



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



# Peligros geodinámicos en la ciudad de Arequipa Cercado y zonas aledañas

## Informe Técnico Especial 2017



Trabajando para todos los peruanos





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP



# **Peligros geodinámicos en la ciudad de Arequipa Cercado y zonas aledañas**

Informe Técnico Especial

2017



## **Peligros geodinámicos en la ciudad de Arequipa Cercado y zonas aledañas**

### **Informe Técnico Especial**

*Elsa Galarza Contreras*

**Ministra del Ambiente**

*Hernando Tavera*

**Presidente Ejecutivo**

*Edmundo Norabuena*

**Director Científico**

### **Editores**

*Alejandra Martínez*

*Luis Santos C.*

### **Diseño y diagramación**

*Dante Guerra Echeandía*

**Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú Nro. 2017-17176**

**ISBN:** 978-612-47606-0-0

### **Editado por:**

*Instituto Geofísico del Perú*

*Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo, IV Etapa, Ate Vitarte, Lima, Perú*

*Central telefónica: (+ 51 1) 3172300*

*<http://portal.igp.gob.pe/>*

*Setiembre 2017*

*Tiraje: 1000 ejemplares*

### **Impreso por:**

*Vértice Consultores GráficosSAC*

*Av. Boulevard 1040 - Ate*

**Teléfono:** (+ 51 1) 435 2586

*Diciembre 2017*

# PRESENTACIÓN

La historia sísmica del Perú muestra que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y que de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Silgado, 1978; Dorbath et al, 1990; Tavera y Buforn, 2001).

Por otro lado, a partir de los años 80, muchas de las principales ciudades del país – incluyendo Arequipa Cercado –, han soportado procesos continuos de migración, y debido a la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, la población creciente ha venido ocupando zonas de alto riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos y deslizamientos, entre otros; para el caso de Arequipa Cercado se suma su cercanía al imponente volcán Misti que constituye un peligro latente ante una potencial erupción volcánica.

Entre las zonas de más alto riesgo se cuentan las laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables donde la población se ha asentado. A estas condiciones, se suma el hecho de que un alto porcentaje de las viviendas han sido construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente.

El presente Informe Técnico Especial busca reunir en un solo volumen información técnico científica sobre los principales peligros geodinámicos en la ciudad de Arequipa Cercado. El primer artículo a cargo de Bernal et al., constituye el resumen ejecutivo de los estudios de zonificación sísmica-geotécnica realizados en el marco del Programa Presupuestal Nro. 068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres” en el año 2014, e incluye información primaria plasmada en el mapa de zonificación sísmica-geotécnica a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio, y como herramienta de gestión de riesgo por las autoridades locales y regionales.

El artículo de Macedo se explaya sobre el caso del volcán Misti, considerado uno de los cuatro volcanes con mayor riesgo en el mundo, su historia volcánica pasada, el peligro que representa para la ciudad de Arequipa, y principalmente sobre los estudios e instrumentación (red sísmica permanente) que permiten monitorearlo en forma continua. Además, que esta red ha mostrado ser capaz de servir como alerta temprana ante la ocurrencia de lahares (huaycos) que podrían representar serios riesgos para la ciudad de Arequipa.

En el artículo de Quiroz y Villegas se analizan las mediciones GPS efectuadas en el sur del Perú, región que se encuentra en silencio sísmico desde el terremoto de Arica de 1868. Los resultados sugieren de manera preliminar que la zona de subducción en el sur del Perú está actualmente completamente acoplada y estaría lista para liberar energía para producir un terremoto de gran magnitud. Asimismo los autores indican la necesidad de densificar la instalación de GPS permanentes para el monitoreo continuo de la deformación y para una mejor previsión.

Finalmente el artículo de Tavera explica en detalle las características del sismo de origen continental ocurrido el 14 de agosto de 2016, conocido como “sismo de Ichupampa”. Este sismo de tipo cortical con una magnitud moderada de 5.3 ML, y con epicentro ubicado a 10 km al oeste de la localidad de Chivay tuvo fuertes impactos en varias localidades que resultaron afectadas, debido tanto a la mala calidad de las construcciones, como a la existencia de un gran número de fallas tectónicas, lineamientos y volcanes, debido a que esta región es dinámicamente muy activa.

Esperamos que la información técnico científica plasmada en este reporte técnico especial, pueda ser utilizado tanto por autoridades competentes como por la ciudadanía en general como un insumo necesario para la planificación y prevención en el desarrollo de nuestras ciudades.

**Dr. Hernando Tavera**  
Presidente ejecutivo  
Instituto Geofísico del Perú







Foto: Andrea Segovia Alcázar

# CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<b>06</b>
<b>1. ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE AREQUIPA CERCADO (COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO)</b> I. Bernal, H. Tavera, J.C. Gómez, F. Rosado, W. Sulla, J. Oyola, M. Añazco, G. Pérez, J. Huarachi, H. Salas, R. Bustamante, M. Vivanco, S. Ortiz, R. Carrillo, C. Chiroque, A. Gamonal, J. Martínez y J. Guzmán .....	<b>09</b>
Introducción .....	09
Área de estudio .....	10
Condiciones locales de sitio .....	10
Norma E.030, diseño sismoresistente .....	10
Metodología .....	13
Sismología .....	14
Geomorfología, Geología y Geodinámica .....	18
Geotecnia .....	22
Sísmica y Geofísica .....	26
Zonificación sísmica - geotécnica .....	32
Conclusiones .....	33
Bibliografía .....	34
<b>2. INSTRUMENTACIÓN GEOFÍSICA DE VOLCANES ACTIVOS: EL CASO DEL VOLCÁN MISTI</b> O. Macedo.....	<b>38</b>
Introducción .....	38
Red sísmica permanente del volcán Misti .....	39
Monitoreo sismovolcánico del volcán Misti .....	40
Aplicación de la red sísmica permanente del volcán Misti en la detección de lahares .....	41
Conclusiones .....	44
Bibliografía .....	45
<b>3. CAMPO DE VELOCIDAD GPS Y ACOPLAMIENTO INTERSÍSMICO EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PERÚ</b> W. Quiroz Y J. C. Villegas .....	<b>46</b>
Introducción .....	46
Antecedentes .....	47
Datos y análisis .....	48
Campo de velocidades para el sur del Perú .....	48
Efecto postsísmico del sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001 (serie de tiempo) .....	50
Conclusiones .....	51
Bibliografía .....	52
<b>4. SISMOS CONTINENTALES: EL CASO ICHUPAMPA</b> H. Tavera .....	<b>54</b>
Introducción .....	54
Tectónica local .....	56
Características del evento .....	57
Efectos secundarios del evento .....	60
Conclusiones .....	61
Bibliografía .....	61



# ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE AREQUIPA CERCADO (COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO) <sup>1</sup>

*I. Bernal, H. Tavera<sup>2</sup>, J.C. Gómez, F. Rosado, W. Sullá, J. Oyola, M. Añazco, G. Pérez, J. Huarachi, H. Salas, R. Bustamante, M. Vivanco, S. Ortiz, R. Carrillo, C. Chiroque, A. Gamonal, J. Martínez y J. Guzmán<sup>3</sup>*

## Introducción

El principal objetivo de este estudio fue realizar la zonificación sísmica - geotécnica (comportamiento dinámico del suelo) de la ciudad de Arequipa Cercado, así como poner a disposición de autoridades locales y regionales, un documento técnico que contribuya en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos, con el fin de proyectar una adecuada expansión urbana que ayude a elevar la calidad de vida de sus ciudadanos.

Los resultados obtenidos se resumen en el mapa de zonificación sísmica – geotécnica, donde se identifica la existencia de dos tipos de suelos codificados como Tipo S1 y Tipo S2, y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) correspondientes a las ZONAS I y II. Este mapa permite identificar las características dinámicas del suelo, constituyéndose como información primaria para ingenieros civiles, arquitectos y urbanista que trabajan en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio.

Estos resultados ayudan a comprender que no hay suelo malo, y que lo más importante es considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo; siguiendo las siguientes reglas para construir una casa sismorresistente:

- **Buenos planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica.
- **Buenos profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.
- **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras fueron correctamente construidas.

<sup>1</sup> Este estudio fue realizado en el marco del Programa Presupuestal Nro. 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres" durante el 2014, específicamente con la actividad "Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico".

<sup>2</sup> Instituto Geofísico del Perú. Correo electrónico: [hernando.tavera@igp.gob.pe](mailto:hernando.tavera@igp.gob.pe)

<sup>3</sup> Con el apoyo técnico de E. Torres y A. Cárdenas

## Área de estudio

La ciudad de Arequipa es la capital y mayor ciudad del departamento de Arequipa (Mapa 1). Conocida como la «Ciudad Blanca», es la segunda ciudad más poblada del Perú después de Lima, alcanzando el año 2014 los 869,351 habitantes según proyecciones del INEI, y se constituye como un importante centro industrial y comercial del Perú. Por su notable actividad industrial, - la segunda ciudad más industrializada del país -, destacan los productos manufacturados y la producción textil de lana de camélidos con calidad de exportación, por lo que la ciudad mantiene estrechos vínculos comerciales con Chile, Bolivia y Brasil; y con las ciudades conectadas por el ferrocarril del Sur, así como con el puerto de Matarani.

El distrito de Arequipa - Cercado limita por el norte con los distritos de Yanahuara y Alto Selva Alegre, al este con los distritos de Miraflores y Mariano Melgar, al sur con los distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Jacob Hunter y al oeste con el distrito de Sachaca.

## Condiciones locales de sitio

Las condiciones locales de sitio son uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos, y se evalúan en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica. La evaluación del comportamiento dinámico de los suelos (CDS), es una de las herramientas disponibles más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos; diversos estudios muestran que los suelos - ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes -, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a,b; Bard y Sesame, 2001; Bernal, 2002).

