.00	8501604.00	3362.00	3.84	0.26
G3	177503.00	8503737.00	3300.00	14.81	0.07
G4	176800.00	8503980.00	3300.00	1.48	0.68
G5	176214.00	8502632.00	3300.00	9.57	0.10
G6	177365.00	8501621.00	3300.00	1.25	0.80
G7	178626.00	8502155.00	3300.00	1.26	0.79
G1	179449.00	8503440.00	3359.00	13.24	0.08
G2	179231.00	8503131.00	3362.00	12.28	0.08
C1	179545.06	8502240.21	3300.00	6.52	0.15
C2	179950.09	8502728.71	3300.00	9.51	0.11

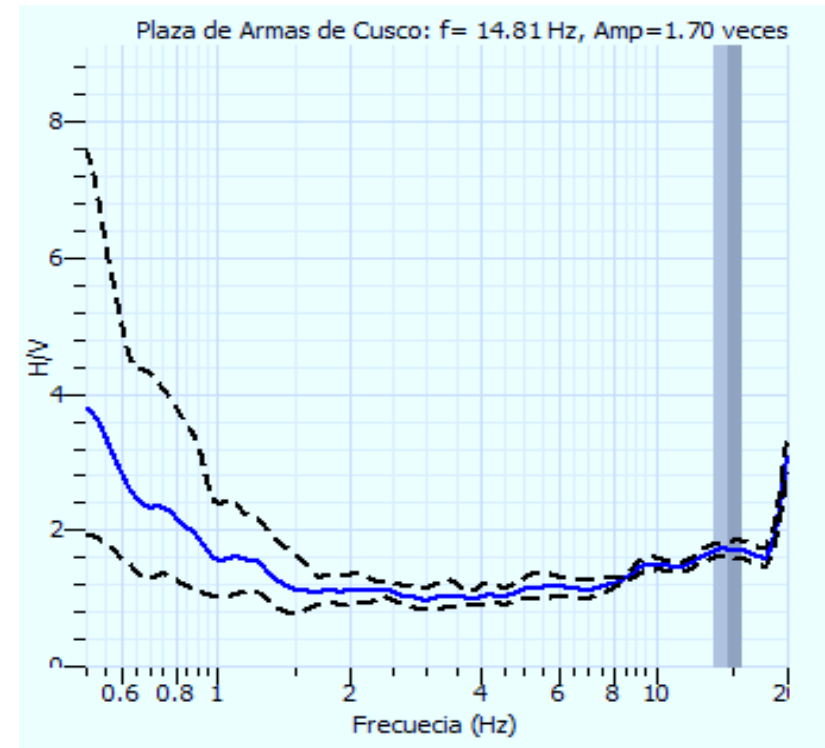


Tabla N° 14. Periodo y amplificación sísmica del suelo-centro histórico Cusco



PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACION (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (seg)
P1	181699.08	8503447.65	3450.33	2.86	0.35
P2	181694.80	8502657.93	3349.44	6.13	0.16
J3	183334.15	8502612.57	3393.97	5.78	0.17
J4	184546.90	8503477.48	3483.06	4.61	0.22
J5	184456.82	8501760.90	3297.62	6.08	0.16
J6	184983.36	8502500.01	3324.29	5.70	0.18
P7	183301.80	8501865.16	3292.63	3.70	0.27
P8	185805.94	8502591.17	3324.33	7.26	0.14
P9	186601.44	8502653.31	3382.79	5.48	0.18
P10	186597.35	8502651.82	3384.07	6.13	0.16
P11	186598.98	8502651.28	3384.23	6.00	0.17
P12	181539.52	8503226.80	3351.94	6.79	0.15
J7	181880.11	8501834.83	3306.34	6.59	0.15
P15	182900.31	8501888.59	3295.64	6.24	0.16
P16	184522.51	8501876.85	3274.62	7.57	0.13
P17	185469.71	8501289.05	3258.53	6.33	0.16
N1	179585.00	8502270.00	3157.00	2.27	0.44
N2	180228.00	8502039.00	3158.00	13.50	0.07
N3	180376.00	8501604.00	3362.00	3.84	0.26
G3	177503.00	8503737.00	3300.00	14.81	0.07
G4	176800.00	8503980.00	3300.00	1.48	0.68
G5	176214.00	8502632.00	3300.00	9.57	0.10
G6	177365.00	8501621.00	3300.00	1.25	0.80
G7	178626.00	8502155.00	3300.00	1.26	0.79
G1	179449.00	8503440.00	3359.00	13.24	0.08
G2	179231.00	8503131.00	3362.00	12.28	0.08
C1	179545.06	8502240.21	3300.00	6.52	0.15
C2	179950.09	8502728.71	3300.00	9.51	0.11

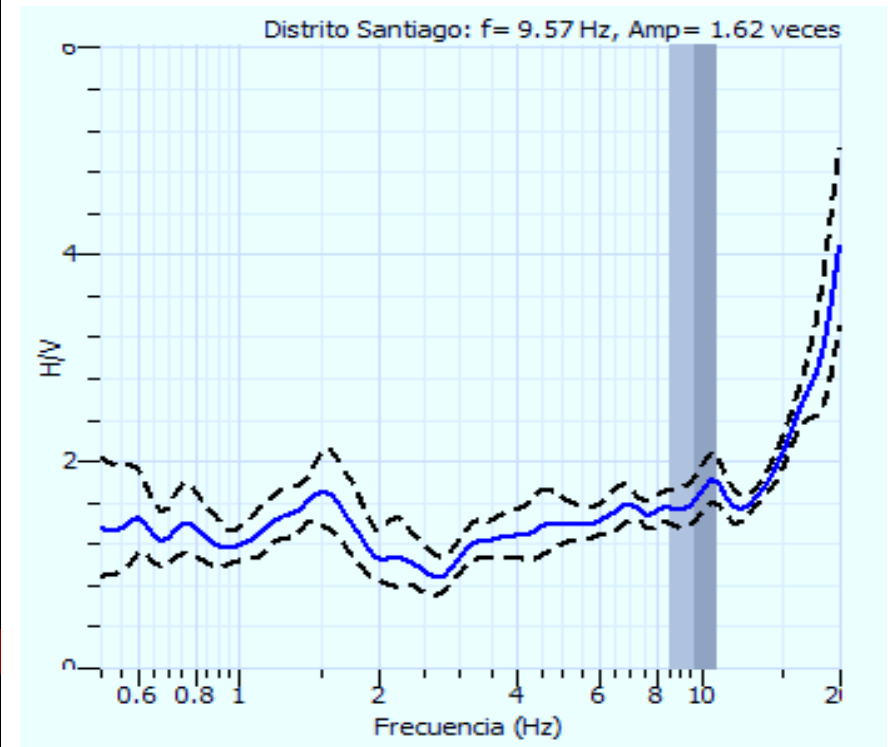


Tabla N° 15. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito Santiago





PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACION (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (seg)
P1	181699.08	8503447.65	3450.33	2.86	0.35
P2	181694.80	8502657.93	3349.44	6.13	0.16
J3	183334.15	8502612.57	3393.97	5.78	0.17
J4	184546.90	8503477.48	3483.06	4.61	0.22
J5	184456.82	8501760.90	3297.62	6.08	0.16
J6	184983.36	8502500.01	3324.29	5.70	0.18
P7	183301.80	8501865.16	3292.63	3.70	0.27
P8	185805.94	8502591.17	3324.33	7.26	0.14
P9	186601.44	8502653.31	3382.79	5.48	0.18
P10	186597.35	8502651.82	3384.07	6.13	0.16
P11	186598.98	8502651.28	3384.23	6.00	0.17
P12	181539.52	8503226.80	3351.94	6.79	0.15
J7	181880.11	8501834.83	3306.34	6.59	0.15
P15	182900.31	8501888.59	3295.64	6.24	0.16
P16	184522.51	8501876.85	3274.62	7.57	0.13
P17	185469.71	8501289.05	3258.53	6.33	0.16
N1	179585.00	8502270.00	3157.00	2.27	0.44
N2	180228.00	8502039.00	3158.00	13.50	0.07
N3	180376.00	8501604.00	3362.00	3.84	0.26
G3	177503.00	8503737.00	3300.00	14.81	0.07
G4	176800.00	8503980.00	3300.00	1.48	0.68
G5	176214.00	8502632.00	3300.00	9.57	0.10
G6	177365.00	8501621.00	3300.00	1.25	0.80
G7	178626.00	8502155.00	3300.00	1.26	0.79
G1	179449.00	8503440.00	3359.00	13.24	0.08
G2	179231.00	8503131.00	3362.00	12.28	0.08
C1	179545.06	8502240.21	3300.00	6.52	0.15
C2	179950.09	8502728.71	3300.00	9.51	0.11

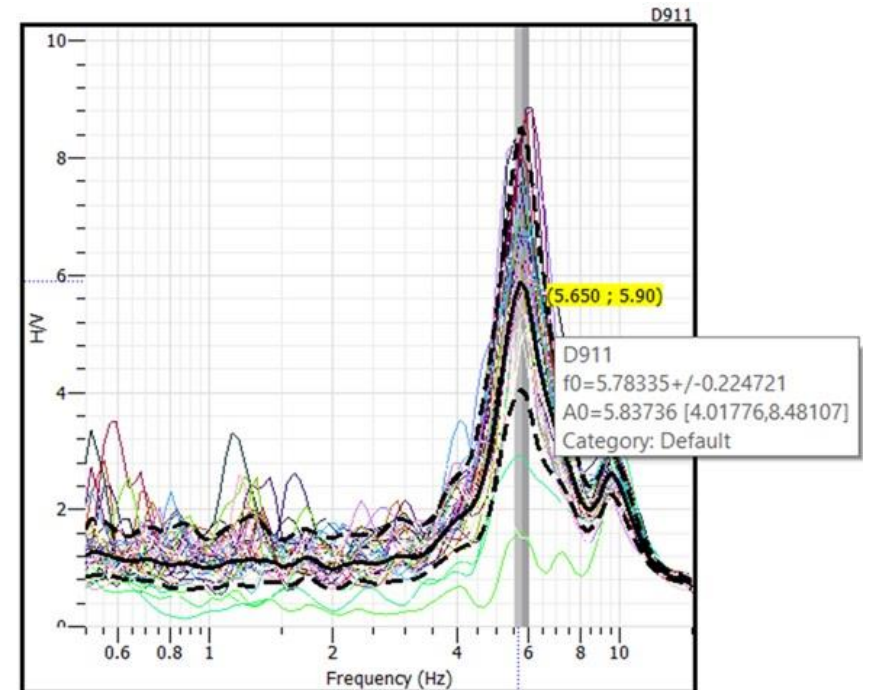


Tabla N° 16. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito San Sebastián.



PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACION (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (seg)
P1	181699.08	8503447.65	3450.33	2.86	0.35
P2	181694.80	8502657.93	3349.44	6.13	0.16
J3	183334.15	8502612.57	3393.97	5.78	0.17
J4	184546.90	8503477.48	3483.06	4.61	0.22
J5	184456.82	8501760.90	3297.62	6.08	0.16
J6	184983.36	8502500.01	3324.29	5.70	0.18
P7	183301.80	8501865.16	3292.63	3.70	0.27
P8	185805.94	8502591.17	3324.33	7.26	0.14
P9	186601.44	8502653.31	3382.79	5.48	0.18
P10	186597.35	8502651.82	3384.07	6.13	0.16
P11	186598.98	8502651.28	3384.23	6.00	0.17
P12	181539.52	8503226.80	3351.94	6.79	0.15
J7	181880.11	8501834.83	3306.34	6.59	0.15
P15	182900.31	8501888.59	3295.64	6.24	0.16
P16	184522.51	8501876.85	3274.62	7.57	0.13
P17	185469.71	8501289.05	3258.53	6.33	0.16
N1	179585.00	8502270.00	3157.00	2.27	0.44
N2	180228.00	8502039.00	3158.00	13.50	0.07
N3	180376.00	8501604.00	3362.00	3.84	0.26
G3	177503.00	8503737.00	3300.00	14.81	0.07
G4	176800.00	8503980.00	3300.00	1.48	0.68
G5	176214.00	8502632.00	3300.00	9.57	0.10
G6	177365.00	8501621.00	3300.00	1.25	0.80
G7	178626.00	8502155.00	3300.00	1.26	0.79
G1	179449.00	8503440.00	3359.00	13.24	0.08
G2	179231.00	8503131.00	3362.00	12.28	0.08
C1	179545.06	8502240.21	3300.00	6.52	0.15
C2	179950.09	8502728.71	3300.00	9.51	0.11