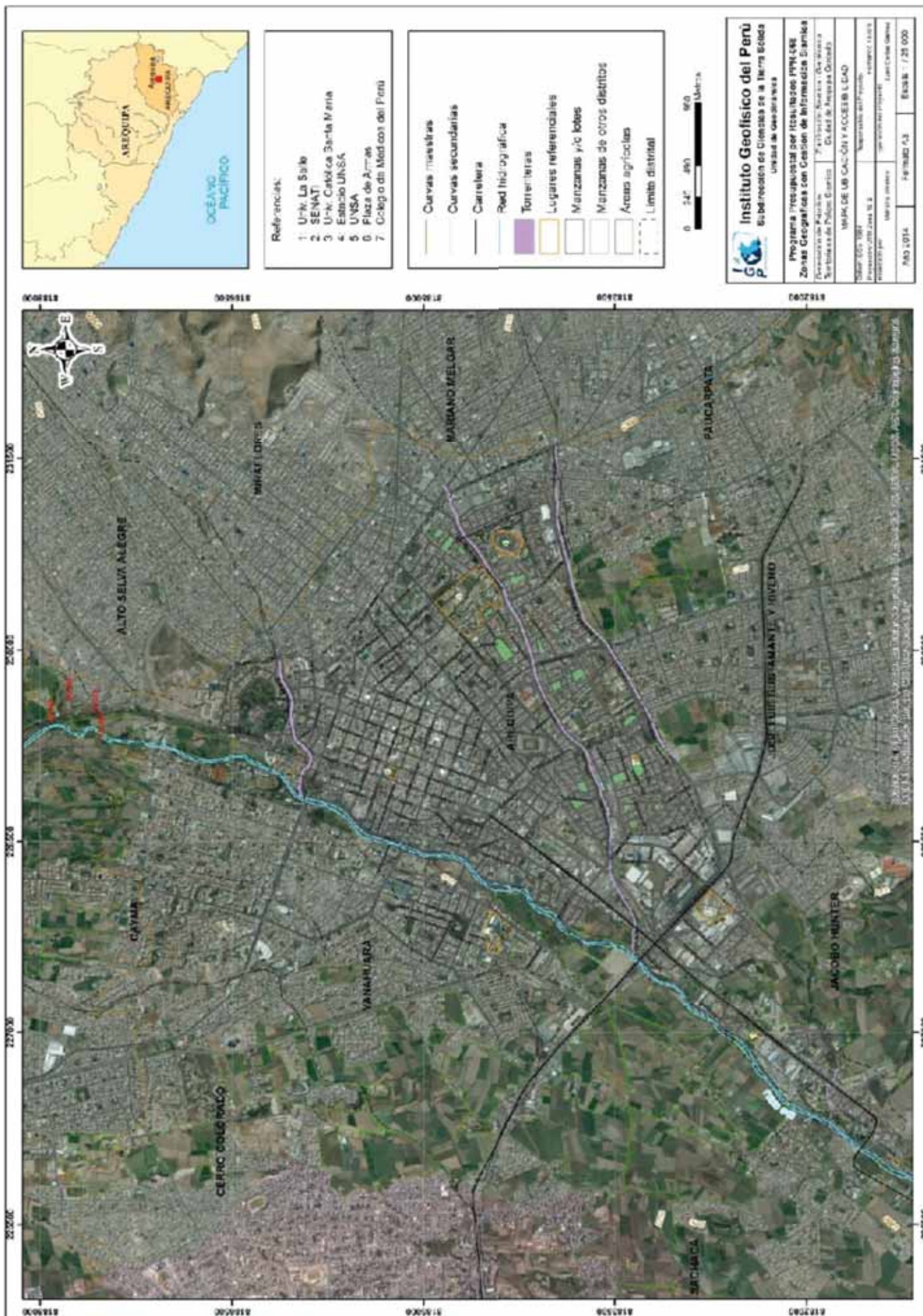
Las metodologías utilizadas para esta evaluación incluyen los estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos de los suelos, que controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en la superficie después de ocurrido un evento sísmico. Estas metodologías contemplan observaciones de campo y la toma de data in situ, por lo que es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

Los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas, permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico. El resultado final es el mapa de zonificación sísmica-geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos. Dependiendo de cada zona, se deben realizar estudios complementarios relacionados a tsunamis, inundaciones por crecida de los ríos, licuación de suelos y deslizamientos de tierra y piedras en zonas de pendiente, entre otros. Estos escenarios son frecuentes en ciudades ubicadas en zonas costeras y otras en las regiones andinas y subandinas, próximas a zonas de alta pendiente y/o adyacentes a las riberas de ríos.

## Norma E.030, diseño sismoresistente

En Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar las indicaciones contenidas en el Reglamento Nacional de Construcción o “Norma E-030, Diseño Sismorresistente (2003)”. Esta norma considera la clasificación de los suelos en función de sus propiedades mecánicas, espesor de estrato, período fundamental de vibración y velocidad de propagación de las ondas de corte ( $V_s$ ), así los suelos pueden ser clasificados en cuatro tipos:

- **Suelos duros (Tipo S1)** Suelos en los cuales la velocidad de propagación de la onda de corte varía entre 750 y 1500 m/s.



Mapa 1. Ubicación y accesibilidad de la ciudad de Arequipa, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.



- **Suelos intermedios (Tipo S2)** Suelos con características intermedias entre las indicadas para los suelos S1 y S3.
- **Suelos flexibles o con estratos de gran espesor (Tipo S3)** Suelos que presentan velocidades de ondas de corte menor e igual a 180 m/s.
- **Condiciones excepcionales (Tipo S4)** Suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables.

En cualquier estudio se deberá considerar el tipo de suelo que mejor describa las condiciones locales de cada zona de interés. Específicamente para este estudio la zonificación sísmica – geotécnica se realizó en función de las características mecánicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación de Arequipa cercado, y de las consideraciones dadas por la Norma 3-030. En tal sentido se estableció la existencia de 5 zonas:

- **Zona I:** Conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) varía entre 500 y 1500 m/s.
- **Zona II:** Se incluyen las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) varía entre 180 y 500 m/s.
- **Zona III:** Conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.8 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) son menores a 180 m/s.
- **Zona IV:** Conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Los periodos predominantes para estos suelos son mayores que 0.7 s; por lo que, su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).
- **Zona V:** Constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir: tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería, buscando que el periodo fundamental de respuesta de la estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica. Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

## Metodología

El estudio de zonificación sísmica – geotécnica de la ciudad de Arequipa Cercado se realizó utilizando información recolectada en campo, y la aplicación de diversas metodologías que se presentan en forma resumida a continuación.

### Estudios de sismicidad

Se hizo uso del mapa sísmico del Perú (Tavera, 2014) para describir las características sísmicas de la zona de estudio. Se describieron los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en la región a fin de describir los daños producidos por estos eventos durante el periodo histórico e instrumental, para lo cual se analizó la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al., (1990), así como la proporcionada por los reportes técnicos elaborados por el Instituto Geofísico del Perú.

### Estudios de peligro sísmico

Se consideró conocer la severidad sísmica o aceleración, en términos de probabilidad, con la cual podría ser sacudida el área en un determinado periodo de tiempo. Se hizo uso del catálogo sísmico y fuentes

sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al., 2012), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al. (1997) y Sadigh et al. (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al., 2007).

### Estudios de geología y geotecnia

Se consideró la recolección en campo de información geológica, geomorfológica, geodinámica y de zonas susceptibles a deslizamientos y/o flujos, específicamente:

- Levantamiento geológico y geomorfológico: información sobre topografía, drenajes, litología, uso de suelos, etc.
- Análisis geodinámico: consideró la evaluación de procesos como intemperismo y meteorización que conducen a movimientos en masa; análisis de los niveles de inundación por crecidas de ríos, entre otros.
- Análisis geotécnico: Análisis de las propiedades físicas y del comportamiento de suelos y rocas, permitió identificar problemas de asentamientos, licuación, expansividad, etc. La recolección de datos para los estudios geotécnicos se realizó mediante calicatas, ensayos de densidad de campo, muestreos con posteadora y ensayos de penetración ligera (DPL). Esa información sirvió para realizar la clasificación SUCS de los suelos.

#### CLASIFICACIÓN SUCS DE LOS SUELOS

Esta clasificación fue propuesta por Arturo Casagrande y sus modificaciones fueron realizadas en el año 1942, siendo actualmente la más utilizada a nivel mundial para la clasificación de suelos desde un punto de vista geotécnico. La SUCS clasifica a los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz No. 200. Los suelos de granos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y si representan más del 50%, los suelos son clasificados como tal, caso contrario son considerados como suelos de grano fino. Cada tipo de suelo se designa por símbolos de grupo acompañados de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas); mientras que, los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos:

G = Grava	C = Arcilla	L = Baja plasticidad
S = Arena	O = Limo o Arcillas orgánicas	W = Bien graduado
M = Limo	H = Alta plasticidad	P = Mal graduado

## Estudios de sismica y geofísica

Se consideró la recolección en campo de información sísmica y geofísica, así como de la aplicación de técnicas para conocer el comportamiento dinámico del suelo, específicamente:

- Método de H/V: utilizando equipos sísmicos complejos se recoge información que permitan construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio.
- Método de arreglos lineales: se hizo uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales, para conocer la velocidad de las ondas de corte (ondas S) utilizando el método MASW; es decir, conocer los cambios de velocidades a lo largo de los diversos estratos existentes en el subsuelo.
- Método de prospección eléctrica: tuvo por objetivo determinar la distribución real del parámetro resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida. Para ello se consideró los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua, considerando solo los perfiles realizados en la superficie del terreno. En este estudio se consideraron cinco (5) rangos de resistividad:
  - » Muy alto resistivo (rojo): valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera a las rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados.
  - » Alto resistivo (anaranjado): valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.
  - » Resistivo o resistividad moderada (verde): valores entre los 100 y 500 ohm.m. Se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.
  - » Bajo resistivo (celeste): valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Asimismo, se puede considerar a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.
  - » Muy bajo resistivo (azul): valores menores a 20 ohm.m. y están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico y/o arcillas.

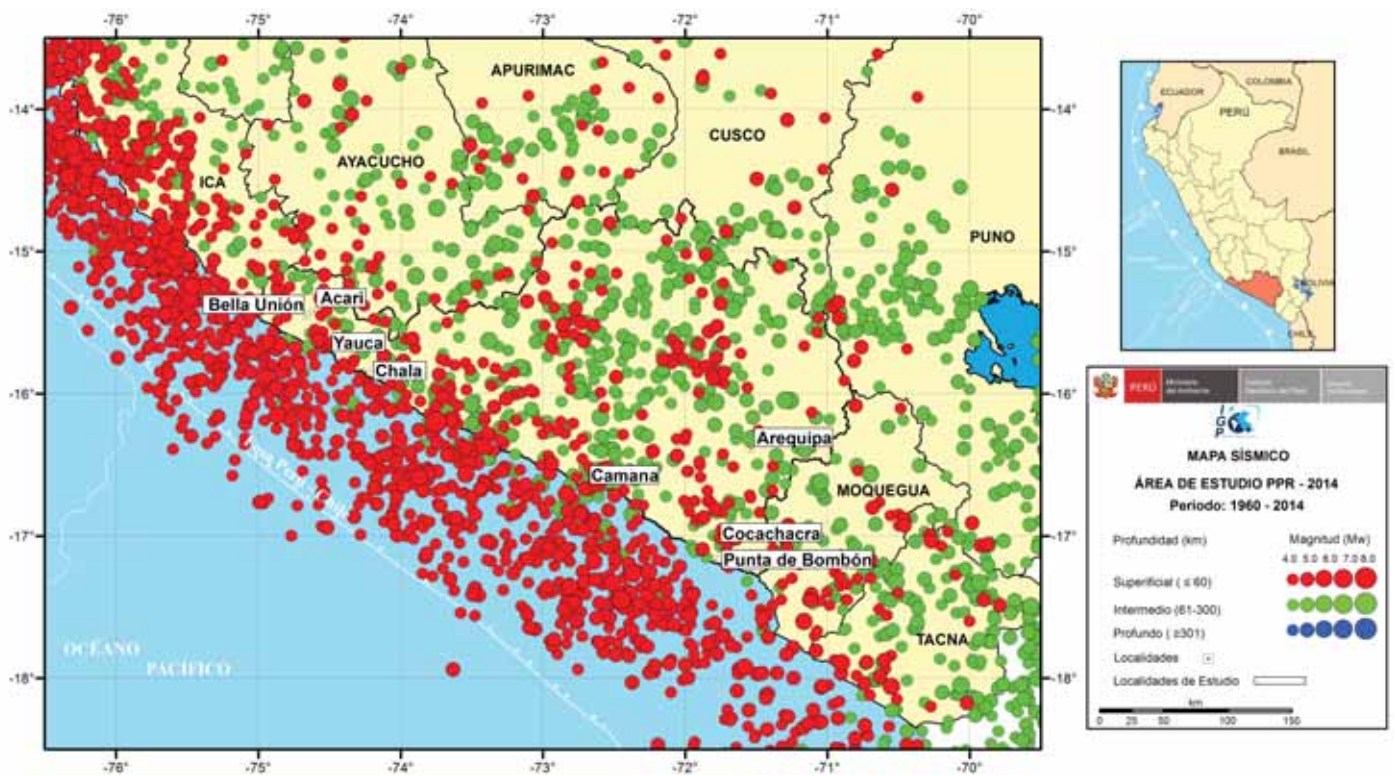
## Sismología

En esta sección se identificarán las características de la sismicidad y el peligro sísmico en la zona de Arequipa Cercado.

### Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región sur presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Mapa 2).



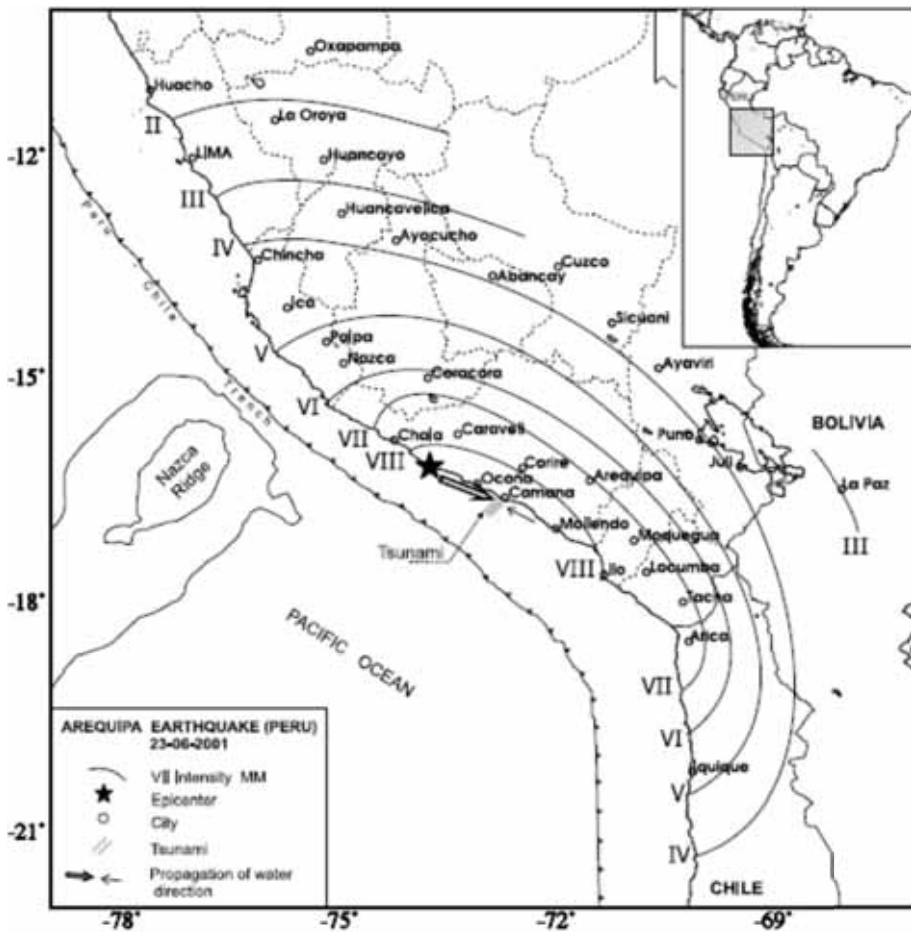


Mapa 2. Sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

Una de estas ciudades es Arequipa y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1604 (8.0Mw), 1868 (8.5Mw) y 2001 (8.0Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en sus construcciones precarias de sillar, además de algunos escenarios de licuación de suelos. En el Mapa 3, se presentan las intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada (MM) para el periodo 1961 a 2014, observándose que los sismos antes mencionados, han generado en la zona costera de la región sur intensidades de hasta VIII (MM), lo cual implica daños mayores principalmente en viviendas de sillar, tal como ocurrió con la catedral de dicha ciudad en el año 2001.



Mapa 3. Intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

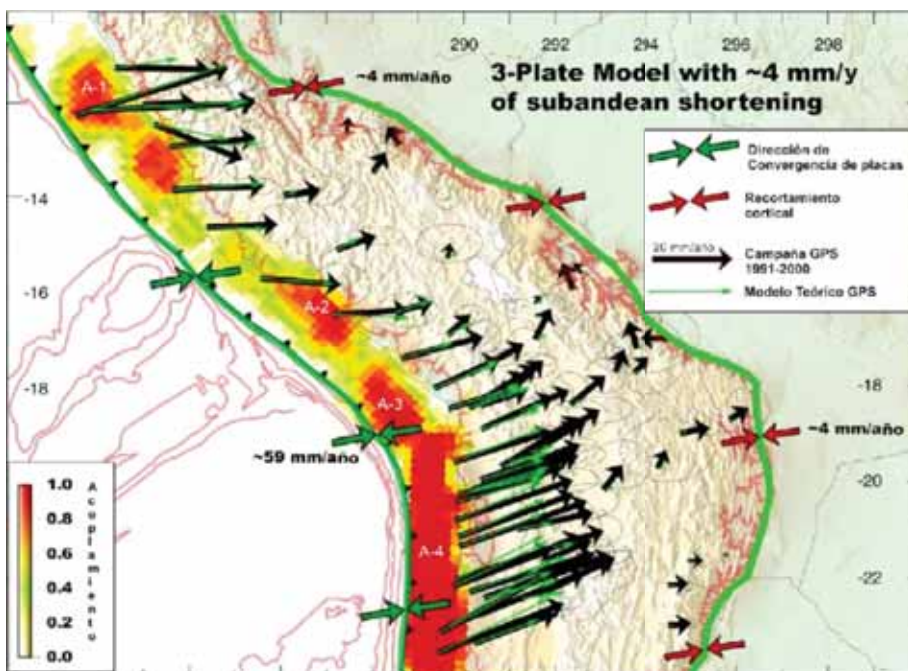


Mapa 4. Intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 23 de junio de 2001 (Tavera y Buforn, 2001)

identificados en la provincia de Arequipa fueron: población damnificada: 25,782; heridos: 1,422; fallecidos: 7; viviendas afectadas: 5,332; viviendas colapsadas: 1,631; centros educativos afectados: 219; centros educativos destruidos: 587; centros de salud afectados: 27; puentes averiados: 10.

Los sismos de 1979 y 2001 fueron los que causaron mayor daño en la ciudad, principalmente este último debido a la elevada magnitud que alcanzó el evento (8.2 Mw). Según Tavera et al. (2002), el sismo del 2001 produjo una área de ruptura del orden de 350x100 km<sup>2</sup>, siendo el eje mayor paralelo a la línea de costa, causando daños y efectos desde Ocoña hasta la península de Ilo en Moquegua. El proceso de ruptura de este evento concluyó con la ocurrencia de tres importantes réplicas y de ellas, dos presentaron sus epicentros entre las ciudades de Camaná y Punta de Bombón.

Según el Mapa 4, el sismo del 2001 produjo en la ciudad de Arequipa – Cercado intensidades de VII (MM) produciendo daños y efectos en viviendas, iglesias y principalmente, la catedral de la ciudad de Arequipa. Asimismo, el tsunami que siguió al sismo mayor, presentó mayor intensidad y daños en el área costera de la ciudad de Camaná. Según INDECI, los daños



Mapa 5. Distribución de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al., 2011).



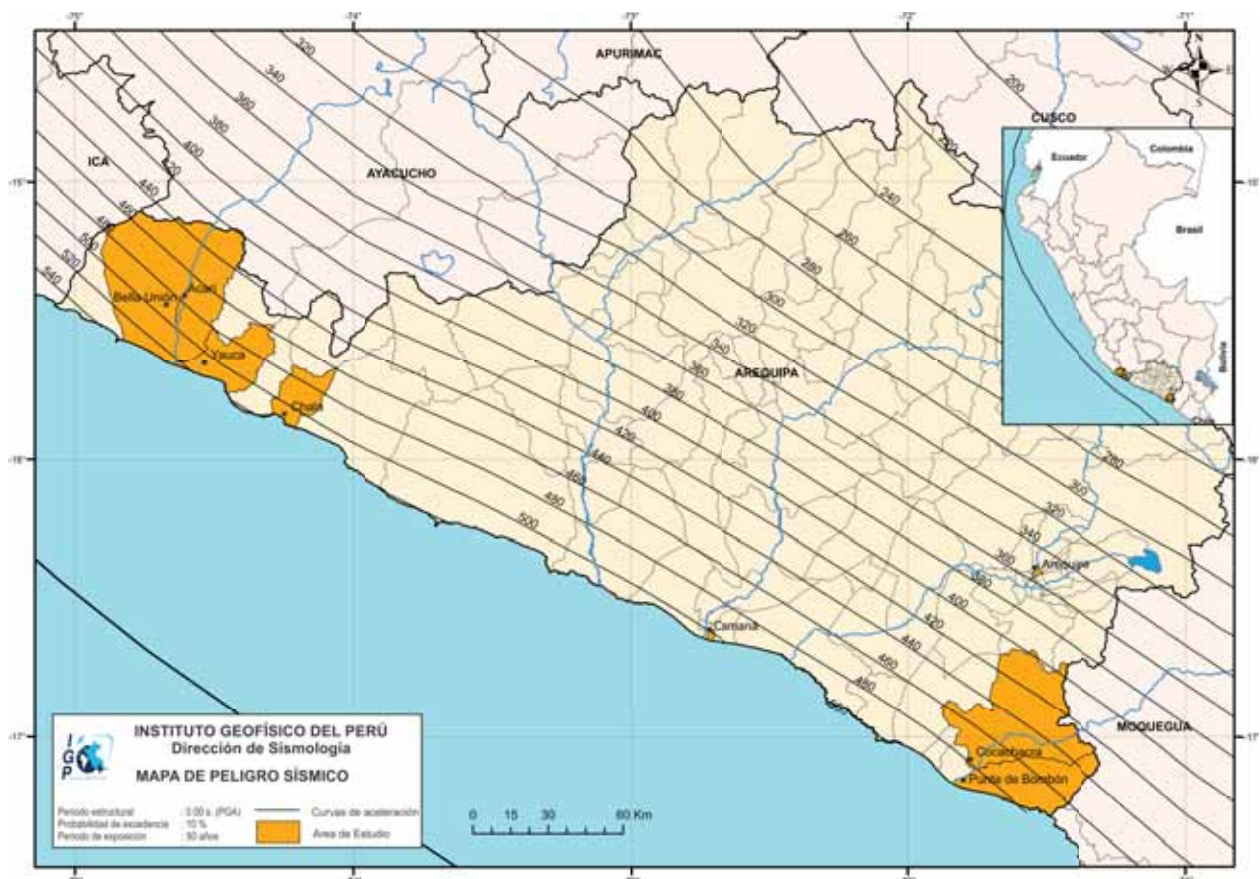
Según Tavera (2014), el sismo ocurrido en el año 2001 habría liberado aproximadamente el 60% de la energía acumulada en la zona costera de la región sur del Perú desde el año 1868; por lo tanto, la energía restante debe ser liberada por otro evento sísmico que involucraría un área de ruptura por debajo de la península de Ilo, y que produciría en la ciudad de Arequipa - Cercado niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001.

Esta información es corroborada por estudios realizados por Chlieh et al. (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En el Mapa 5 se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo codificada como A-3 la que tiene una alta probabilidad de generar un evento sísmico de gran magnitud en la región. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, dado que por las dimensiones del área, el sismo que se produciría también afectaría a la zona de estudio.

## Peligro sísmico

El peligro sísmico permite conocer, en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso de tiempo. Este parámetro es expresado en términos de aceleración. Para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al., 2014), las ecuaciones de atenuación definidas por Young et al. (1997) para fuentes de subducción, y de Sadigh et al. (1997) para las fuentes continentales. El algoritmo utilizado para el cálculo del peligro sísmico es el CRISIS-2007 (Ordáz et al., 2007).

Para el área que abarca la ciudad de Arequipa - Cercado se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 340 a 360 gals (Mapa 6), equivalentes a intensidades del orden de VII (MM); es decir, suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos, tal como ocurrió con el sismo de Arequipa del 2001 (Tavera, 2001) y Pisco del 2007 (Tavera, 2008).



Mapa 6. Peligro sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

# Geomorfología, Geología y Geodinámica

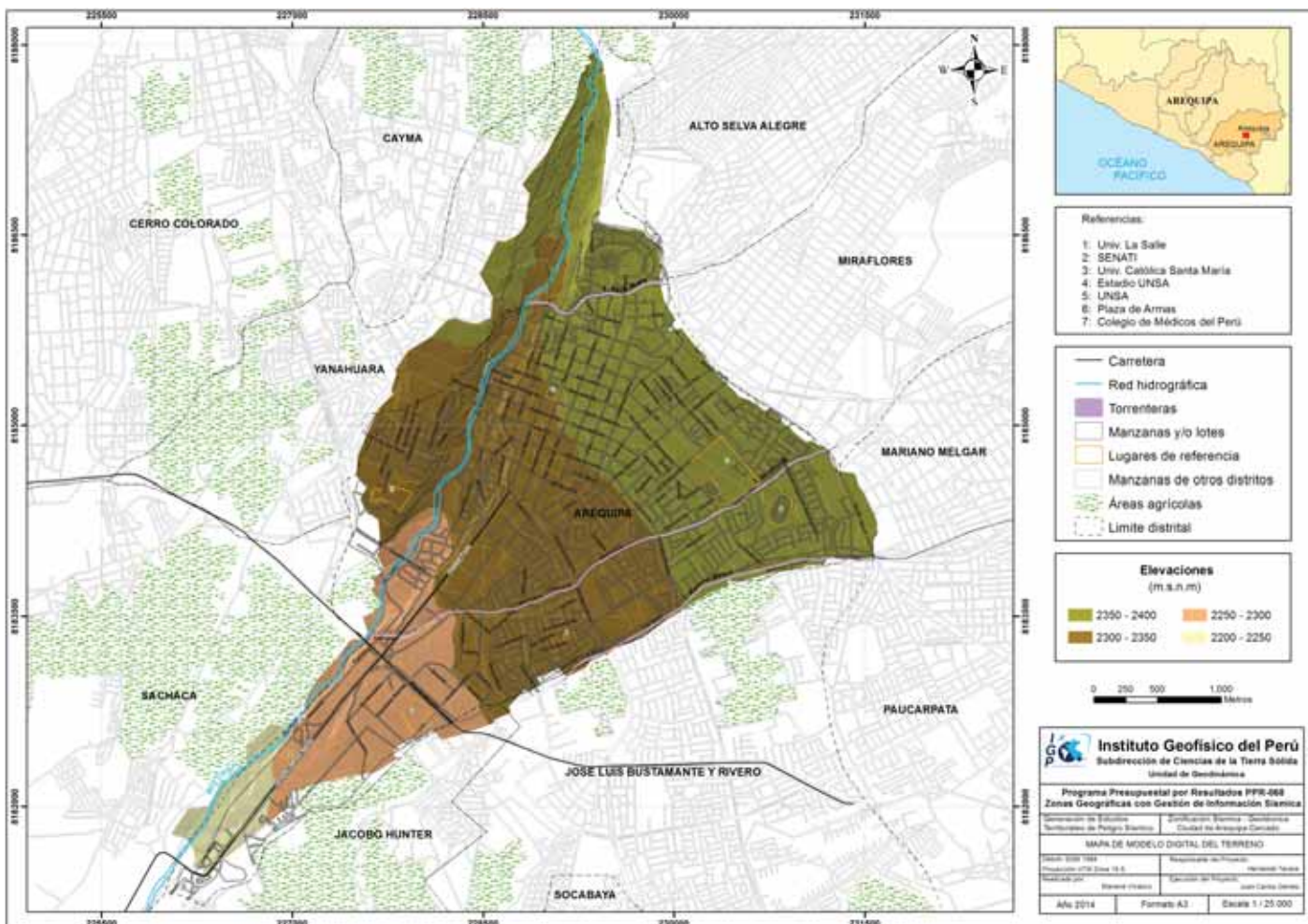
En esta sección se identificarán las características geomorfológicas, geológicas y geodinámicas de la zona de estudio.

## Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores son el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como fuerzas creadoras de las grandes elevaciones y depresiones formadas principalmente por movimientos del componente vertical y las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa que se agrupan en la cadena de meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008).

En base de la topografía de terreno y el uso de herramientas computacionales como SIG y CAD, se elaboró el mapa digital de terreno y plano de pendientes a fin de delimitar las características del terreno, las mismas que fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Arequipa – Cercado.

El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:5000, resolución espacial de 5 metros y referenciada al geoide WGS84 (Zona 18S). El MDT elaborado se presenta a escala gráfica de 1:20000 y cubre un área de 13 km<sup>2</sup> (Mapa 7). La ciudad de Arequipa – Cercado se asienta sobre un abanico aluvial con alturas entre 2200 a 2400 m.s.n.m.



Mapa 7. Modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores

Asimismo se identificaron los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. Para ello se aplicó la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. El resultado indicó que Arequipa - Cercado se encuentra sobre terrenos cuyas pendientes son menores a 5°; por lo tanto, presenta un terreno casi plano, aunque en el distrito de Selva Alegre se presentan pendientes entre 60° y 80° correspondientes a cortes de taludes generados por la actividad antrópica.

En el área de estudio se identificaron las siguientes unidades geomorfológicas, cuyas principales características se describen a continuación:

### **Origen deposicional**

La ciudad de Arequipa - Cercado se asienta sobre el valle del río Chili conformado por una penillanura ligeramente plana e inclinada hacia el suroeste (4%). Esta geoforma es producto del levantamiento de la cordillera del Barroso y las rocas ígneas de la caldera, resultaron ser la base de deposición de materiales de distinta naturaleza que dieron lugar a la nivelación de la superficie. Los suelos están conformados por materiales tufaceos hacia el oeste y detríticos hacia el este (Kosaka, 2000). Sobre la esta penillanura se ha desarrollado el casco urbano de la ciudad de Arequipa o distrito de Arequipa - Cercado. Las geoformas identificadas son:

- Penillanura del Cercado. Conocida también como superficie del cercado (pendiente de 5° hacia el suroeste), está conformada por materiales fluvio-aluviales (cantos, gravas, arenas) con contenido de material volcánico que procede de las partes del volcán Misti (ubicado aproximadamente a 11 km de la ciudad) en forma de aluviones. El material depositado y/o acumulado ha adoptado una forma plana con ligeras ondulaciones de gran extensión y sobre la cual se asienta la ciudad de Arequipa y se ha desarrollado el casco urbano de los principales distritos. La penillanura es atravesada por quebradas activas en épocas de precipitaciones pluviales (enero-marzo) e inactivas el resto del año, siendo conocidas comúnmente como torrenteras. Cuando las precipitaciones pluviales superan los 160 mm mensuales, el agua que discurre por estas, superan la capacidad de embalse haciendo que se desborde provocando inundaciones y causando daños a la infraestructura de la ciudad. El 90 % del terreno de Arequipa Cercado se encuentra urbanizado.
- Terrazas aluvio-fluviales. Ubicadas a ambos márgenes del río Chili, principalmente en sus extremos noreste y suroeste. Están formadas por la acumulación y/o deposición de la carga aluvio-fluvial e incisión del mismo y conformadas por materiales como gravas, limos y arenas. Actualmente, son utilizadas para la actividad agrícola sobre una superficie que representa el 10 % del área de Arequipa Cercado.

### **Origen aluvial**

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968). En las inmediaciones del distrito de Arequipa Cercado se han identificado una serie de sistemas hidrológicos que se activan en épocas de precipitaciones pluviales extremas (enero-marzo) e inactivas el resto del año, conocidos comúnmente como torrenteras. El agua que discurre por estas desde las partes altas, muchas veces superan la capacidad de embalse haciendo que se desborde provocando inundaciones y la generación de flujos de detritos que causan daños a la infraestructura de la ciudad.

En la ciudad de Arequipa existen 7 torrenteras y de ellas, 3 pasan por el distrito de Arequipa Cercado: San Lázaro, Miraflores y Mariano Melgar: estas torrenteras tienen su punto de origen en los flancos del volcán Misti. En épocas de lluvias se comportan como colectores secundarios naturales que desembocan sobre el colector principal, el río Chili.



## Origen fluvial

El modelado eólico resulta de la acción continua del viento que ocasiona la erosión, transporte y depositación de material sedimentario fino característico de la granulometría de las arenas. Los ríos son esencialmente agentes de erosión y de transporte que suministran a los océanos agua y sedimentos procedentes del continente. A pesar de que <0.005% del agua continental se encuentra en los ríos en un momento determinado, el flujo del agua es una de las fuerzas más importantes que operan en la superficie terrestre (Knighton, 1998). La ciudad de Arequipa Cercado se asienta sobre el valle del río Chili conformado por una gran penillanura que es cortada por el río del mismo nombre, además de algunas quebradas que se originan en el cuerpo volcánico del Misti, para luego desembocar en el río Chili

## Geología

Para el estudio geológico de la ciudad de Arequipa-Cercado, se hizo uso de la información contenida en el compendio de geología regional de INGEMMET (a escala regional 1:100000), complementado con la geología local obtenida en base al cartografiado realizado en campo (escala 1:5000).

En el contexto regional, el suelo de la ciudad de Arequipa-Cercado está conformado por el gneis de edad Precambriana como parte del Complejo Basal de la Costa y que aflora al noroeste fuera del área de estudio. En el área de la ciudad y alrededores se observa la presencia de depósitos aluviales limitados por tufos volcánicos (oeste) y flujos de lodo (este), y que corresponden a sedimentos detríticos como arenas, arcillas y limos que engloban a guijarros, cantos rodados y bloques con algunos restos de piedra pómez, además afloran depósitos que pertenecen al Cenozoico representados por el grupo Barroso (flujos de barro), y depósitos recientes (aluviales y eluviales).

En cuanto a la geología local, en la ciudad de Arequipa Cercado se han reconocido la existencia de 3 unidades geológicas del período Cuaternario, Holoceno y Pleistoceno (12000 años). Estas unidades son los depósitos de flujo de barro, depósitos aluviofluviales y depósitos aluviales, los cuales son descritos brevemente a continuación.

COLUMNA LITOCRONOESTRATIGRAFICA			
ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD Y DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Eluviales Qh-el
			Dep. Aluviales Qh-al
		Pleistoceno	Discordancia
			Flujos de barro Qp-Fb
			Discordancia
			Gpo. Barroso
	NEOGENO	Plioceno	Volc. Barroso
			Volc. Chila
		Mioceno	Discordancia
			Volc. Sencca Tp-vs

Figura 1. En la columna, los colores rosa corresponden a las unidades aflorantes y las de plomo, al basamento en la ciudad de Arequipa Cercado (Vargas, 1970)

## Depósitos cuaternarios

El basamento rocoso más importante corresponde al volcánico barroso que yace sobre los volcánicos Chila y Sencca con discordancia erosional, y que ocasionalmente se le encuentra debajo de los depósitos de flujos de barro, fluvio-glaciares y aluviones recientes. Su litología consiste en lavas andesíticas en bancos gruesos, gris oscuras a gris claras, que por intemperismo toman colores rojizos y marrones. Sobreyace a esta unidad los flujos de barro, que están presentes en el distrito de Socabaya, Hunter y en las faldas occidentales del Misti, además de remanentes presentes en el extremo noreste de la ciudad, parque Selva Alegre.