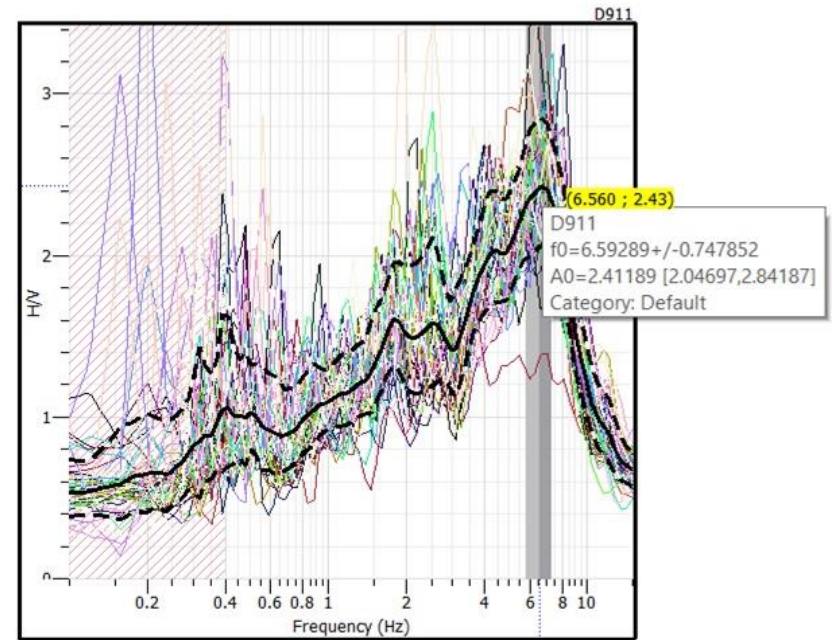


Tabla N° 17. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito Wánchaq- parque industrial



PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACION (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (seg)
P1	181699.08	8503447.65	3450.33	2.86	0.35
P2	181694.80	8502657.93	3349.44	6.13	0.16
J3	183334.15	8502612.57	3393.97	5.78	0.17
J4	184546.90	8503477.48	3483.06	4.61	0.22
J5	184456.82	8501760.90	3297.62	6.08	0.16
J6	184983.36	8502500.01	3324.29	5.70	0.18
P7	183301.80	8501865.16	3292.63	3.70	0.27
P8	185805.94	8502591.17	3324.33	7.26	0.14
P9	186601.44	8502653.31	3382.79	5.48	0.18
P10	186597.35	8502651.82	3384.07	6.13	0.16
P11	186598.98	8502651.28	3384.23	6.00	0.17
P12	181539.52	8503226.80	3351.94	6.79	0.15
J7	181880.11	8501834.83	3306.34	6.59	0.15
P15	182900.31	8501888.59	3295.64	6.24	0.16
P16	184522.51	8501876.85	3274.62	7.57	0.13
P17	185469.71	8501289.05	3258.53	6.33	0.16
N1	179585.00	8502270.00	3157.00	2.27	0.44
N2	180228.00	8502039.00	3158.00	13.50	0.07
N3	180376.00	8501604.00	3362.00	3.84	0.26
G3	177503.00	8503737.00	3300.00	14.81	0.07
G4	176800.00	8503980.00	3300.00	1.48	0.68
G5	176214.00	8502632.00	3300.00	9.57	0.10
G6	177365.00	8501621.00	3300.00	1.25	0.80
G7	178626.00	8502155.00	3300.00	1.26	0.79
G1	179449.00	8503440.00	3359.00	13.24	0.08
G2	179231.00	8503131.00	3362.00	12.28	0.08
C1	179545.06	8502240.21	3300.00	6.52	0.15
C2	179950.09	8502728.71	3300.00	9.51	0.11

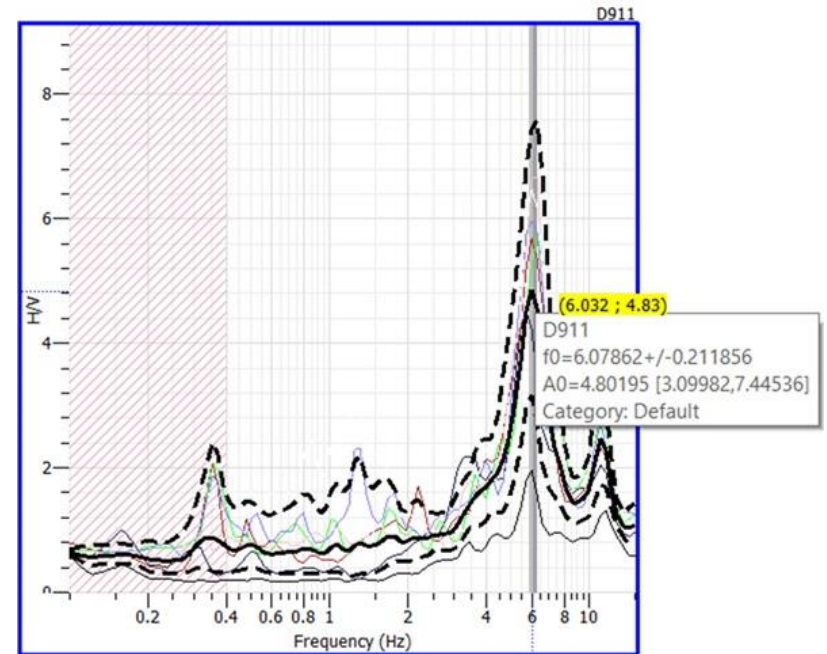


Tabla N° 18. Periodo y amplificación sísmica del suelo, distrito San Sebastián-Alto Qosqo Pumamarca.

#### 4.6.6. MAPA DE ISO PERIODOS

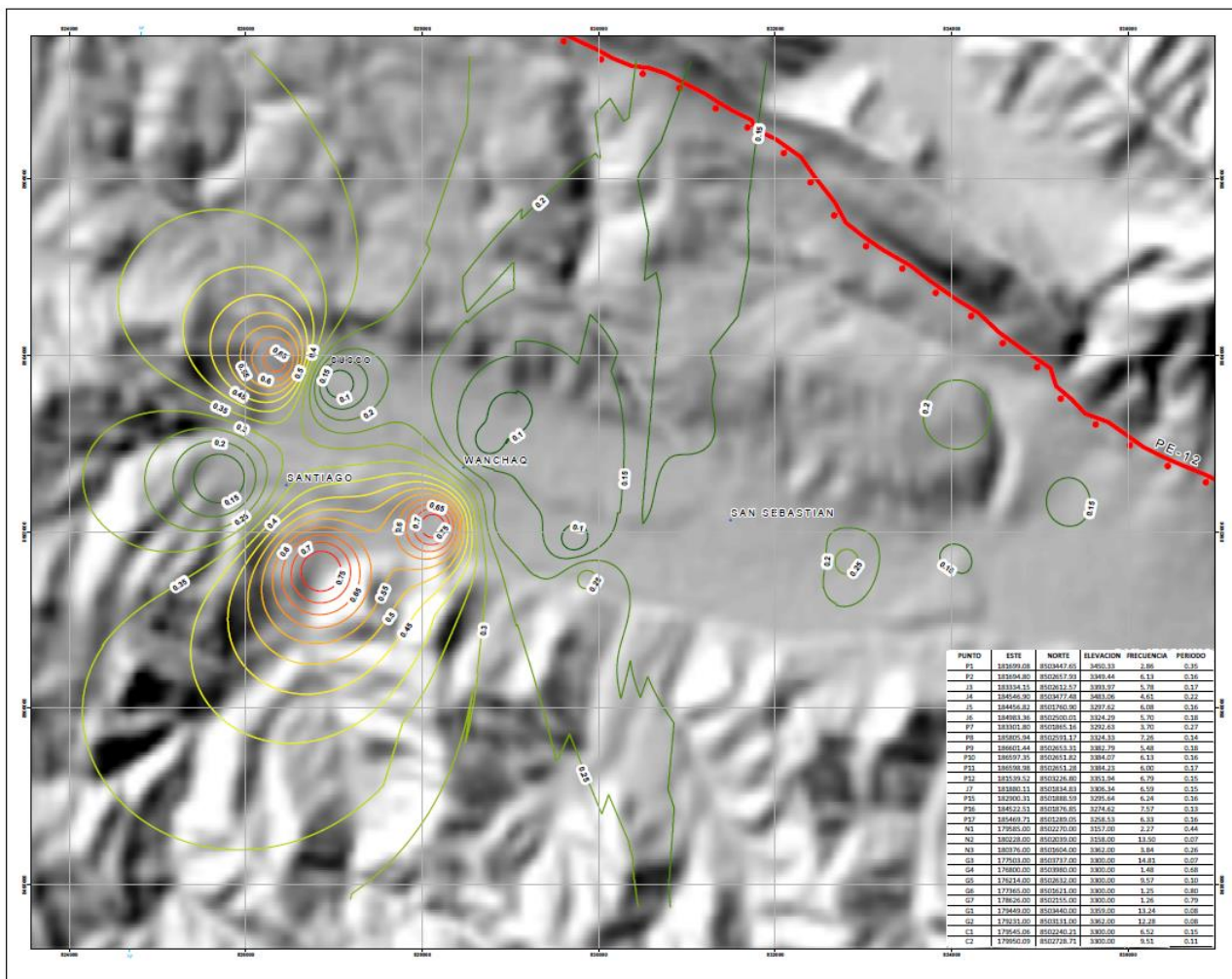


Figura N° 33. Mapa de Iso periodos  $1/f = T$ ,  $f =$  frecuencia,  $T =$  Periodo

#### Evaluación de las Características Dinámicas de los Suelos

Los periodos predominantes de los suelos se obtuvieron con el acelerómetro triaxial, el equipo nos determina las frecuencias y periodos de los suelos, utilizando la vibración ambiental del suelo lacustre de la ciudad Imperial.

El **periodo fundamental del suelo (Ts)**, es muy importante para estimar los efectos locales de los suelos, se halló mediante el cociente espectral H/V, nos determinan la calidad de los suelos, los cuales nos pueden ayudar a predecir los daños que se producirían en las construcciones, en algunos casos puede aparecer el fenómeno de resonancia en el cual tanto



el suelo como la estructura oscilan en forma sincronizada y la estructura sometida a esfuerzos vibratorios y desplazamientos, los cuales terminan en un colapso.

La ubicación de los puntos se determinó en base a un mapeo geológico, datos de las calicatas, estudios geofísicos, columnas estratigráficas realizadas en la ciudad, el número de puntos fueron 29, en plazas, lugares públicos en general.

### **Evaluación e interpretación de las mediciones**

Se realizaron varios registros en la ciudad del Cusco, los datos se procesaron en los softwares Compass, Geopsy los cuales nos determinan las frecuencias, periodos y amplificación sísmica de los suelos lacustres de la ciudad.

Con los resultados de los periodos se interpolan y se hallan los mapas de isoperiodos, se agruparon en rangos y de los resultados nos darán las diferentes zonas de la ciudad. Además, nos muestra los diferentes rangos y las 4 posibles zonas en la ciudad del Cusco:

**Zona I**, periodos de 0.1 seg. a 0.3seg, suelos tipo S1, con litología de roca y roca fracturada, coluviales están ubicadas en la parte sur en las faldas de los cerros, que presentan un comportamiento de suelo rígido. Sin presencia de agua subterránea

**Zona II**, periodos intermedios entre 0.3 seg. a 0.4 seg, suelos tipo S2 comprende los depósitos de la formación san Sebastián, depósitos de conos aluviales, canales entrelazados, están ubicados en la parte noroccidental y centro histórico de la ciudad. Sin presencia de agua subterránea

**Zona III**, periodos altos con valores de 0.4 seg. a 0.5 seg, suelos tipo S3 comprende la zona de los distritos de Wánchaq, san Sebastián y san Jerónimo depósitos de limos.

**Zona IV**, periodos altos con valores de 0.5 seg. a 0.6 seg, suelos tipo S4, comprende la zona de los distritos de Wánchaq, san Sebastián y san Jerónimo depósitos de limos.

**Zona V**, con períodos mayores a 0.7 seg, suelos tipo S4, estos nos dieron en la parte Sureste de la ciudad con depósitos de llanura de inundación con presencia de agua subterránea.

En conclusión, los períodos de vibración natural aumentan de noroccidental a sureste, ya que en el norte se encuentran los suelos gravosos.

Los resultados obtenidos muestran que la Subcuenca del Cusco tiene diversos tipos de suelos y amplificación sísmica y que el uso de vibración ambiental es una excelente alternativa, debido a que los periodos de retorno de los terremotos son muy largos.

#### 4.7. PELIGRO SÍSMICO DE LA SUB CUENCA DEL CUSCO EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD DE LA TIERRA.