## Depósitos aluvio-fluviales (Qr-af)

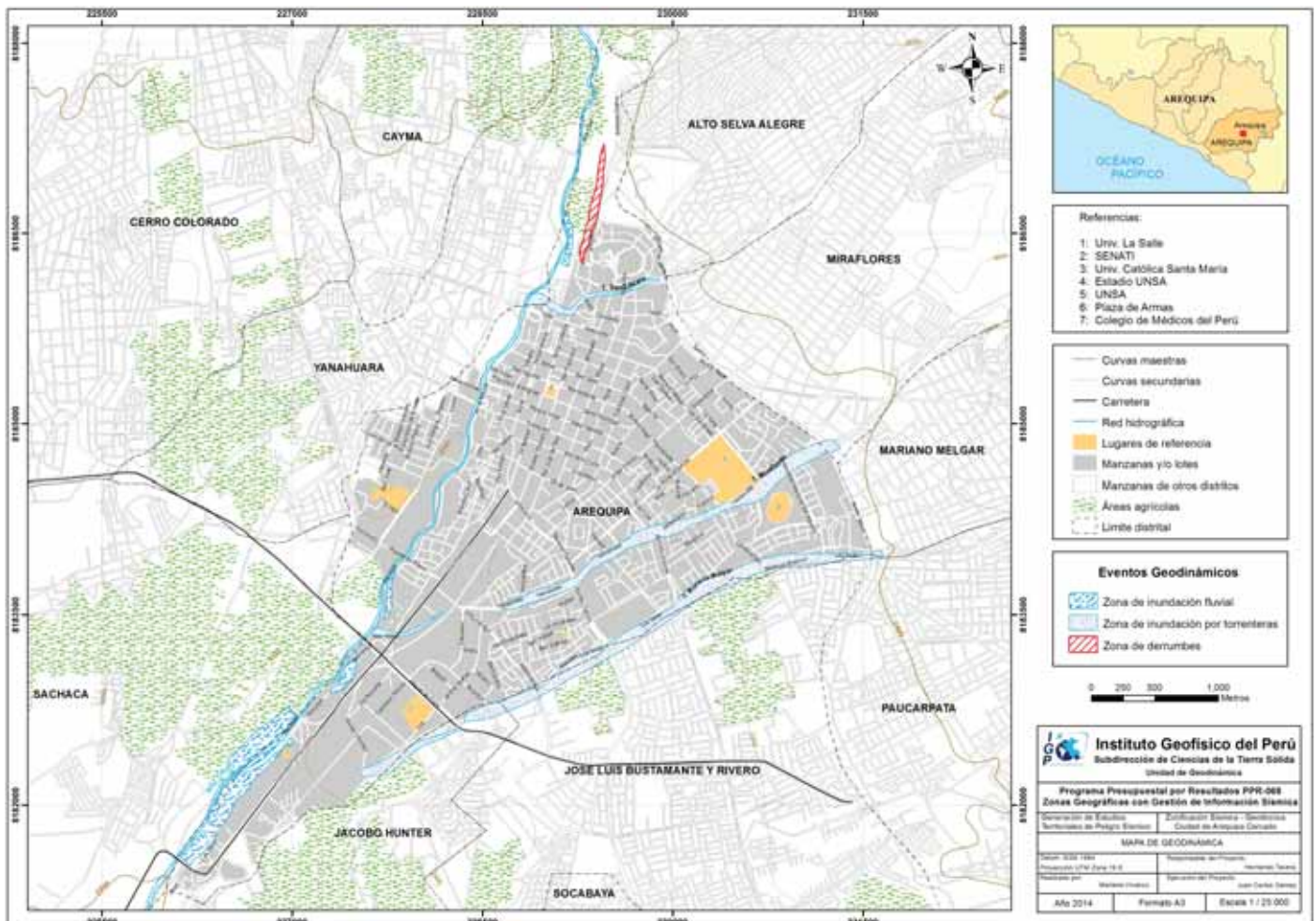
Constituyen la penillanura de Arequipa, además de estar presentes en el lecho del río Chili en forma de terrazas. Están conformados por secuencias alternadas de gravas, arenas y limos. En las quebradas (torreteras), estos materiales rellenan su cauce y presentan formas redondeadas a subredondeadas.

## Depósitos eluviales (Qr-el)

Conocidos comúnmente como suelos residuales que se forman in situ. En la ciudad de Arequipa Cercado abarcan los terrenos de cultivo conformados por composiciones de arenas limosas de color marrón oscuro.

## Geodinámica

La geodinámica interna y externa presente en la zona de estudio, es la responsable de modelar la superficie, creando geoformas que han sido objeto de estudio en capítulos anteriores. A continuación, se analiza los procesos dinámicos que se desarrollan en la ciudad de Arequipa Cercado, tales como los movimientos en masa y las inundaciones, y que se ven plasmados en el Mapa 8.



Mapa 8. Geodinámica de la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores.

## Movimientos en Masa (MM)

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan laderas abajo, rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). El trabajo de campo realizado en la ciudad de Arequipa Cercado y alrededores, permitió identificar dos tipos de eventos: los derrumbes (tipo de movimiento) y las inundaciones por torreteras y sus características son:

- Derrumbes. Son movimientos de tierra que se desarrollan de forma rápida sobre superficies con pendientes  $>30^\circ$ , sea por efecto de la gravedad o por inestabilidad del material debido a los factores naturales como el clima, topografía, sismos, composición de suelos, entre otros; además, de antrópicos por construcción de casas, excavación de pendiente o laderas, entre otros. La ciudad de Arequipa Cercado, se encuentra rodeada por el complejo volcánico Chachani-Misti-Pichu Pichu. El volcán Misti está ubicado a 13 km de la ciudad y es considerado como activo; es decir, que se producen sismos de origen volcánico (sismos híbridos: asociados a la ascendencia de magma), no percibidos por la población, pero que a través del tiempo desestabilizan los terrenos. Se debe sumar a este factor la actividad antrópica debido a que la población realiza cortes de talud para fines urbanísticos. En el extremo norte de la ciudad de Arequipa - Cercado, se ha identificado la presencia de un área susceptible a derrumbes, con una longitud de 400 metros entre el puente Chilina (Chilina) hasta el inicio de la Av. Raúl Haya de la Torre. La composición litológica de estos suelos es de flujos de barro. Los agentes detonadores para los derrumbes son las precipitaciones entre los meses de enero a marzo, el riego de terrenos y cortes de talud para ampliar caminos (actividad antrópica).
- Zonas de inundación por torrenteras: La ciudad de Arequipa Cercado se encuentra a una altura de 2300 m.s.n.m en el valle del río Chili, está rodeada por volcanes que sobrepasan los 5000 m.s.n.m y en sus flancos, nacen un gran número de quebradas conocidas comúnmente como torrenteras que transportan agua en periodos de lluvias (diciembre-abril) para luego desembocar en el río Chili. Las torrenteras que atraviesan a la ciudad de Arequipa Cercado son las de San Lázaro, Miraflores y Mariano Melgar, todas encausadas por la actividad antrópica con fines urbanísticos, llegando a irrumpir su cauce natural. Durante el mes de enero de 2013, estas torrenteras colmataron sus cauces provocando inundaciones que causaron severos daños a la infraestructura física de la ciudad y pérdida de vidas humanas. Debido a la torrentera de Miraflores, el sector más afectado fue la avenida Venezuela, en el tramo comprendido entre la calle Salaverry y el pasaje Martinetti en donde provocó la inundación de casas y la muerte de cuatro personas. Según el diario la Republica de esa fecha, la escorrentía superficial de las torrenteras que desembocaron en el río Chili, produjeron que el caudal del mismo sobrepasara el puente Tingo.

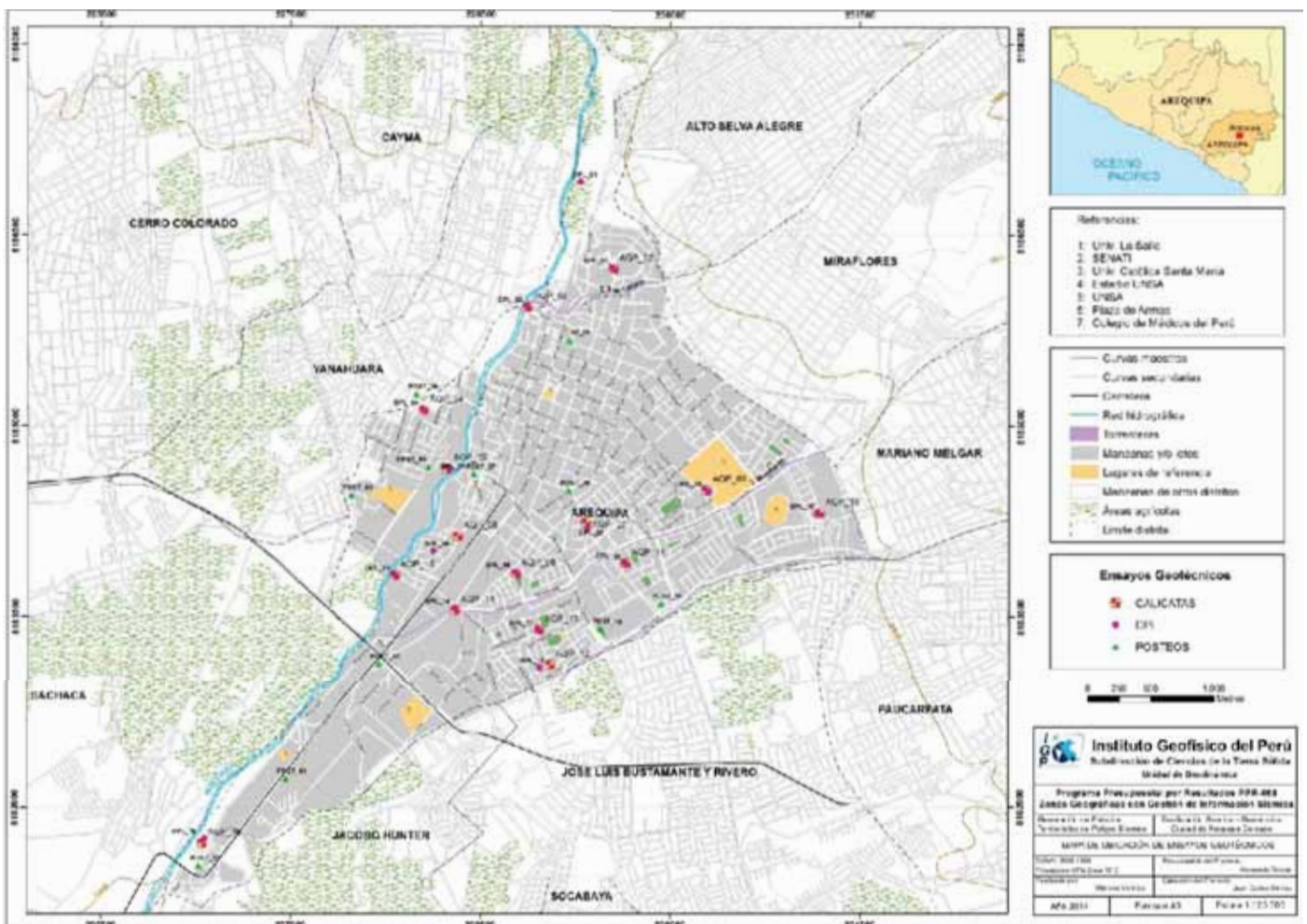
## Geotecnia

Los estudios geotécnicos tienen por finalidad analizar y cuantificar las características físicas de los suelos, pues su comportamiento es relevante al momento de ser utilizado como elemento de medida para el soporte de una estructura determinada (cimientos). Para el estudio de los suelos en la ciudad de Arequipa - Cercado se hizo un exhaustivo trabajo de recolección de datos, que incluyó el uso de las siguientes técnicas:

- **Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420):** En la ciudad de Arequipa - Cercado se construyeron 16 calicatas, siendo la profundidad máxima de observación del orden de 4.25 metros y la mínima de 0.75.
- **Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556):** En cada punto de exploración se realizó el ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales.
- **Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452):** A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 11 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual, siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 1.7 metros y la mínima de 0.3 metros. Los resultados obtenidos indican que en la ciudad de Arequipa Cercado, los suelos están conformados principalmente por gravas arenosas

- **Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094):** Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 16 puntos dentro de la ciudad de Arequipa Cercado (Tabla 6). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 2.5 metros y mínima de 0.25 metros debido a que los suelos están conformados por gravas y arenas; además de presentar ángulos de fricción promedio de 27° y 40°, propios de suelos granulares.
- **Ensayo de corte directo (Norma ASTM D3080):** Para conocer la resistencia de los suelos al corte, se procedió a enviar al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina las 16 muestras extraídas de campo. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Arequipa Cercado no presentan cohesión; mientras que, los ángulos de fricción interna oscilan entre 36° y 37°, propios de suelos granulares como las arenas y gravas.

En el Mapa 9 se presenta la ubicación de las calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Arequipa Cercado.



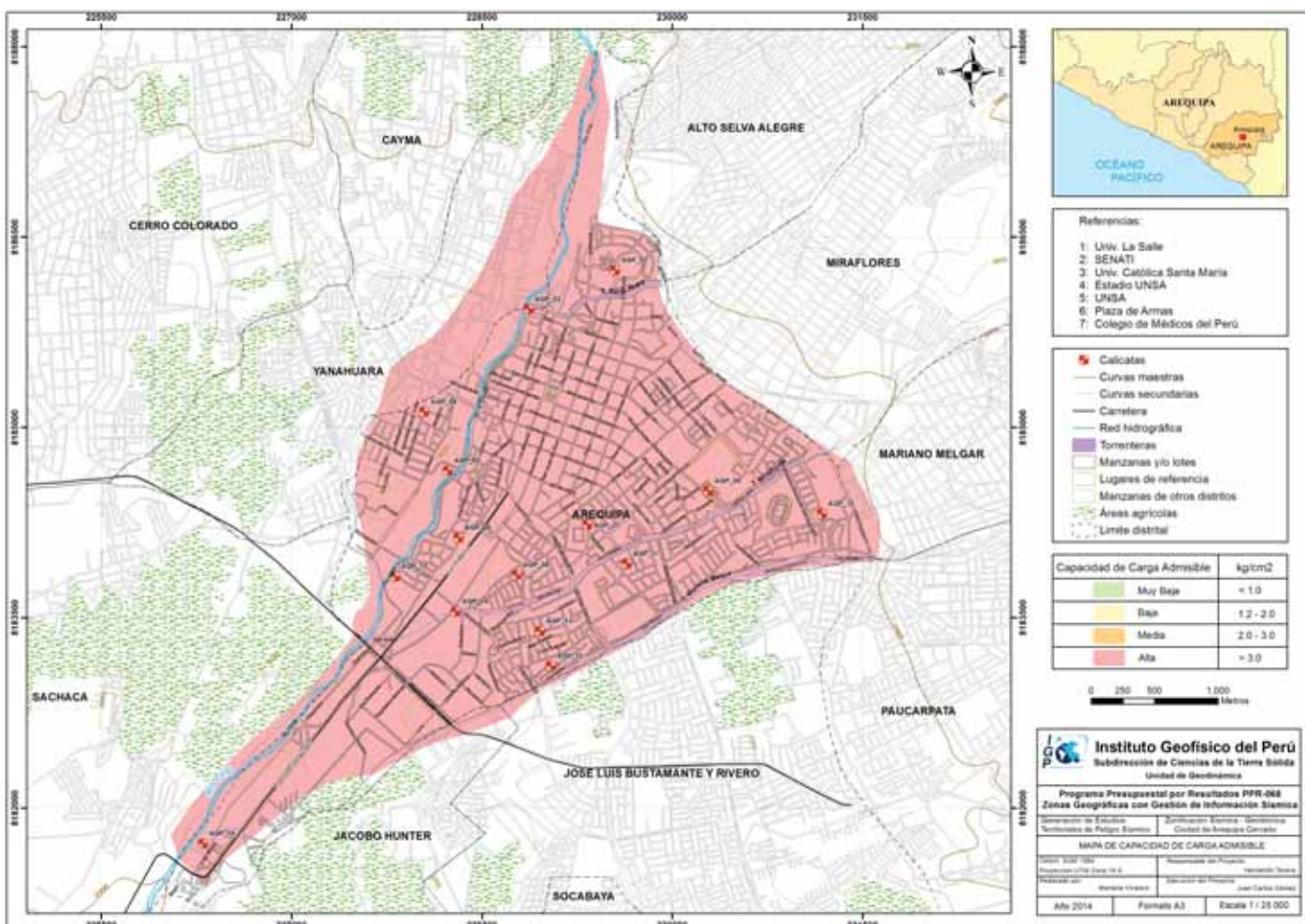
Mapa 9. Ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Arequipa -Cercado



## Capacidad de carga admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad de carga admisible. De los ensayos de corte directo se hace uso los datos del ángulo de fricción y la cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3 definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Arequipa Cercado, los valores de capacidad de carga fueron calculados para una profundidad de cimentación de 1.2 metros y ancho mínimo de cimentación de 1 metro.

Según los resultados obtenidos, la ciudad de Arequipa Cercado se asienta sobre suelos con capacidad portante alta (>3 km/cm<sup>2</sup>), registrándose el máximo en la Calle San Javier (extremo NE de la plaza de Armas, Calicata 8) con valores de 5.02 km/cm<sup>2</sup> (Mapa 10).



Mapa 10. Capacidad portante del terreno para la ciudad de Arequipa Cercado

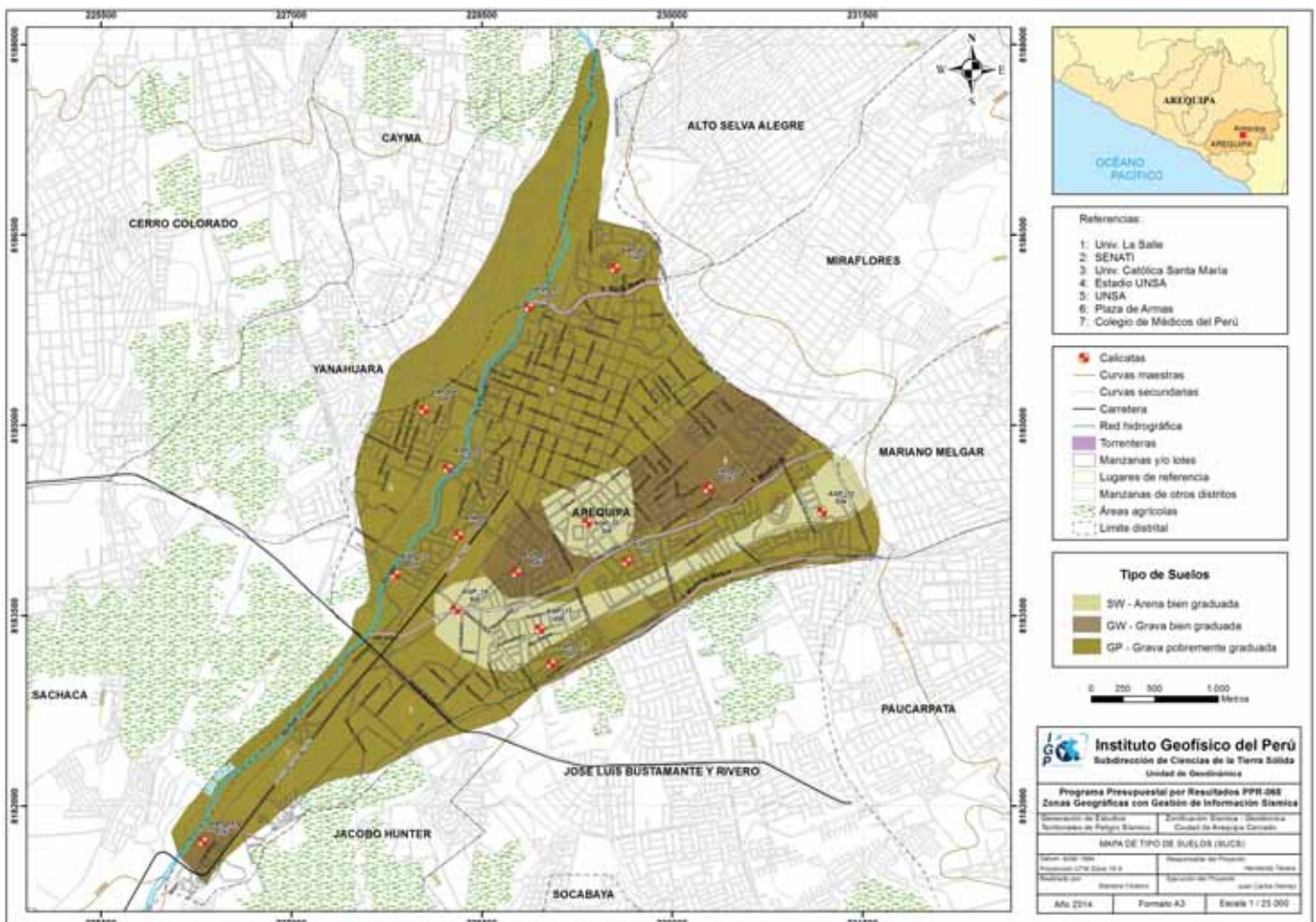
## Clasificación de suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se realizó la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Arequipa Cercado. Se identificó la existencia de 3 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación, y que cuya clasificación se plasma en el Mapa 11:

- Suelos tipo GW: Están conformados por gravas bien graduadas con presencia de arenas y limos. Estos suelos presentan contenidos de humedad de 2.80% (calicata 8), 2.50% (calicata 9) y 16% (calicata 16), este último debido a que los suelos presentan humedad alta debido a que el nivel freático superficial está a una profundidad de 0.70 metros. No presentan límite plástico y son

considerados como suelos compactos. Su capacidad de carga varía entre 3.24 a 5.02 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos abarcan el 15% de la superficie de la ciudad de Arequipa Cercado, principalmente en las urbanizaciones de La Perla, Ferroviarios y Tingo.

- Suelos tipo GP: Suelos conformados por gravas arenosas mal gradadas. Los materiales granulares superan el 65% en promedio; mientras que, los finos no superan el 34%. En estos suelos el contenido de humedad varia de 3.10% a 11.00%, siendo este último alto debido a que el nivel freático superficial está a 4.00 metros. Son considerados como suelos compactos y no presenta plasticidad. Su capacidad de carga admisible varía de 4.85 a 4.90 Kg/cm<sup>2</sup>, y están presentes en la mayor parte de la superficie del área urbana, desde el lado noreste (Selva Alegre) hasta el sureste de la ciudad de Arequipa Cercado, llegando a ocupar el 70 % de los suelos de la ciudad.
- Suelos tipo SW: Conformados por arenas bien graduadas con presencia de limos y gravas. El porcentaje de humedad es variada. Son suelos poco compactos y sin plasticidad. Su capacidad de carga varía entre 4.19 a 4.75 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos abarcan el 15% de la ciudad de Arequipa - Cercado, principalmente en los sectores del Estadio Melgar, Castelar, Estadio UNSA y SIDSUR.



Mapa 11. Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Arequipa - Cercado



# Sísmica y Geofísica

Tal como se mencionó en la sección de metodologías, para la realización de este estudio se utilizaron diversos métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos lineales (MASW) y tomografía eléctrica; todos ellos con el objetivo conocer las propiedades físicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.) a efectos de lograr su caracterización geofísica. A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos para la ciudad de Arequipa Cercado.

## Estudio Sísmico con la Técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica se utilizó el mapa catastral de la ciudad de Arequipa-Cercado, sobre el cual se definió la distribución espacial de los 322 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 15 minutos, lo cual permitió disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis. Esta información permitió obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa.