Los efectos de las condiciones locales son muy importantes, determinan la presencia de licuefacción de suelos, amplificaciones sísmicas. El comportamiento geotécnico de los suelos de la ciudad del Cusco es muy variado y diversificado, las gravas y arenas que muestran compactación son muy buenas para la cimentación, esas mismas gravas y arenas cuando se hallan saturadas de agua son regulares a malas. **(Plano 1)** Se tomo en cuenta el mapeo geológico con columnas estratigráficas de la formación San Sebastián, secciones estructurales, periodos predominantes de los suelos y el agua subterránea, además de los criterios de:

- “A mayor espesor de suelos, mayor amplificación de la aceleración.
- Las propiedades de los suelos de la formación San Sebastián influyen en la amplificación.
- A mayor profundidad del sustrato, mayor periodo de vibración.
- La presencia de un nivel freático alto y suelos blandos arenas, puede dar una licuefacción.
- La cercanía al sistema de Fallas amplifica las aceleraciones e induce a roturas superficiales.
- El efecto topográfico aumenta las aceleraciones” (Vallejo, 2002)

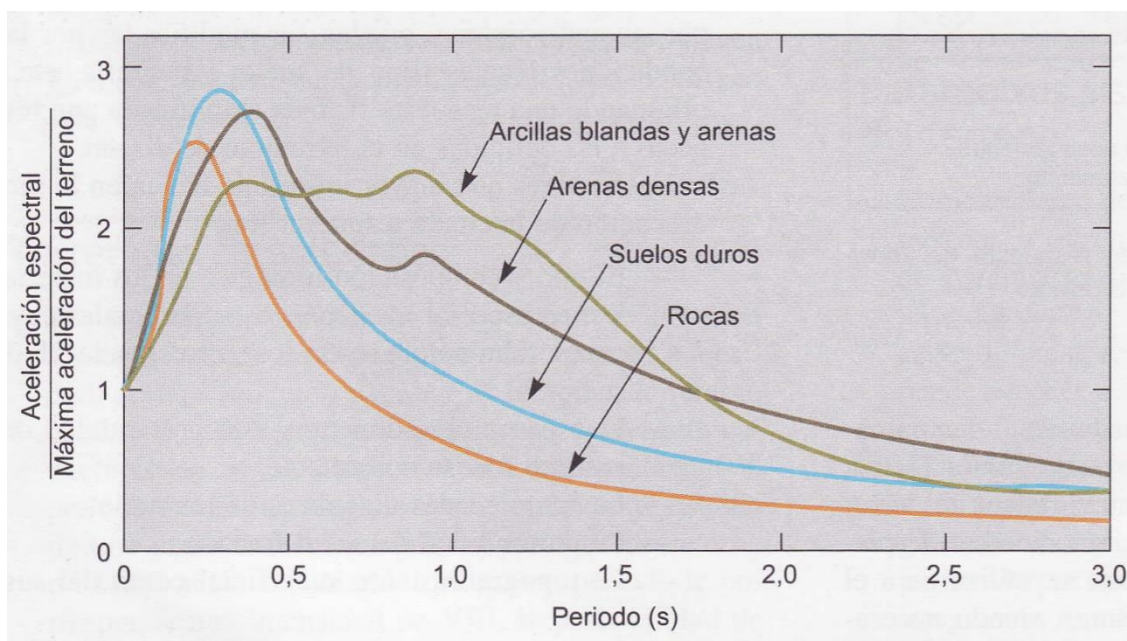
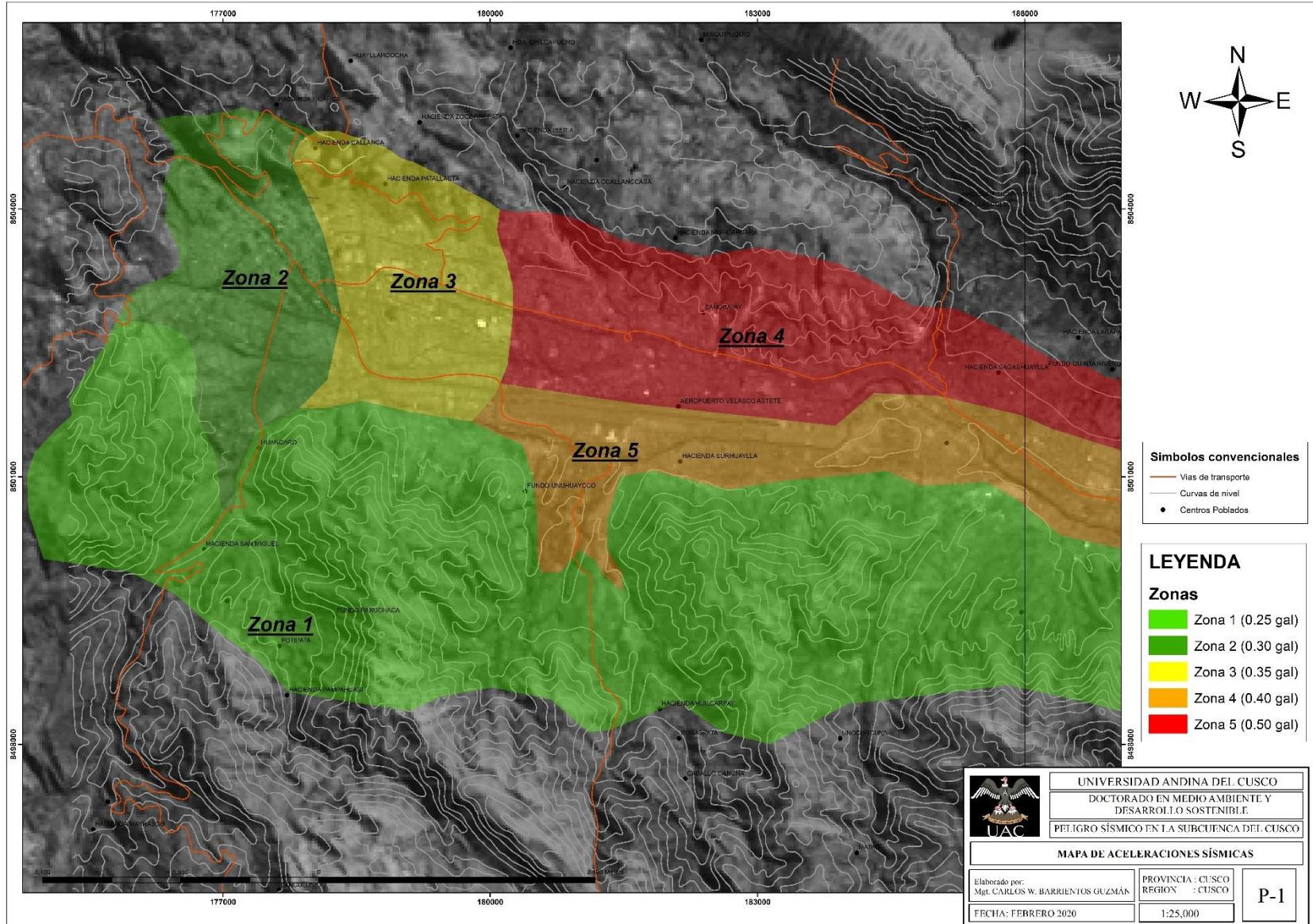


Figura N° 34. Influencia del tipo de suelos en la aceleración espectral

Este mapa es una primera aproximación de acercamiento a que aceleraciones se produciría en un terremoto en la ciudad del Cusco. (Aceleración de la gravedad = 981Gal)





#### **4.8. ANALISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA PELIGROSIDAD SISMICA EN LA CIUDAD DEL CUSCO**

Los mapas de susceptibilidad de peligrosidad sísmica son herramientas importantes elaboradas en el GIS y fundamentales para la prevención y mitigación de desastres, es un instrumento esencial para el ordenamiento territorial y la planificación.

Uno de los ejes centrales del desarrollo sostenible lo constituye el manejo apropiado de los peligros y riesgos para la prevención de los desastres, es importante un mapa de peligrosidad para lo siguiente:

- Para conocer nuestro entorno y en consecuencia estar preparados con el conocimiento del peligro de nuestro territorio.
- Es un instrumento para el ordenamiento territorial de la ciudad del Cusco.
- Para planificar el desarrollo de la ciudad del Cusco.
- Para desarrollar políticas educativas y construcciones sismorresistentes
- Para elaborar planes de emergencia ante sismos.

$$\text{SUSCEPTIBILIDAD} = (\text{FC} * \text{PP}) + (\text{FD} + \text{PP})$$

$$\text{PELIGRO} = \text{S}(\text{PP}) + \text{PE}(\text{PP})$$

FC=Factores condicionantes

FD=Factores desencadenantes

PP=Peso ponderado

PE=Parámetros de evaluación.

##### **4.8.1. PARÁMETROS Y DESCRIPTORES PONDERADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD.**

La susceptibilidad es la probabilidad de que el peligro sísmico suceda, está determinada por

Por los parámetros de evaluación, factores condicionantes, factores desencadenantes.

Los pesos ponderados se obtienen del proceso de *“Proceso de Análisis Jerárquico”*

Thomas L. Saaty (1980).





### A. PARAMETROS DE EVALUACIÓN

PARAMETROS DE EVALUACIÓN	SIMBOLO	PESOS PONDERADOS (W)%
Intensidad	M	48%
Magnitud	I	29%
Aceleración de los suelos	AS	15%
Amplificación sísmica	A	8%
<b>TOTAL</b>	- -	<b>100%</b>

*Tabla N° 19. Pesos ponderados de los parámetros de evaluación, los pesos están en función a la influencia del parametro*

### B. FACTORES CONDICIONANTES

FACTOR CONDICIONANTE	SIMBOLO	PESOS PONDERADOS (W)%
Litología	L	49%
Geomorfología	P	27%
Hidrogeología	G	14%
Geotecnia	CV	10%
<b>TOTAL</b>	- -	<b>100%</b>

*Tabla N° 20. Pesos ponderados de los factores condicionantes.*

### C. FACTORES DESENCADENANTES

FACTOR DESENCADENANTE	SIMBOLO	PESOS PONDERADOS (W)%
Actividad sísmica	ASI	100%
<b>TOTAL</b>	- -	<b>100%</b>

*Tabla N° 21. Pesos ponderados de los factores desencadenantes.*



#### D. ESTRATIFICACIÓN DEL NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD AL PELIGRO SISMICO

NIVEL	PESOS PONDERADOS, indican la importancia deben sumar uno
MUY ALTO	0.415
ALTO	0.299
MEDIO	0.157
BAJO	0.084
MUY BAJO	0.045

Tabla N° 22. PROCESO DE ANALISIS JERARQUICO (Thomas L. Saaty (1980).

**Peligro Sísmico**, “es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno sísmico, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos. Cuando la energía sísmica es liberada, ésta se propaga por medio de ondas a través de todo el interior de la Tierra. Dos ondas internas y 2 ondas superficiales que influyen en el daño de las estructuras de las viviendas” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014).

- Magnitud del sismo
- Duración
- Respuesta del sitio.



### TIPOS DE PELIGROS NATURALES Y ANTROPICOS

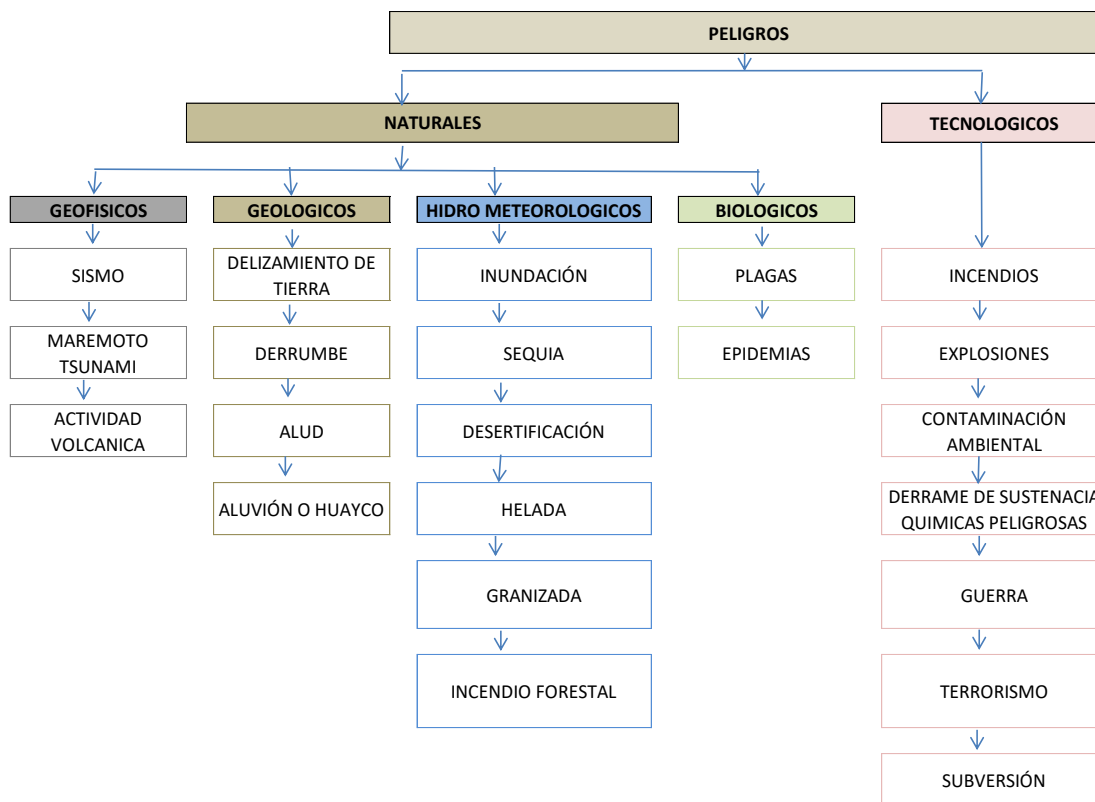


Diagrama N° 03. Tipos de peligros naturales y antrópicos.

### PROCESO DE ANALISIS JERARQUICO (PAJ):

“El proceso fue ideado por Thomas L. Saaty (1980) hecho para problemas complejos de criterios múltiples. Es una metodología empleada por el SINAGERD” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014).