En la Figura 2 se muestra como ejemplo el procedimiento seguido para el punto AQ-302. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 15 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes entre 1.0 y 7.9 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que la energía se irradia en dirección este-oeste. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

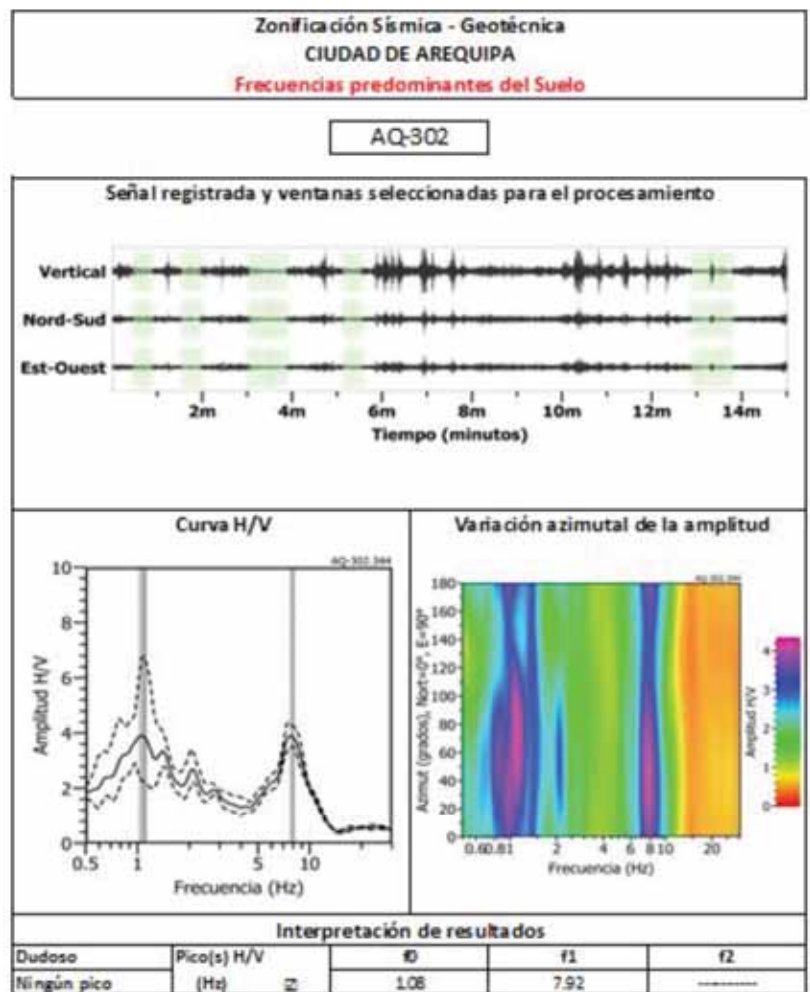


Figura 2. Ejemplo de la ficha H/V para el punto AQ-302 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba: señal registrada; medio: razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

## Estudios sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos

La técnica MASW (Multichannel Análisis of Surface Waves) permite conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales registradas por arreglos lineales de estaciones sísmicas. Como resultado de la inversión de la curva de dispersión, se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de corte (Vs) en el punto central de cada arreglo.



Para el registro de información se utilizó un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24-canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 110 dB. Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos (entre 3 y 6 metros) y el punto de impacto del martillo, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos. Para eliminar el registro de ruido de fondo se realizaron entre 6 y 12 golpes en cada punto de disparo, permitiendo el estaqueo temporal de los datos y así, aumentar la coherencia en los resultados.

En el Mapa 12 se presenta la distribución espacial de 10 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AQ...., LS10-AQ. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se consideró la clasificación que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte ( $V_s$ ):

- Rocas duras, velocidades  $V_s > 1,500$  m/s
- Rocas moderadamente duras, velocidades  $V_s$  de 800 a 1500 m/s
- Suelo muy duro o roca blanda, velocidades  $V_s$  de 500 a 800 m/s
- Suelo duro, velocidades  $V_s$  de 180 a 500 m/s
- Suelo blando, velocidades  $V_s < 180$  m/s
- Suelo excepcionalmente blando (S4) (condiciones excepcionales)

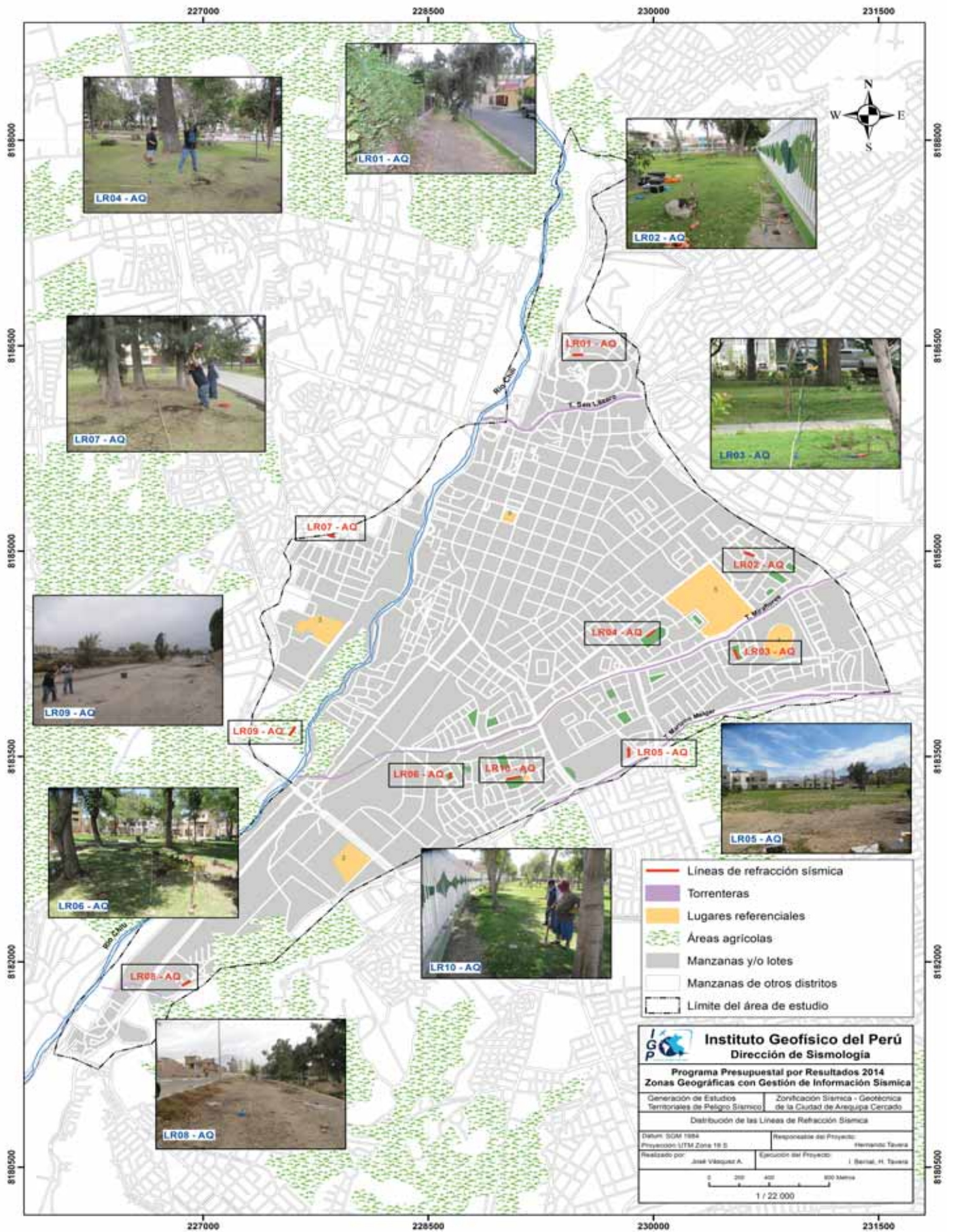
Los perfiles de suelos obtenidos con el método MASW para la ciudad de Arequipa - Cercado, evidencian la presencia de suelos superficiales conformados por una capa I de poco espesor y baja velocidad, asentada sobre otra con espesores que fluctúan entre 5 a 12 metros y velocidades  $V_s$  alrededor de los 350 m/s correspondientes a suelos blandos a duros. El semi-espacio hacia el norte del área de estudio alcanza velocidades de hasta 1000 m/s y conforme se tiende hacia el extremo este y sur, las velocidades disminuyen a 500 y 700 m/s respectivamente. Estos resultados evidencian la presencia de una tercera capa antes de llegar a roca.

## Periodos dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica H/V, los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos. En el Mapa 13 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Arequipa Cercado.

Los periodos entre 0.3 y 0.5 segundos, se distribuyen en el extremo este de la ciudad, entre las torrenteras de Miraflores (Av. Venezuela) y Mariano Melgar, y con mayor concentración en las cercanías del Estadio de la Universidad San Agustín. Estos mismos periodos están dispersos al extremo SE del estadio Mariano Melgar y hacia el extremo norte, próximo a la Av. Chilina en donde algunos puntos evidencian periodos del orden de 0.3 segundos. Periodos entre 0.1 a 0.2 segundo se distribuyen sobre el 80 % del área de estudio.

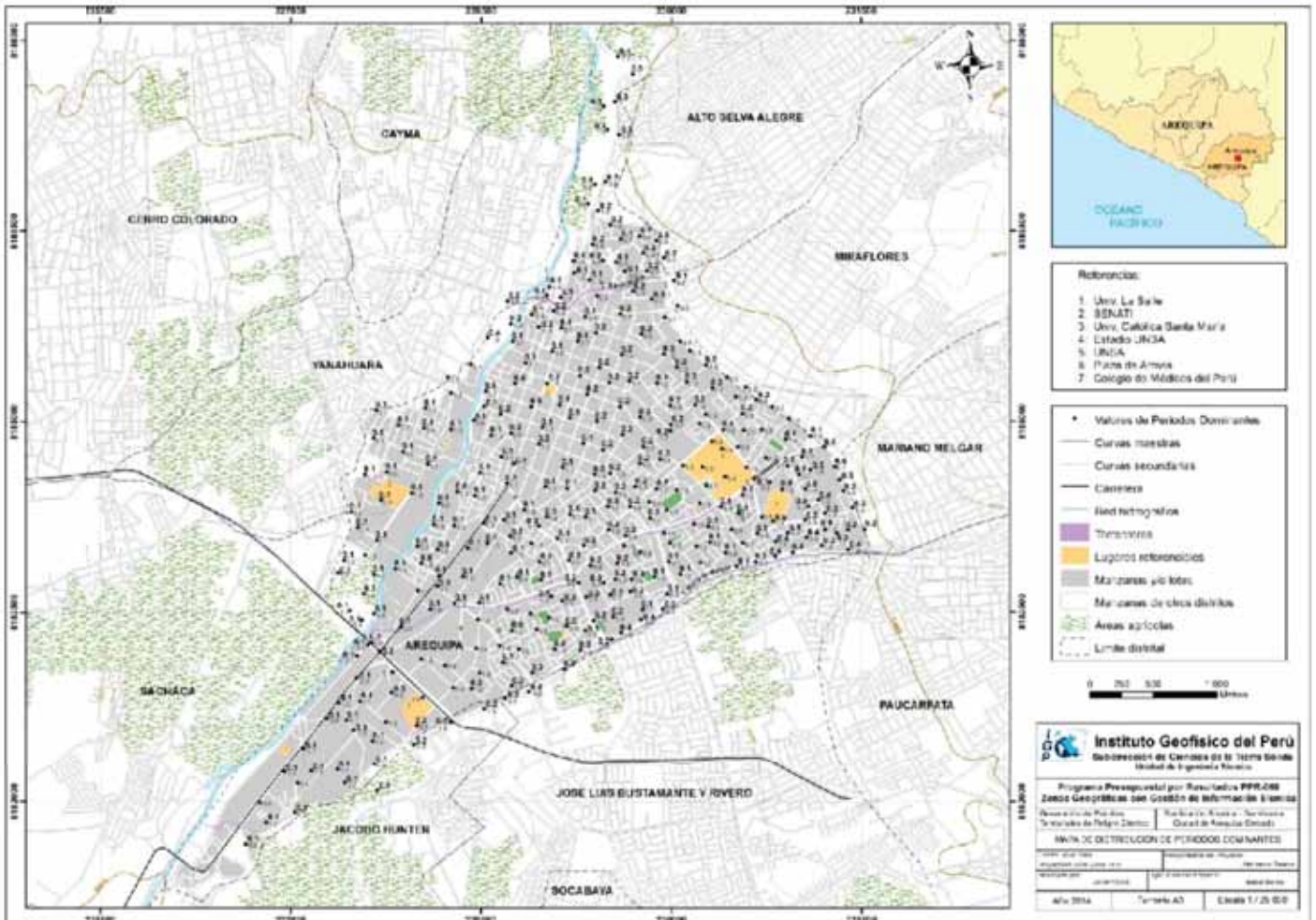
En el mismo mapa se presentan - con números en negro -, las áreas en las cuales los periodos presentan mayor amplificación, todos ubicados en el extremo NE de la ciudad. En gris se presentan los periodos con menor amplificación y se encuentra principalmente en el extremo SO y margen derecha del río Chili. Del mismo modo, se observa la presencia de áreas pequeñas en las cuales los suelos no muestran amplificaciones, lo cual sugiere que los suelos son competentes. En general, la ciudad de Arequipa Cercado se encuentra sobre suelos conformados por una terraza de grava muy consistente, además de la presencia de suelos en una capa superficial muy delgada y de menor consistencia.