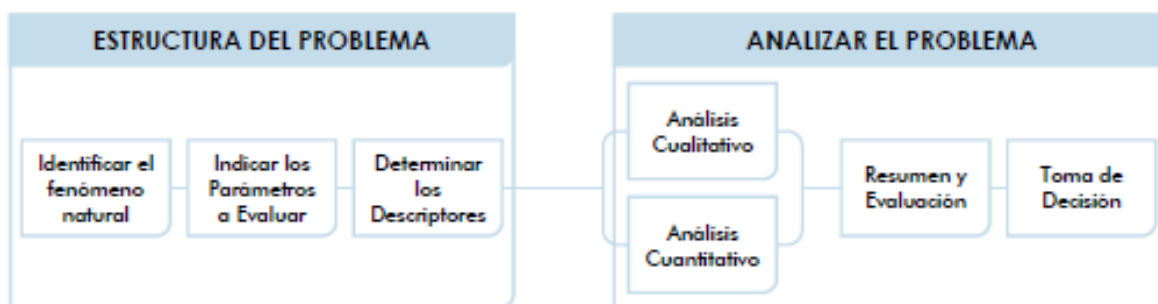


Diagrama N° 04. Proceso de análisis jerárquico.

## IDEA GENERAL DE LA METODOLOGIA PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

Es muy práctico se descompone un problema complejo en jerarquías, donde cada nivel es descompuesto en elementos específicos. Este método nos permite descomponer, como mínimo en tres niveles.

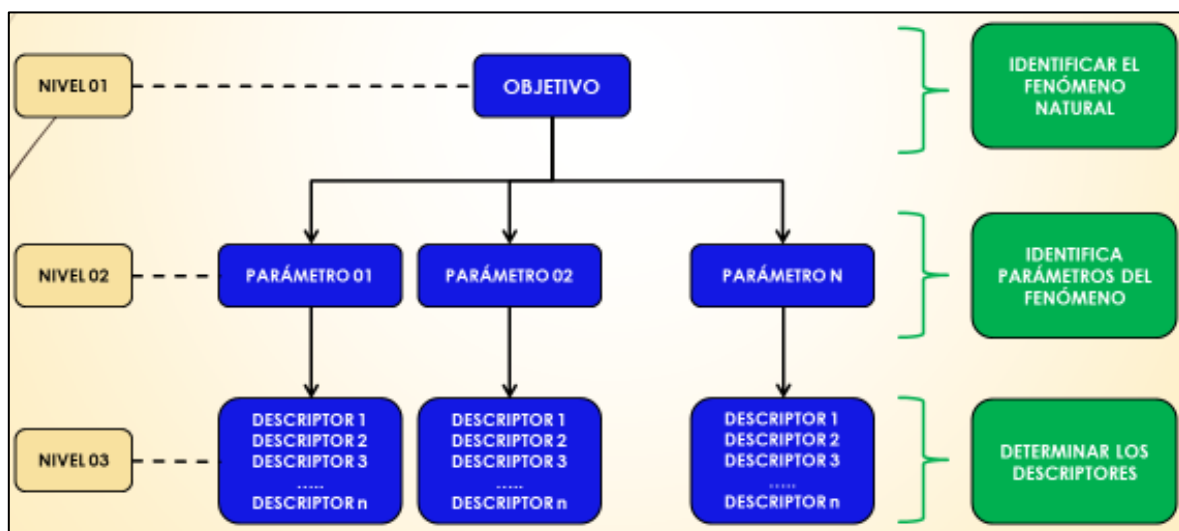


Diagrama N° 05. Niveles del proceso de análisis jerárquico

## METODO MULTICRITERIO

Para la ponderación de los criterios, sub criterios y descriptores se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico el cual es un método multicriterio que permite incorporar criterios cuantitativos (infraestructura expuesta, pérdidas humanas, económicas, etc.) y cualitativos (programas de capacitación, creación y/o aplicación de la normatividad, etc.) que son considerados en la Gestión del Riesgo de Desastres. La matriz que se forma es una matriz cuadrada es decir el mismo número de filas y columnas.



## ESCALA DE THOMAS SAATY

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo
7	Mucho más importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo.
5	Mas importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Muchos menos importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que....	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente muchísimo menos importante o preferido que el segundo.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

*Tabla N° 23. Escala de Thomas Saaty*

## PARAMETROS DE EVALUACION.

Los pesos ponderados nos indican que los sismos en la Región del Cusco se caracterizan por ser de gran Intensidad, magnitud moderada, con aceleraciones de los suelos y amplificaciones sísmicas debido al material inconsolidado de la subcuenca del Cusco.

PARAMETRO	Peso Ponderado
Intensidad	0.476
Magnitud	0.288
Aceleración del suelo	0.154
Amplificación sísmica	0.081
<b>TOTAL</b>	<b>1.000</b>

*Tabla N° 24. Valores hallados con la matriz de Saaty 4x4*



## FACTORES CONDICIONANTES

Se han considerado como factores condicionantes del territorio a las unidades litológicas, geomorfología, unidades hidrogeológicas y geotecnia. Como factor desencadenante a la sismicidad de las fallas tectónicas.

Los valores numéricos (pesos) fueron obtenidos mediante el proceso de *“Proceso de Análisis Jerárquico”* Thomas L. Saaty (1980), cuya escala es:

PARAMETRO	DESCRIPTORES	Pesos Ponderados
UNIDADES LITOLOGICAS	formación San Sebastián	0.446
	depósitos aluviales	0.285
	depósitos fluviales	0.145
	formación Chincheros	0.077
	roca fracturada, formación Kayra	0.046
	<b>Total</b>	1.000

PARAMETRO	DESCRIPTORES (°)	Peso Ponderado
UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	fondo de valle	0.340
	ladera baja	0.413
	ladera media	0.144
	ladera alta	0.068
	altiplanicies	0.035
	<b>Total</b>	1.000

PARAMETRO	DESCRIPTORES	PESO PONDERADO
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	acuífero detrítico	0.431
	acuífero fisurado	0.295
	acuicludo	0.168
	acuitardo	0.074
	acuifugo	0.033
	<b>Total</b>	1.000

PARAMETRO	DESCRIPTORES	Vector Priorización
GEOTECNIA	arcillas	0.449
	limos	0.291
	arenas finas	0.151
	arenas gruesas	0.073
	gravas	0.037
	<b>Total</b>	1.000

Tabla N° 25. Pesos ponderados de los factores condicionantes-elaboración propia



**FACTOR DESENCADENANTE**

PARAMETRO	DESCRIPTORES	PESO PONDERADO
ACTIVIDAD SISMICA (sismicidad)	Falla Tambomachay	0.417
	Probable Falla Cusco	0.274
	Falla Pachatusan	0.164
	Falla Qoricocha	0.094
	Falla Chincheros	0.051
	<b>Total</b>	1.000

*Tabla N° 26. Pesos ponderados de los factores desencadenantes- elaboración propia*



## MAPA DE PELIGROSIDAD DE LA CIUDAD DEL CUSCO

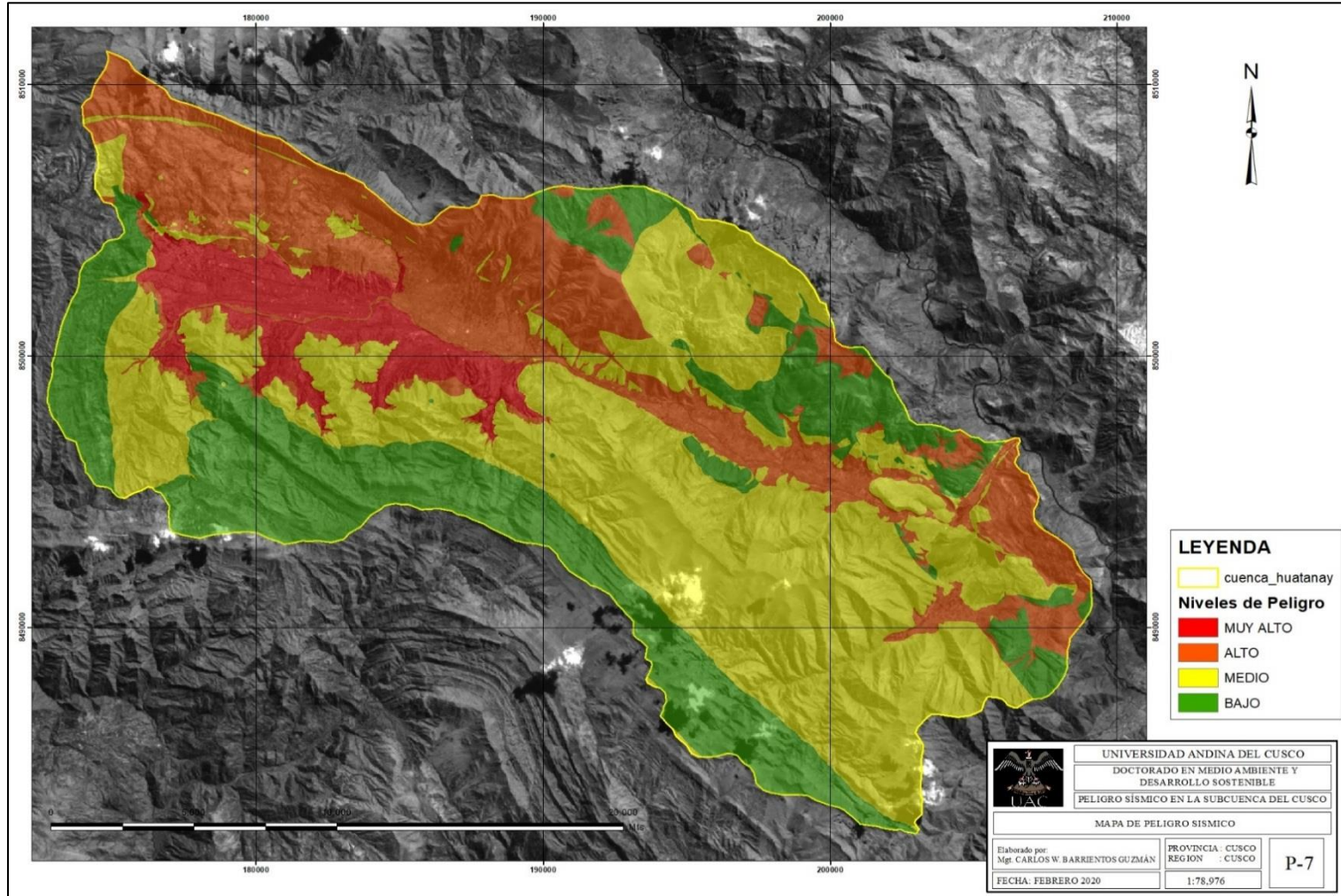






Tabla N° 27. Niveles de peligro

Niv. Peligro	DESCRIPCIÓN	RANGOS
MUY ALTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>En el fondo del valle del Cusco el peligro sísmico es muy alto, especialmente los distritos de Wánchaq, San Sebastián, san Jerónimo, por tener mayor espesor de suelos, depósitos palustres, lacustres y llanuras de inundación y depósitos cuaternarios con nivel freático alto y suelos muy blandos con presencia de licuefacción de suelos. El peligro aumenta en el distrito de San Jerónimo por la cercanía a la falla de Tambomachay puede amplificar las aceleraciones e inducir roturas superficiales. En general el fondo del valle tiene suelos inconsolidados, con amplificación de las ondas sísmicas, se deben tener en cuenta este parámetro para la construcción de infraestructura, teniendo en cuenta la Norma Sismoresistente 030, que rige para todo el territorio peruano.</li> </ul>	$0.283 \leq R \leq 0.449$
ALTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>El peligro Alto, se presenta en la parte norte de la ciudad del cusco y en la parte proximales de las microcuencas, con depósitos de conos aluviales con predominancia de gravas, arenas gruesas, estos suelos geotécnicamente tienen regulares condiciones en la respuesta sísmica. El espesor de los suelos es muy delgado con pequeñas amplificaciones.</li> </ul>	$0.148 \leq R < 0.283$
MEDIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>El peligro medio es en los macizos rocosos poco fracturados, como la formación Kayra, Soncco, Mitú. Con una buena respuesta sísmica. Estos afloramientos se encuentran en las pendientes de los cerros donde hay pocas obras de infraestructura.</li> </ul>	$0.079 \leq R < 0.148$
BAJO	<p>Esta zona compuesta por Macizo rocoso muy poco fracturado y alejado de la falla geológica como la formación Kayra, que es una arenisca feldespática con un buen índice de calidad de la roca, se puede calificar como un buen macizo en razón de la homogeneidad de sus estructuras y además las capas buzan al sur en contra de la pendiente, lo que les da estabilidad a sus taludes.</p>	$0.040 \leq R < 0.079$



#### 4.9. LINEAMIENTOS GENERALES DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE DESASTRES, EN LA SUBCUENCA DEL CUSCO.

La peligrosidad sísmica, es el evento que tiene la mayor energía para la destrucción en las viviendas y pérdida de vidas humanas en la provincia del Cusco. En la actualidad en la provincia del Cusco hay 500,000 personas, hay gran cantidad de viviendas de adobe con antigüedades de 100 años, las viviendas de ladrillo en su mayor parte fueron construidas artesanalmente sin tener en cuenta la Norma Sismorresistente 030, en el caso de un sismo de magnitud 6.6 ML las pérdidas humanas deben ser de miles personas y pérdidas materiales de varios miles de millones de dólares, trabajando en la vulnerabilidad sísmica se puede reducir en un 50% la pérdida de vidas humanas.

La litología de la ciudad de Cusco, es compleja se encuentra sobre un material blando lacustre, con un nivel freático superficial en algunos sectores y rodeada por el sistema de fallas Cusco, el peor escenario sísmico que se considera en este estudio es el originado por un sismo con epicentro en la falla Tambomachay y la probable falla Cusco.

PARAMETROS SISMICOS	
MAGNITUD	6.6 Mw
PROFUNDIDAD	12 Km.
BUZAMIENTO	65 SO

Tabla N° 27. Parámetros del probable sismo originado por la falla de Tambomachay.

*Elaboración propia.*

“El Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SINAGERD, fue elaborado mediante la Ley N° 29664, su objetivo es identificar, mitigar y reducir todos los riesgos asociados a peligros sísmicos y movimientos en masa, así como evitar la generación de nuevos riesgos, y preparación y atención ante situaciones de desastres mediante el establecimiento de principios, lineamientos de políticas,



componentes, procesos e instrumentos de la Gestión del Riesgo de Desastres” (CENEPRED, Manual Para La Evaluacion de Riegos , 2014).

Los gobiernos Regionales y Locales deberán incorporar los siguientes instrumentos:

#### **4.9.1. LOS GOBIERNOS REGIONALES Y LOCALES DEBEN:**

- Desarrollar el plan de desarrollo urbano, incorporando los procesos y componentes de la Gestión del riesgo de desastres, siendo el peligro sísmico el más destructible, y que la ciudad imperial tenga un crecimiento de desarrollo sostenible.
- Considerar los trabajos de Investigación de las universidades para las evaluaciones de riesgos y tomar las decisiones más apropiadas en la priorización de proyectos y estos sean ubicados en zonas de bajo riesgo.
- Elaborar normas y directivas la gerencia de Gestión del Riesgo del Gobierno regional con el CENEPRED, para incorporarlos en los niveles de gobierno distrital y provincial.
- Generar presupuestos especiales para los proyectos de reducción de riesgos, el peligro debe ser caracterizado mediante una investigación detallada con las universidades y escuelas de posgrado, seguidamente el estudio de la vulnerabilidad en lo social, económico y ambiental para tener un desarrollo sostenible de la ciudad del Cusco.
- Elaborar Medidas Estructurales y no Estructurales, mediante proyectos para la prevención, mitigación de los efectos de un terremoto.
- Realizar convenios con Instituciones locales, nacionales e internacionales, teniendo como aliado principal a las universidades con participación de la comunidad.

#### **Plan de Prevención y elaboración de mapas de microzonificación del peligro sísmico**

Para los planes de prevención en la subcuenca del Cusco se ha caracterizado el sistema de fallas Cusco, su litología del valle del cusco, sísmica histórica y peligros asociados, ha sido complementada con mapeos Geológicos, Geotécnica, Geofísica, ingeniería sismorresistente. La caracterización geológica fue muy importante para determinar las zonas que tendrán efectos de sitio como aceleraciones elevadas y amplificaciones sísmicas, licuefacción son los peligros potencialmente más serios relacionados con los sismos. Para la obtención del mapa

de Peligrosidad Sísmica incluyendo el efecto de sitio, se combinó los mapas Litológicos, Estructural, Hidrogeológico, Geotécnico; estos mapas temáticos sirven a las municipalidades para el otorgamiento de licencias de construcción, se debe considerar todos estos parámetros para prevención y seguridad de la Ciudad del Cusco, porque casi la totalidad de las viviendas se encuentra sobre suelos incompetentes.

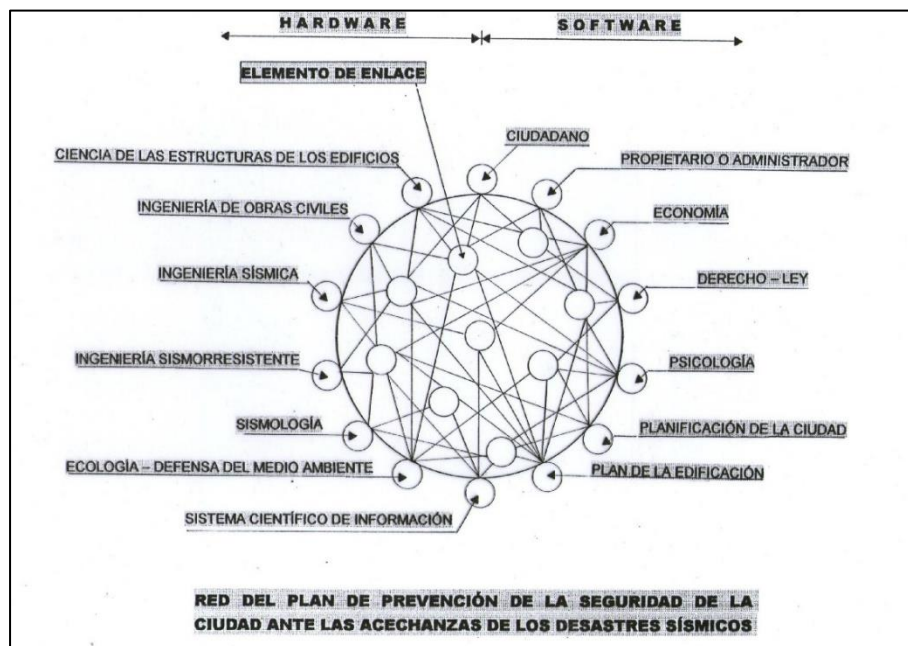


Figura N° 35. Parámetros del plan de prevención.

#### 4.9.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO Y SU ACEPTABILIDAD

Es posible tener un escenario de evaluación de la peligrosidad Sísmica y los efectos de la vulnerabilidad con sus factores exposición, fragilidad y resiliencia. Elementos del riesgo y tener un supuesto escenario del grado de destrucción que ocasionaría el evento sísmico, que nos serviría para realizar un reforzamiento en las estructuras antiguas y viviendas de adobe.

##### A) Medidas de mitigación de sismos

En los sismos se puede reducir la vulnerabilidad sísmica, evaluando las construcciones, con la microzonificación sísmica caracterizar los tipos de suelos. El estudio del cociente espectral H/V es la más idónea para la microzonificación sísmica como un



insumo para el plan de ordenamiento territorial de la ciudad del Cusco, norma técnica 030 Diseño Sismoresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones. Es importante el análisis de las construcciones, estabilización de terrenos de relleno, establecimiento de sistemas de alertas y distribución de pérdidas.

Las medidas de prevención y mitigación deben estar a cargo del gobierno regional y municipalidades. Se debe incluir la Gestión Prospectiva y Correctiva del Gobierno regional y Local, que es su obligación mediante la ley 29664 y aplicar las normas, lineamientos de la gestión del riesgo de desastres.

### **B) Medidas de mitigación del terreno**

Una vez conocida la aceleración pico que se produciría y las condiciones litológicas de la microzonificación sísmica, se puede realizar:

- Mejoramiento de las estructuras, espectro de diseño, para que soporten la amplificación sísmica y soporten los sismos.
- Utilizar el espectro de respuesta para hallar el espectro de diseño, aplicando siempre la norma sismorresistente 030 y calcular los pisos de las estructuras.
- Realizar una cartografía geológica detallada, y una microzonificación sísmica para un desarrollo sustentable de la ciudad.
- En zonas donde hay suelos muy malos, amplificación sísmica elevada y viviendas de adobe y muy antiguas se debe realizar un reasentamiento como manda la Ley.

### **C) Medidas generales para el uso de los suelos**

En áreas como San Sebastián y Wánchaq donde el nivel freático es superficial y hay estratos de arena, arcilla, se produciría efecto de sitio la destrucción será intensa, se debe realizar un reasentamiento. Es necesario dar incentivos tributarios para hacer realidad un reasentamiento.

Es muy importante realizar trabajos de reforzamiento por parte de las autoridades; y una cultura de preparación por parte de la comunidad antes, durante y después del



sismo, siendo estas las medidas de prevención y mitigación más importantes en el caso de un sismo:

### **Antes**

- Realizar una evaluación de las construcciones que están dentro de las zonas de peligrosidad muy alta, especialmente el centro histórico por su antigüedad, San Sebastián, San Jerónimo.
- Identificar las zonas seguras de la vivienda, con apoyo de un ingeniero y/o Defensa Civil.
- Elaborar planes de contingencia para un sismo de magnitud 6.5 Mw.
- Preparar, educar a la población del comportamiento de las ondas sísmicas en los terremotos; Las ondas P (primarias) llegan primero, estas son análogas a las ondas sonoras. Seguidamente arribarán las ondas S (secundarias) y superficiales las cuales destruirán las estructuras. La diferencia entre las ondas P y S son aproximadamente entre 4 a 5 Segundos por la cercanía del sistema de fallas Cusco.
- Se deben realizar simulacros mensualmente y estos deben ser obligatorios para todas las Instituciones y comunidades del Cusco.
- Poseer siempre en casa lo más indispensable en el caso de un terremoto, mochila salvadora con agua, alimentos no perecibles, equipo de primeros auxilios, etc.

### **Durante:**

- Ser muy sereno y demostrar todo lo aprendido en los simulacros, solamente tenemos entre 4 a 5 segundos para ponerse en zonas seguras.
- Esperar que el sacudimiento del suelo termine, durara aproximadamente entre 1 a 2 minutos.
- Siempre alejarse de áreas que tengan estanterías, ventanas, objetos que pudieran caer y causar daño.
- Ubicar las salidas de emergencia y salir a la calle, parques, porque podrían darse algunas réplicas sísmicas.



### Después:

- Escuchar las emisoras autorizadas por INDECI, CENEPRED, IGP, para conocer la intensidad, posibles replicas y el grado de destrucción de la ciudad.
- Asistir a los familiares y vecinos que necesiten asistencia, en caso de ser necesario llevar a los hospitales o áreas predeterminadas por INDECI.
- Realizar una evaluación de todas las construcciones de adobe y de las construcciones que se ubican en las zonas de riesgo muy alto. Esta evaluación de estar conformada por el colegio de Ingenieros del Perú y las Universidades que existen en la ciudad del Cusco.
- Seguir atentamente las indicaciones de INDECI sobre el comportamiento y apoyo a la comunidad del Cusco.
- Finalmente, la reconstrucción se realizará con lineamientos y normas del CENEPRED, basados en la ley 29664 del SINAGERD.

## **DISCUSION**

El análisis crítico se realizó en base a los objetivos, metodologías, resultados y conclusiones de los antecedentes de estudio, con una contrastación del conocimiento científico:

- Los investigadores de la UNI, PUCP, trabajaron el análisis de peligro sísmico con el programa R-CRISIS 2007, el presente trabajo de investigación se realizó con el R-CRISIS 2020 que tiene nuevos algoritmos de clasificación no supervisada, el cual incluye para suelos, es más apropiada para determinar la aceleración de los suelos del Cusco que tienen aceleraciones entre  $390 \text{ cm/seg}^2$  y  $500 \text{ cm/seg}^2$ , las edificaciones están sobre suelos blandos lacustres.
- Los investigadores aplicaron sus modelos de atenuación para roca, con periodos predominantes de 0.1 seg., mientras que el presente trabajo toma en cuenta la litología lacustre de la ciudad del Cusco con periodos predominantes de 0.1 seg. hasta 0.8 seg., constituida por depósitos de conos aluviales, depósitos de canales trenzados y llanura de inundación, depósitos palustres y lacustres; lo que le da un menor grado de incertidumbre a los resultados.



- Generalmente todos los análisis del peligro sísmico van enfocados al análisis de respuesta sísmica y generación de diseño para estructuras de acuerdo a la norma 030 sismoresistente, el presente estudio va dirigido fundamentalmente para generar el espectro de respuesta con aceleraciones entre  $390 \text{ cm/seg}^2$  y  $500 \text{ cm/seg}^2$ .
- La metodología de los investigadores de la UNI y PUCP, sus catálogos están basados en instituciones del extranjero como el Servicio de Geología de los Estados Unidos, Centro de Sismología Internacional, el estudio se basa en las estaciones sismológicas del Instituto Geofísico del Perú, que son las que están más cerca del sistema de fallas Cusco, lo que le da una precisión para la ubicación de los epicentros y resultados.
- El presente trabajo de investigación, comprueba el tipo de suelo, mediante el acelerómetro REF TEK, empleando el cociente espectral H/V, lo que ningún trabajo toma en cuenta esos factores.





Figura N° 36. Medidas en caso de sismo.



## CONCLUSIONES

- **PRIMERA:** Del análisis del Peligro Sísmico Determinístico se concluye que la falla Tambomachay y probable falla Cusco generarían aceleraciones de 0.39 gal y 0.54 gal, es activa y generaría sismos de magnitudes máximas 6.5 Mw, con amplificaciones sísmicas, en los suelos de periodos predominantes de 0.5 a más, la destrucción será muy alta en las edificaciones y decenas de muertes en la ciudad del Cusco.
- **SEGUNDA:** El análisis probabilístico se ha definido mediante un terremoto de magnitud máxima de 7 Mw, cuya probabilidad de ocurrencia es del 10% en un período de 50 años, o, en términos de intervalos de recurrencia, aquel cuyo período de retorno es de 475 años, según la norma sismoresistente 030.
- **TERCERA:** La hipótesis en el análisis determinístico, nos determina intensidades máximas de los efectos de los terremotos que hubo en el pasado, fueron de magnitudes 6.5 Mw a 7 Mw. El análisis Probabilístico, nos proporciona la probabilidad de recurrencia de los terremotos y el espectro de peligro uniforme con aceleraciones pico entre 0.39 gal y 0.54 gal.; La microzonificación Sísmica, nos indica suelos con periodos predominantes entre 0.1 y 0.8 con suelos muy rígidos, suelos intermedios, suelos blandos, suelos excepcionales flexibles desfavorables; Los resultados mencionados fueron determinantes para los lineamientos de Prevención y Mitigación de desastres, con lo que se comprueba las hipótesis planteadas.
- **CUARTA:** Los factores condicionantes de la susceptibilidad, no son determinantes independientemente y tampoco sirven si se carece de alguno de ellos. Se verificaron las ponderaciones en el campo las condiciones de litología, geomorfología, hidrogeología y geotecnia con relativo éxito; para poder realizar el análisis jerárquico y determinar sus pesos ponderados correspondientes.
- **QUINTA:** El mapa de susceptibilidad del peligro sísmico muestra que el fondo del valle del Cusco el peligro sísmico es muy alto, especialmente los distritos de Cusco, Wánchaq, San Sebastián, san Jerónimo, por tener mayor espesor de suelos, depósitos palustres, lacustres y llanuras de inundación y depósitos cuaternarios con nivel



freático alto, suelos muy blandos con presencia de licuefacción de suelos. Siendo la estratificación del nivel de susceptibilidad al peligro sísmico el siguiente:

NIVEL	PESOS PONDERADOS, no tienen unidades, indican la importancia y deben sumar uno.
MUY ALTO	0.415
ALTO	0.299
MEDIO	0.157
BAJO	0.084
MUY BAJO	0.045

- **SEXTA:** La metodología empleada para analizar la Susceptibilidad al análisis del peligro sísmico, identifica áreas potencialmente susceptibles; permite sectorizar las zonas potenciales a sufrir con mayor intensidad, a partir de las condiciones intrínsecas de la fuente sismogénica y del terreno.
- **SETIMA:** Los resultados obtenidos muestran que la Subcuenca del Cusco tiene diversos tipos de suelos y amplificación sísmica y que el método de microzonificación sísmica es una buena alternativa, nos brinda resultados con pequeña incertidumbre fue validada en estudios similares en Japón. El método es adecuado para lugares que tienen suelos variados e inconsolidados, con presencia de un nivel freático.
- **OCTAVA:** Los lineamientos generales de Prevención y Mitigación de desastres deben estar en función a los resultados del análisis de peligro sísmico, donde las aceleraciones están en 400 gals, implica que el sacudimiento del suelo va a ser muy fuerte, en la subcuenca del Cusco; hay un crecimiento desordenado y caótico, las urbanizaciones no están planificadas, sin utilizar la norma 030 sismoresistente, hay muchas viviendas en zonas de peligro alto, en áreas de relleno, en taludes inestables, en áreas donde el nivel freático es superficial, debería haber un reasentamiento de estas viviendas.



## RECOMENDACIONES

- **PRIMERA:** Este trabajo va dirigido a todas las municipalidades de la provincia del Cusco, deben tomar en cuenta los resultados del análisis del peligro sísmico de la ciudad del Cusco, para una mejor planificación geo-urbanística de su distrito, tomando en cuenta la norma sismoresistente 030. Todas las viviendas tienen que tener un diseño sismoresistente.
- **SEGUNDA:** En el Riesgo Sísmico, se debe trabajar en la vulnerabilidad sísmica, en zonas donde el periodo fundamental de los suelos es más de 0.6 seg.; no se debe construir, por lo que los municipios no deben dar licencias de construcción; en zonas donde ya hay viviendas se tiene que realizar un reforzamiento de sus estructuras para minimizar el grado de destrucción.
- **TERCERA:** Todos los municipios deben realizar una microzonificación, tomando como base este trabajo de investigación. Instalar acelerómetros en cada distrito para tener una red sísmica confiable y tener un mapa de peligro sísmico en función de la aceleración.
- **CUARTA:** En la zonificación urbana, se debe integrar la mayor cantidad posible de parámetros, como comportamiento del terreno, amplificación sísmica, periodos predominantes de los suelos, geomorfología, hidrogeología, tectónica, mecánica de suelos y roca.
- **QUINTA:** Se debe planificar la expansión urbana y el aparato productivo considerando el peligro sísmico, asimismo construir en zonas seguras, considerando los criterios de protección ambiental por riesgos de desastres, que no se observan en la ciudad del Cusco.
- **SEXTA:** Cada distrito de la ciudad del Cusco debe contar con un mapa de microzonificación sísmica, para otorgar sus licencias de construcción y prevenir mayores pérdidas de materiales y vidas humanas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian Garcia, A. P. (2012). Ocurrencias de grandes sismos. Mexico: Instituto de Ingenieria de la UNAM.
- Aedo, J. &. (1993). Peligro sismico en el Perú. Lima - Perú.
- Alva Hurtado, Jorge E.; Castillo Aedo, Jorge L.;. (1994). Peligro Sismico en el Perú. *Congreso UNI*. Lima.
- Alva J., G. V. (1984). Distribucion de maximas intensidades sismicas observadas en el Peru. Tacna - Peru.
- Aracena J.; Germoso C. (2019). *Respuesta sismica local de la Presa "LAS DOS BOCAS" utilizando un analisis no lineal*. SANTO DOMINGO.
- Arevalo. (1984). Parametros sismologicos para las fuentes propuestas por Casaverde y Vargas.
- Bardeles, Z. A. (2016). Analisis de peligro sismico en el Perú. *SENCICO*. Lima.
- Benavente C., Delgado F., Taipe M., Audin L., Pari W. (2013). Neotectonica y Peligro Sismico en la Region de Cusco. *INGEMMET*.
- Cabrera J., S. M. (1998). Active normal faulting in high plateaus Andes: The Cusco in region Perú.
- Carlotto, V. (2002). Cuadrangulo de Cuzco 28-S. *INGEMMET*.
- Castillo Aedo, J. L. (1994). *Peligro Sísmico en el Perú*. Lima: Tesis - UNI.
- CENEPRED. (2014). Manual Para La Evaluacion de Riegos . Lima.
- CENEPRED. (2015). Manual para la evaluacion de riesgos originados por fenomenos naturales 02 version. Lima.
- Cismid. (1992). Obras Civiles en nuestro Pais. Centro Peruano Japonese de Investigacion Sismica.
- Gamarra, C. (2009). *Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú*. Lima: UNI.



IGP. (2015). 29 Fuentes Sismogenicas. Instituto Geofisico del Peru.

IGP. (2018). *sismos*. Lima.

INGEMMET - Silgado, F. (1974). *Historia de los sismos mas notables ocurridos en el peru*. Lima: INGEMMET.

Lantada, N. Z. (2007). Tesis doctoral, Riesgo Sismico. Barcelona.

Luna, A. M. (2004). *Espectros de Peligro Sísmico Uniforme*. Lima: Tesis - UNI.

sadigh, K. C. (1997). Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes. *Seis. Res. Lett* V-68.

Sébrier, C. &. (1990). Estudio estructural del sistema de fallas Cusco.

Silgado. (1978). Historia de los Sismos mas Notables ocurridos en el Peru. Lima - Peru: Instituto de Geologia y Minería.

Sisra. (2006). Zona de Subduccion del Peru.

Tavera, H. (2010). Fuentes sismogenicas y tipo de sismos en el Perú. *IGP*, 3.

Tavera, H. (2014). Evaluacion del peligro sismico en el Perú. *IGP*.

Vallejo, G. d. (2002). *Ingenieria Geologica*. España: PEARSON.

Vargas, C. &. (1980). Metodologia para el calculo de Peligro Sismico. Lima - Peru: Instituto Geofisico del Peru.



## LINKOGRAFIA.

Sismo: <https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto>

Ondas Sísmicas: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ondas s%C3%ADsmicas](https://es.wikipedia.org/wiki/Ondas_s%C3%ADsmicas)

Magnitud Sísmica:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Escala sismol%C3%B3gica de Richter](https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismol%C3%B3gica_de_Richter)

Intensidad Sísmica:

[https://formacion.uam.es/pluginfile.php/166/mod\\_resource/content/2/intensidad sismica.pdf](https://formacion.uam.es/pluginfile.php/166/mod_resource/content/2/intensidad_sismica.pdf)

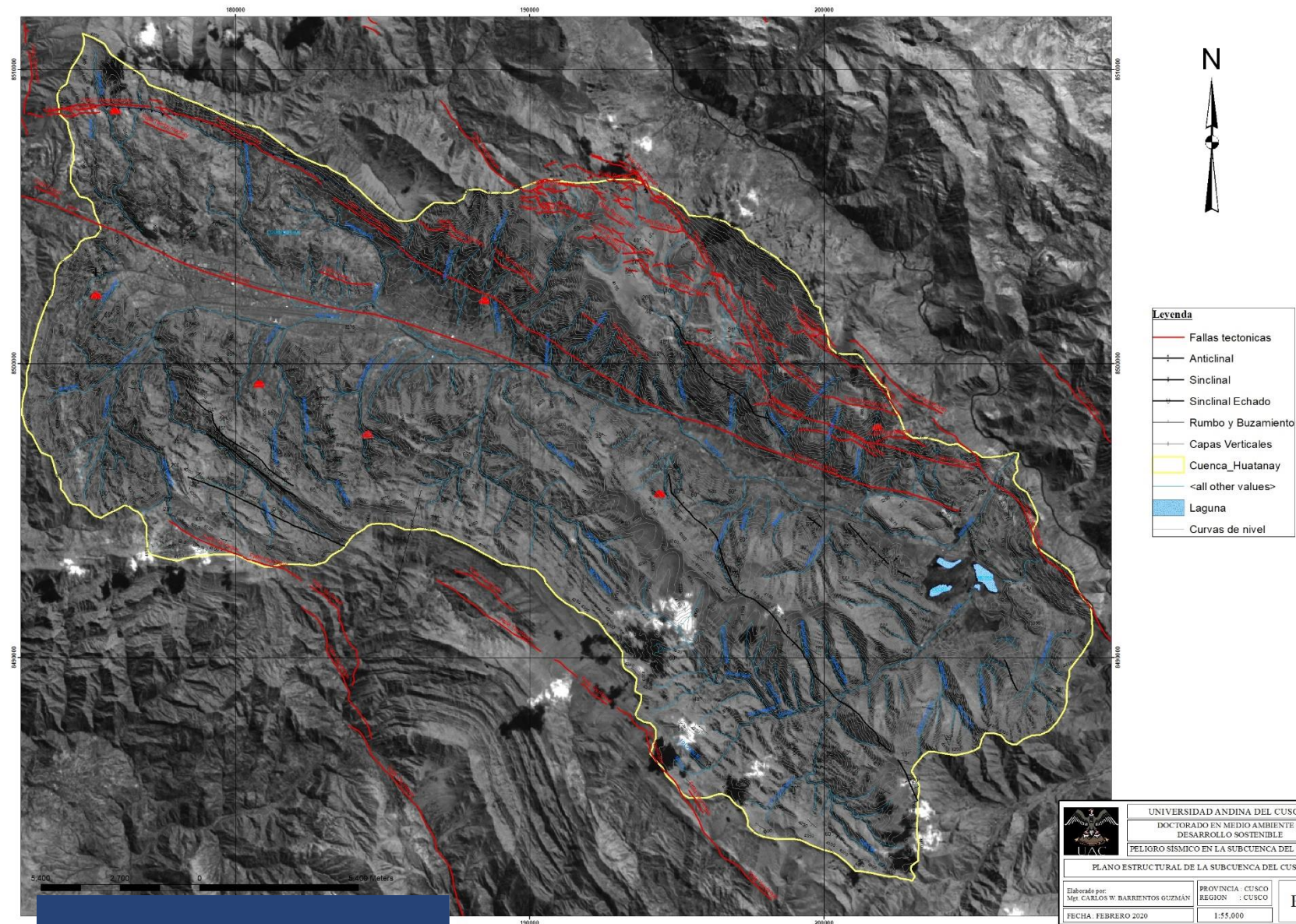
Diferencia entre magnitud e intensidad sísmica:

<https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2504-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-e-intensidad>



ANEXOS 01: MAPAS

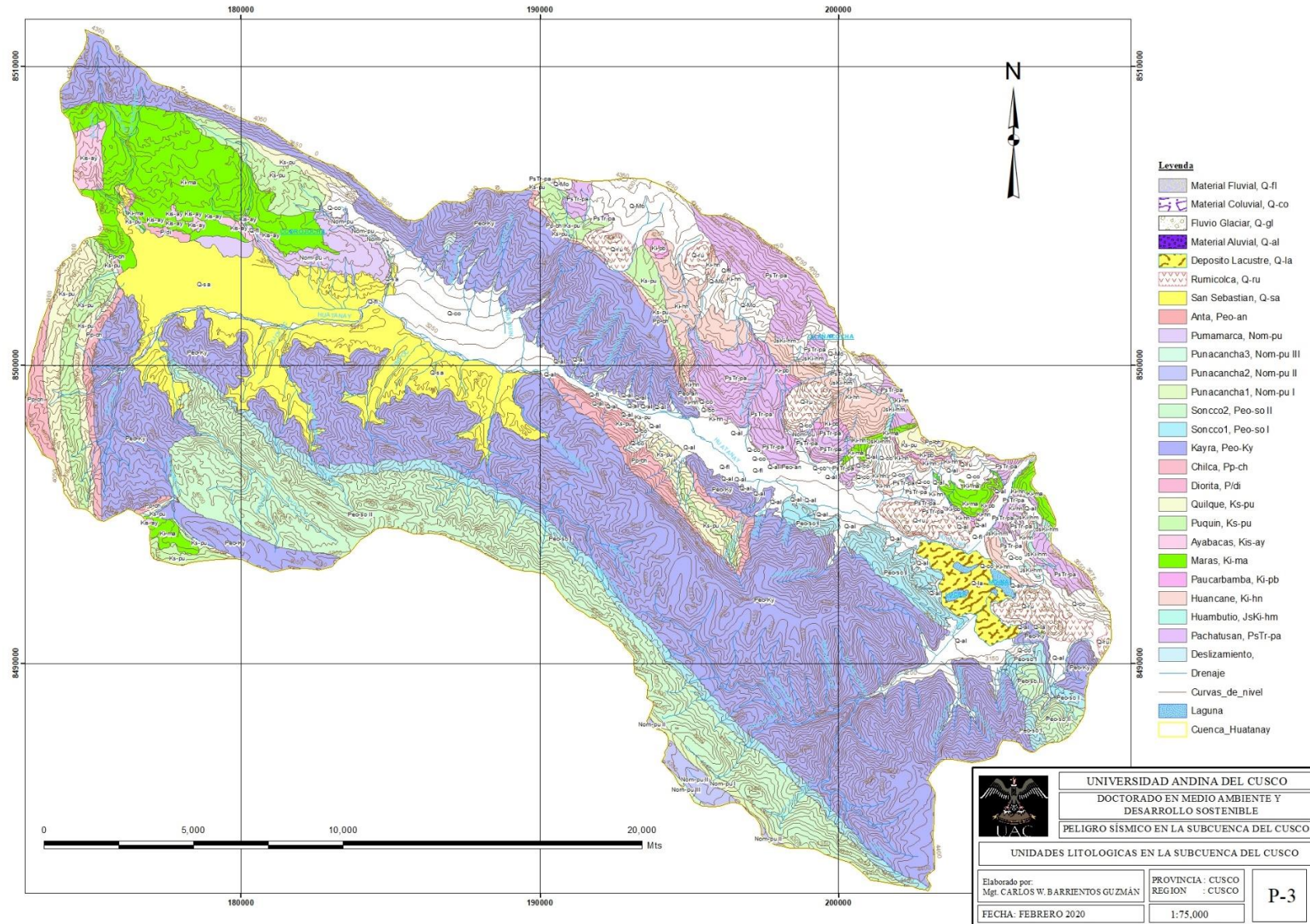
MAPA ESTRUCTURAL DE LA CIUDAD DEL CUSCO.





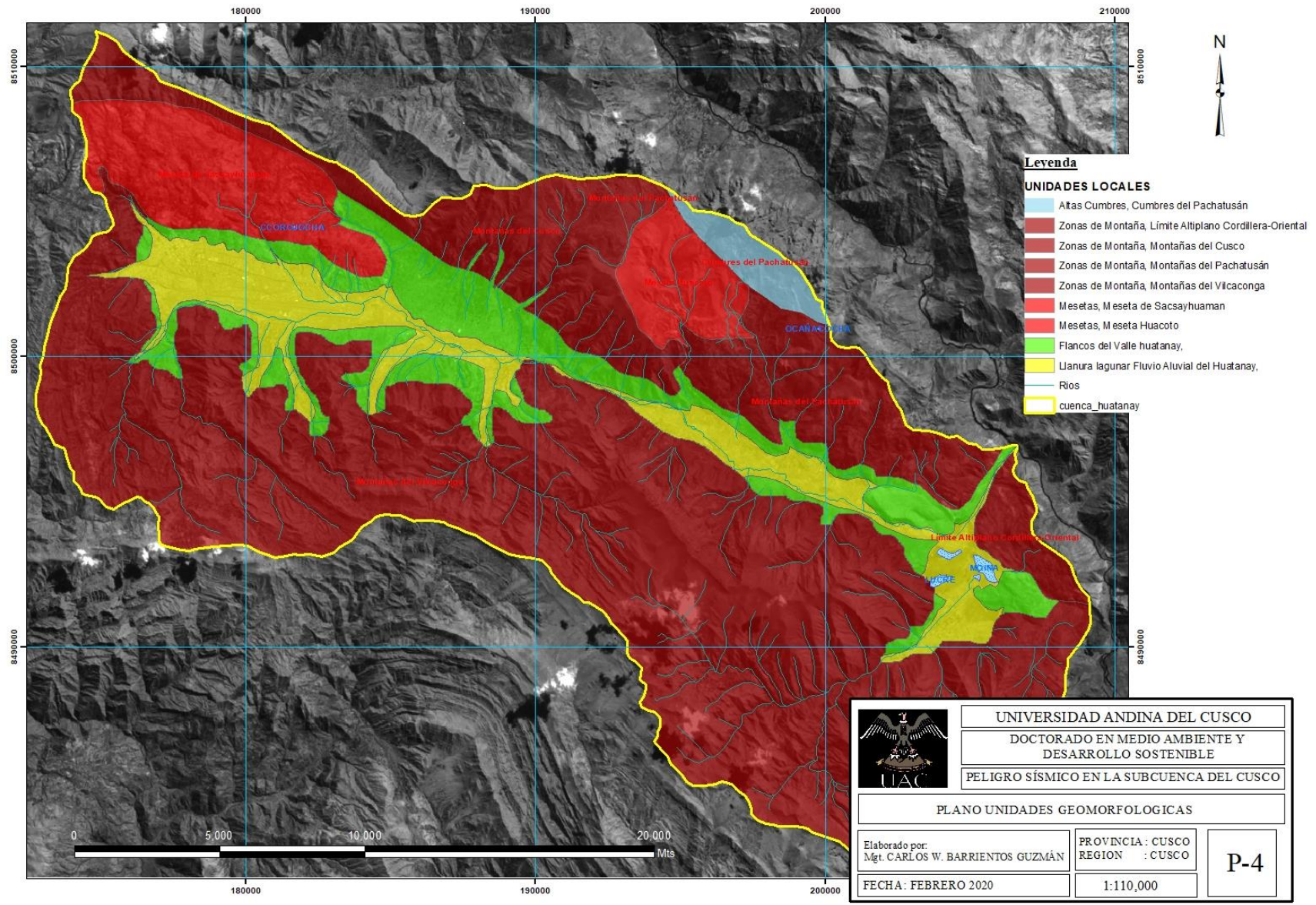


### MAPA GEOLOGICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO.



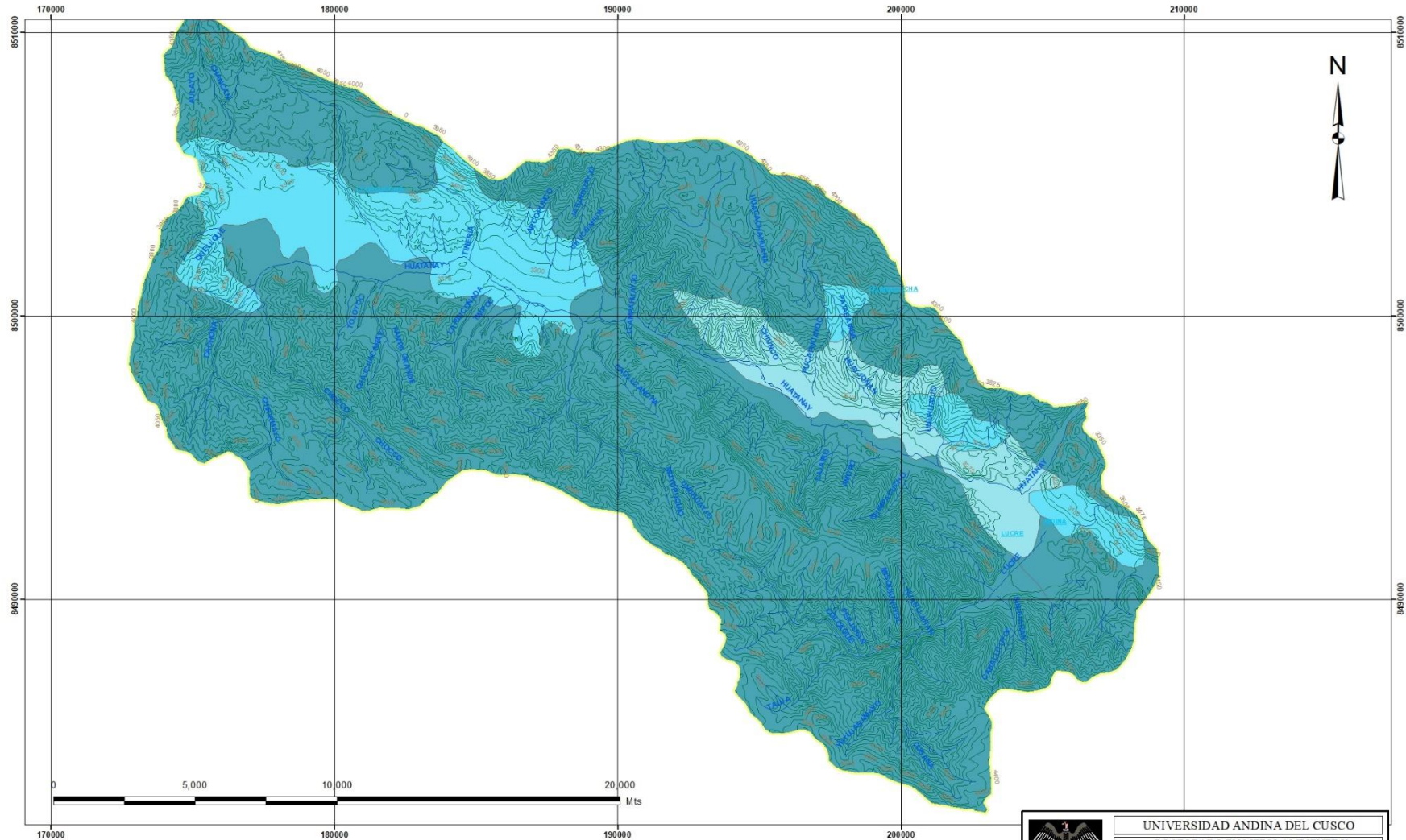


### MAPA GEOMORFOLOGICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO.





### MAPA HIDROGEOLOGICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO.



**Legenda**

— Drenaje

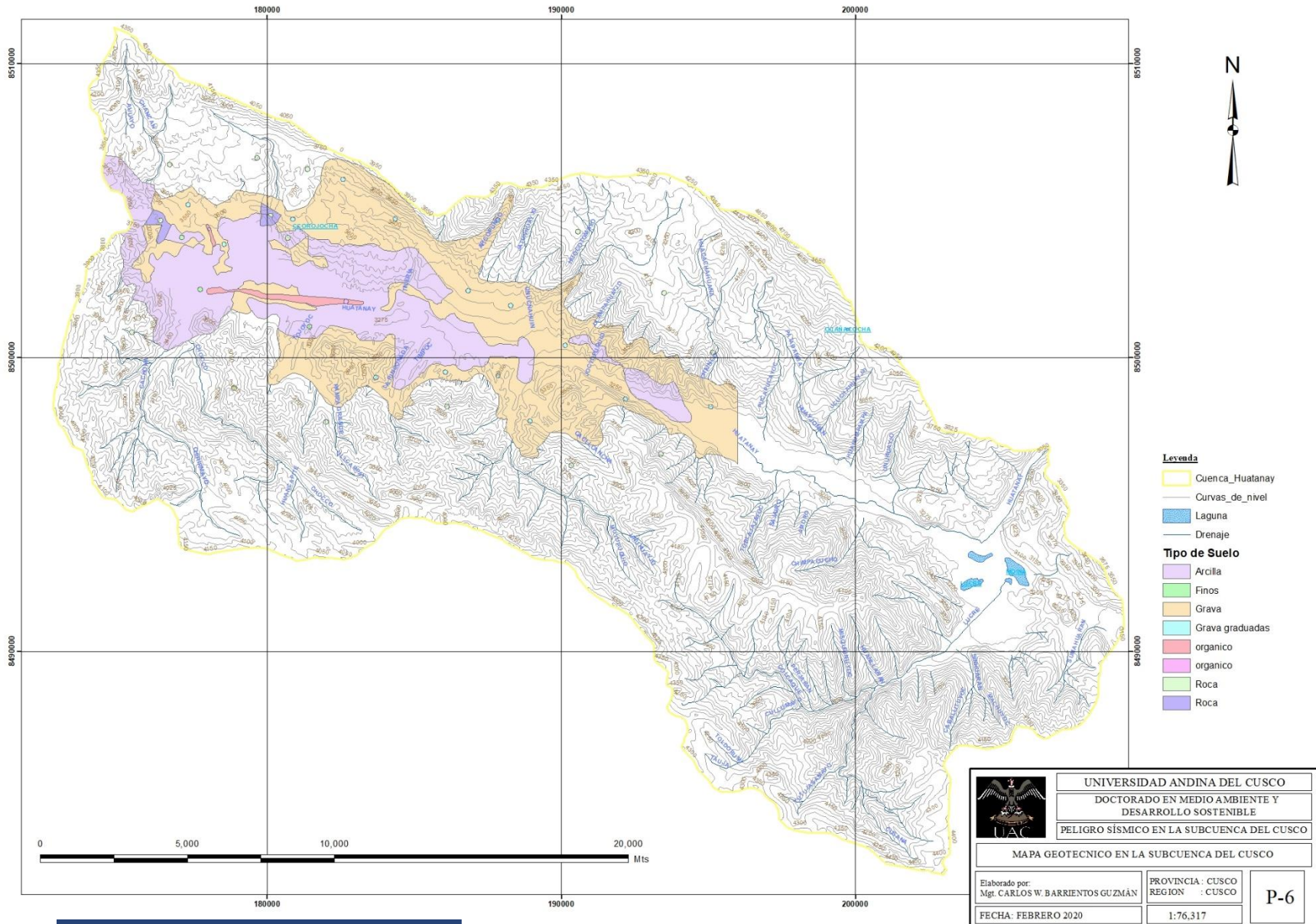
**Hidrogeología**

- Acuíferos generalmente extensos, con productividad elevada (permeabilidad elevada)
- Acuíferos locales o discontinuos productivos, o acuíferos extensos pero solo moderadamente productivos (permeabilidad media) (No excluye la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y mas productivos)
- Acuíferos locales, en zonas fracturadas o meteorizadas en formaciones consolidadas, sin excluir acuíferos cautivos mas productivos(permeabilidad baja a muy baja)
- Laguna

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO	
	DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE	
PELIGRO SÍSMICO EN LA SUBCUENCA DEL CUSCO		
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS EN LA SUBCUENCA DEL CUSCO		
Elaborado por: Mgt. CARLOS W. BARRIENTOS GUZMÁN	PROVINCIA - CUSCO REGION : CUSCO	P-5
FECHA: FEBRERO 2020	1:83.486	



MAPA GEOTECNICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO.





**ANEXOS 02: VALORES MATRIZ DE SAATY  
PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE PELIGROS**



MATRIZ DE PARAMETROS 4 X 4

PARAMETRO	DESC
INTENSIDAD	P1
MAGNITUD	P2
ACELERACIÓN DEL SUELO	P3
AMPLIFICACION SISMICA	P4

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES

PARÁMETRO	INTENSIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN DEL SUELO	AMPLIFICACION SISMICA
INTENSIDAD	1.00	2.00	3.00	5.00
MAGNITUD	0.50	1.00	2.00	4.00
ACELERACIÓN DEL SUELO	0.33	0.50	1.00	2.00
AMPLIFICACION SISMICA	0.20	0.25	0.50	1.00
<b>SUMA</b>	2.03	3.75	6.50	12.00
<b>1/SUMA</b>	0.49	0.27	0.15	0.08

MATRIZ DE NORMALIZACIÓN

PARÁMETRO	INTENSIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN DEL SUELO	AMPLIFICACION SISMICA	Vector Priorización
INTENSIDAD	0.492	0.533	0.462	0.417	0.476
MAGNITUD	0.246	0.267	0.308	0.333	0.288
ACELERACIÓN DEL SUELO	0.164	0.133	0.154	0.167	0.154
AMPLIFICACION SISMICA	0.098	0.067	0.077	0.083	0.081
	0.902	0.933	0.923	0.917	1.000

**PESO PONDERADO DE LOS PARÁMETROS**

Porcentaje (%)

47.584  
28.840  
15.445  
8.132  
100.000

HALLANDO EL  $\lambda_{max}$

Vector Suma Ponderado/Vector Priorización

4.040  
4.024  
4.014  
4.583

**SUMA**

**PROMEDIO**

16.661  
**4.165**

**ÍNDICE DE CONSISTENCIA**

**RELACIÓN DE CONSISTENCIA < 0.88(\*)**

**IC**

**RC**

0.055  
0.062



**FACTORES CONDICIONANTES**

**UNIDADES LITOLÓGICAS**

PARAMETRO	DESCRIPTOR	N° DE DESCRIPTORES	DESCRIPTORES
<b>UNIDADES LITOLÓGICAS</b>	<b>D1</b>	<b>5</b>	Formación San Sebastián
	<b>D2</b>		Depósitos aluviales
	<b>D3</b>		Depósitos fluviales
	<b>D4</b>		Formación Chincheros
	<b>D5</b>		Roca Fracturada, formación Kayra

**MATRIZ DE COMPARACION DE PARES**

DESCRIPTOR	Formación San Sebastián	Depósitos aluviales	Depósitos fluviales	Formación Chincheros	Roca Fracturada, formación Kayra
Formación San Sebastián	1.00	2.00	4.00	5.00	7.00
Depósitos aluviales	0.50	1.00	2.00	5.00	6.00
Depósitos fluviales	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00
Formación Chincheros	0.20	0.20	0.50	1.00	2.00
Roca Fracturada, formación Kayra	0.14	0.17	0.25	0.50	1.00
<b>SUMA</b>	<b>2.09</b>	<b>3.87</b>	<b>7.75</b>	<b>13.50</b>	<b>20.00</b>
<b>1/SUMA</b>	<b>0.48</b>	<b>0.26</b>	<b>0.13</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>

**MATRIZ DE NORMALIZACION**

DESCRIPTOR	Formación San Sebastián	Depósitos aluviales	Depósitos fluviales	Formación Chincheros	Roca Fracturada, formación Kayra	Vector Priorización
Formación San Sebastián	0.478	0.517	0.516	0.370	0.350	0.446
Depósitos aluviales	0.239	0.259	0.258	0.370	0.300	0.285
Depósitos fluviales	0.119	0.129	0.129	0.148	0.200	0.145
Formación Chincheros	0.096	0.052	0.065	0.074	0.100	0.077
Roca Fracturada, formación Kayra	0.068	0.043	0.032	0.037	0.050	0.046
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

HALLANDO  $\lambda_{max}$

	VSP/VP
	5.167
	5.124
	5.085
	5.032
	5.036
<b>SUMA</b>	<b>25.444</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>5.089</b>

INDICE DE CONSISTENCIA  
RELACION DE CONSISTENCIA < 0.1

<b>IC</b>	0.022
<b>RC</b>	<b>0.020</b>



**FACTORES CONDICIONANTES**

**UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS**

PARAMETRO	DESCRIPTOR	N° DE DESCRIPTORES	DESCRIPTORES (°)
UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	D1	5	Fondo de valle
	D2		Ladera baja
	D3		Ladera media
	D4		Ladera alta
	D5		Altiplanicies

**MATRIZ DE COMPARACION DE PARES**

DESCRIPTORES (°)	Fondo de valle	Ladera baja	Ladera media	Ladera alta	Altiplanicies
Fondo de valle	1.00	0.50	4.00	6.00	9.00
Ladera baja	2.00	1.00	3.00	6.00	8.00
Ladera media	0.25	0.33	1.00	3.00	5.00
Ladera alta	0.17	0.17	0.33	1.00	3.00
Altiplanicies	0.11	0.13	0.20	0.33	1.00
<b>SUMA</b>	3.53	2.13	8.53	16.33	26.00
<b>1/SUMA</b>	0.28	0.47	0.12	0.06	0.04

**MATRIZ DE NORMALIZACION**

DESCRIPTORES (°)	Fondo de valle	Ladera baja	Ladera media	Ladera alta	Altiplanicies	Vector Priorización
Fondo de valle	0.283	0.235	0.469	0.367	0.346	0.340
Ladera baja	0.567	0.471	0.352	0.367	0.308	0.413
Ladera media	0.071	0.157	0.117	0.184	0.192	0.144
Ladera alta	0.047	0.078	0.039	0.061	0.115	0.068
Altiplanicies	0.031	0.059	0.023	0.020	0.038	0.035
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

HALLANDO  $\lambda_{max}$

Vector Suma Ponderado/Vector Priorización

5.419  
5.357  
5.162  
5.060  
5.084

<b>SUMA</b>	26.082
<b>PROMEDIO</b>	5.216

INDICE DE CONSISTENCIA  
RELACION DE CONSISTENCIA < 0.1

<b>IC</b>	0.054
<b>RC</b>	0.049





**FACTORES CONDICIONANTES**

**UNIDADES HIDROGEOLOGICAS**

PARAMETRO	DESCRIPTOR	N° DE DESCRIPTORES	DESCRIPTORES
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	D1	5	acuifero detrítico
	D2		acuifero fisurado
	D3		acuicludo
	D4		acuitardo
	D5		acuifugo

**MATRIZ DE COMPARACION DE PARES**

DESCRIPTORES	acuifero detrítico	acuifero fisurado	acuicludo	acuitardo	acuifugo
acuifero detrítico	1.00	2.00	3.00	6.00	9.00
acuifero fisurado	0.50	1.00	3.00	4.00	8.00
acuicludo	0.33	0.33	1.00	3.00	7.00
acuitardo	0.17	0.25	0.33	1.00	3.00
acuifugo	0.11	0.13	0.14	0.33	1.00
SUMA	2.11	3.71	7.48	14.33	28.00
1/SUMA	0.47	0.27	0.13	0.07	0.04

**MATRIZ DE NORMALIZACION**

DESCRIPTORES	acuifero detrítico	acuifero fisurado	acuicludo	acuitardo	acuifugo	Vector Priorizacion
acuifero detrítico	0.474	0.539	0.401	0.419	0.321	0.431
acuifero fisurado	0.237	0.270	0.401	0.279	0.286	0.295
acuicludo	0.158	0.090	0.134	0.209	0.250	0.168
acuitardo	0.079	0.067	0.045	0.070	0.107	0.074
acuifugo	0.053	0.034	0.019	0.023	0.036	0.033
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

HALLANDO  $\lambda_{max}$

Vector Suma Ponderado/Vector Priorización

5.249
5.337
5.119
5.080
5.052
<b>SUMA</b> 25.837
<b>PROMEDIO</b> 5.167

INDICE DE CONSISTENCIA  
RELACION DE CONSISTENCIA < 0.1

<b>IC</b> 0.042
<b>RC</b> 0.038



**FACTORES CONDICIONANTES**

**GEOTECNIA**

PARAMETRO	DESCRIPTOR	N° DE DESCRIPTORES	DESCRIPTORES
GEOTECNIA	D1	5	Arcillas
	D2		Limos
	D3		Arenas fina
	D4		Arenas gruesa
	D5		Gravas

**MATRIZ DE COMPARACION DE PARES**

DESCRIPTORES	arcillas	limos	arenas fina	arenas gruesa	gravas
arcillas	1.00	3.00	4.00	5.00	7.00
limos	0.33	1.00	3.00	6.00	8.00
arenas fina	0.25	0.33	1.00	3.00	6.00
arenas gruesa	0.20	0.17	0.33	1.00	3.00
gravas	0.14	0.13	0.17	0.33	1.00
SUMA	1.93	4.63	8.50	15.33	25.00
1/SUMA	0.52	0.22	0.12	0.07	0.04

**MATRIZ DE NORMALIZACION**

DESCRIPTORES	arcillas	limos	arenas fina	arenas gruesa	gravas	Vector Priorizacion
arcillas	0.519	0.649	0.471	0.326	0.280	0.449
limos	0.173	0.216	0.353	0.391	0.320	0.291
arenas fina	0.130	0.072	0.118	0.196	0.240	0.151
arenas gruesa	0.104	0.036	0.039	0.065	0.120	0.073
gravas	0.074	0.027	0.020	0.022	0.040	0.037
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

HALLANDO  $\lambda_{max}$

VSP/VP

6.100  
5.657  
5.157  
4.896  
4.972

**SUMA**

26.782

**PROMEDIO**

5.356

INDICE DE CONSISTENCIA  
RELACION DE CONSISTENCIA < 0.1

**IC**

0.089

**RC**

0.080



**FACTORES DESENCADENANTE**

**ACTIVIDAD SÍSMICA**

PARAMETRO	DESCRIPTOR	N° DE DESCRIPTORES	DESCRIPTORES
FALLA TECTONICA	D1	5	Falla Tambomachay
	D2		Probable Falla Cusco
	D3		Falla Pachatusan
	D4		Falla Qoricocha
	D5		Falla Chincheros

**MATRIZ DE COMPARACION DE PARES**

DESCRIPTORES	Falla Tambomachay	Probable Falla Cusco	Falla Pachatusan	Falla Qoricocha	Falla Chincheros
Falla Tambomachay	1.00	2.00	3.00	4.00	6.00
Probable Falla Cusco	0.50	1.00	2.00	3.00	6.00
Falla Pachatusan	0.33	0.50	1.00	2.00	4.00
Falla Qoricocha	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00
Falla Chincheros	0.17	0.17	0.25	0.50	1.00
SUMA	2.25	4.00	6.75	10.50	19.00
1/SUMA	0.44	0.25	0.15	0.10	0.05

**MATRIZ DE NORMALIZACION**

DESCRIPTORES	Falla Tambomachay	Probable Falla Cusco	Falla Pachatusan	Falla Qoricocha	Falla Chincheros	Vector Priorizacion
Falla Tambomachay	0.444	0.500	0.444	0.381	0.316	0.417
Probable Falla Cusco	0.222	0.250	0.296	0.286	0.316	0.274
Falla Pachatusan	0.148	0.125	0.148	0.190	0.211	0.164
Falla Qoricocha	0.111	0.083	0.074	0.095	0.105	0.094
Falla Chincheros	0.074	0.042	0.037	0.048	0.053	0.051
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

HALLANDO  $\lambda_{max}$

Vector Suma Ponderado/Vector Priorización

5.124  
5.097  
5.050  
5.041  
5.015

<b>SUMA</b>	25.327
<b>PROMEDIO</b>	5.065

INDICE DE CONSISTENCIA  
RELACION DE CONSISTENCIA < 0.1

<b>IC</b>	0.016
<b>RC</b>	0.015