Mapa 12. Distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AQ, ..., LS10-AQ, en la ciudad de Arequipa Cercado



El análisis detallado de los resultados obtenidos en este estudio, han permitido identificar la presencia de suelos que responden a periodos dominantes entre 0.7 y 1.4 segundos, los cuales acondicionan la dinámica local del subsuelo; sin embargo, estos valores requieren un mayor análisis para su interpretación, pero que deben ser considerados en la construcción de determinadas estructuras.



Mapa 13. Distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes con amplitud elevada y en gris los de menor amplitud.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Arequipa Cercado están relacionados por sus condiciones físico - dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$  ( $T_0$ , periodo dominante;  $H$ , espesor del estrato y  $V_s$ , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo. Asumiendo, una velocidad de 350 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.2 y 0.5 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 17 y 43 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con métodos geofísicos.

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra la presencia de tres áreas con suelos dinámicamente similares. El extremo este, entre las torrenteras de Mariano Melgar y Miraflores, sobre un área de menor dimensión se distribuyen periodos entre 0.4 a 0.5 segundos y de entre 0.3 a 0.4 segundos de manera sectorizada. En el resto del área de la ciudad, se tiene periodos dominantes de 0.1 y 0.2 segundos.

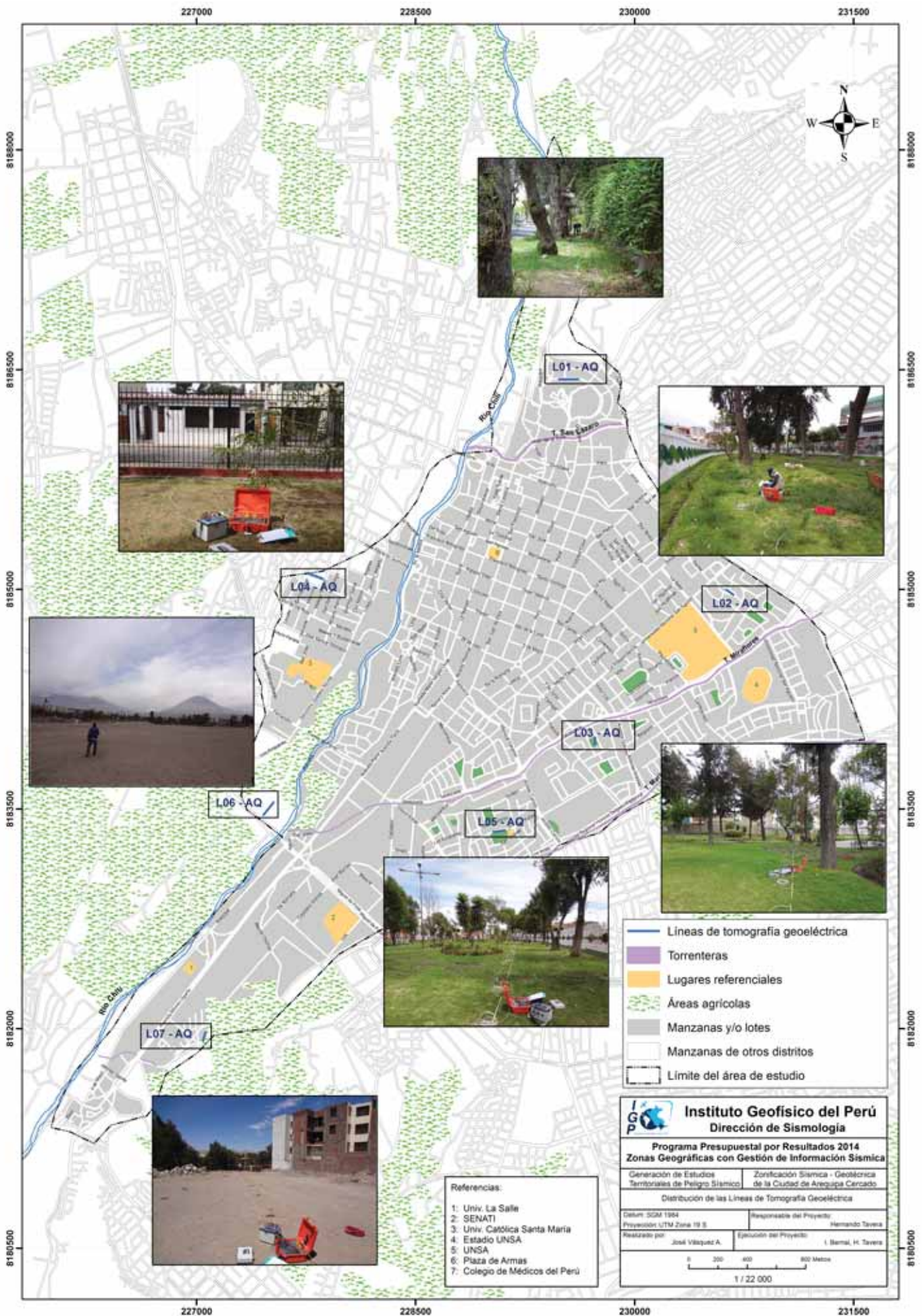
## Estudios de tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Arequipa Cercado se tendieron 7 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo, la distribución de 23 a 30 electrodos con un espaciamiento de 3 a 6 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 66 a 144 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 23 metros (Mapa 14).

A continuación, se describe las características de cada uno de las secciones geoelectricas obtenidas a fin de conocer el valor real de la resistividad del subsuelo, en la ciudad de Arequipa Cercado.

- Sección geoelectrica L01-AQ: Sección realizada en el extremo NE del centro de la ciudad, calle Benavides. En esta sección predominan valores resistivos. A lo largo de la sección, se distribuyen valores de 100 a 500 ohm.m, alcanzando profundidades de hasta 23 metros. Valores menores a 100 ohm.m son visibles a 5 metros de profundidad tomando una forma elipsoidal y hacia el extremo inferior derecho, alcanzan profundidades de hasta 23 metros. Se observan valores mayores a 500 ohm.m, tanto en la parte superficial como a profundidad, teniendo formas irregulares. Los materiales presentes en la parte superficial son suelos arcillosos limosos con presencia de vegetación.
- Sección geoelectrica L02-AC: Sección realizada en el parque Hipólito Unanue. En esta sección, predominan valores resistivos y medianamente resistivos. A lo largo de la sección se distribuyen valores entre 100 y 500 ohm.m, hasta profundidades que alcanzan los 8 metros e el extremo izquierdo de la sección. Valores mayores a 500 ohm.m están presentes a lo largo de la sección (desde aproximadamente 3 metros de profundidad) hasta aproximadamente 12 metros de profundidad. Valores mayores a 1500 ohm.m encerrados en elipses se encuentran en la parte central de la sección. En profundidad se observan valores entre 16 y 100 ohm.m. Los materiales que conforman la superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.
- Sección geoelectrica L03-AQ: Sección realizada en el parque Cabaña María, próximo a la Av. Venezuela. En la sección predominan valores medianamente resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores de entre 101 y 500 ohm.m hasta profundidades de 3 a 8 metros conforme se tiende hacia el extremo derecho de la sección. A mayor profundidad, los valores fluctúan entre 501 y 2812 ohm.m concentrándose los valores más altos a distancias, a lo largo de la línea, entre 27 y 36 metros, además de alcanzar profundidades de hasta 12 metros. Estos valores de resistividad también se observan entre las electrodos 18 y 21 con profundidades entre 3 y 6 metros tomando una forma elíptica. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.
- Sección geoelectrica L04-AQ: Sección realizada en el parque Víctor Andrés Belaunde con el predominio de valores resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores de entre 100 y 500 ohm.m, con profundidades que varían entre 6 y 20 metros, en la parte inferior izquierda y superior derecha los valores están entre 500 y 2812 ohm.m. Entre los electrodos 60 y 90 se observa valores entre 16 y 100 ohm.m, para niveles de profundidad de hasta 20 metros. Estos valores de resistividad también se observan entre los electrodos 40 y 48, adquiriendo formas elípticas.
- Sección geoelectrica L05-AQ: Sección realizada en el parque San Jerónimo con el predominio de valores resistivos a medianamente resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 16 y 500 ohm.m hasta profundidades de 12 metros. Valores que van entre 501 y 1500 ohm.m se distribuyen a lo largo de la sección alcanzando profundidades de 3 a 18 metros. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.





Mapa 14. Ubicación de las 7 líneas de tomografía eléctrica.

- Sección geoelectrica L06-AQ: Sección realizada en las cercanías del puente San Isidro, próximo al río Chili. En esta sección predominan valores resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 101 y 500 ohm.m, hasta profundidades de 20 metros. Entre los electrodos 31 y 40 se observa la presencia de valores mayores a 500 ohm.m asumiendo formas elípticas. Valores entre 16 y 100 ohm.m se distribuyen en la parte superior izquierda hasta el electrodo 45; mientras que, en la parte inferior izquierda se observan valores entre 20 y 100 ohm.m. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso, arenoso y gravoso. Los valores bajos de resistividad pueden deberse a la infiltración de agua ocasionada por los terrenos de cultivo y la proximidad del río Chili.
- Sección geoelectrica L07-AQ: Sección realizada en la urbanización Gloria, en la proximidad del club de abogados. En esta sección predominan valores medianamente resistivos. En la parte superficial se observan valores entre 101 y 500 ohm.m hasta profundidades de 3 metros. Estos valores también están presentes entre los electrodos 32 y 39 alcanzando profundidades entre 6 y 12 metros. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 501 y 1500 ohm.m, con profundidades variables. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso, arenoso, gravoso y desmonte. Los valores bajos pueden deberse a la presencia de terrenos de cultivo que aportan humedad y los valores medianamente resistivos a muy resistivos, al material de desmonte y gravas presentes en las proximidades

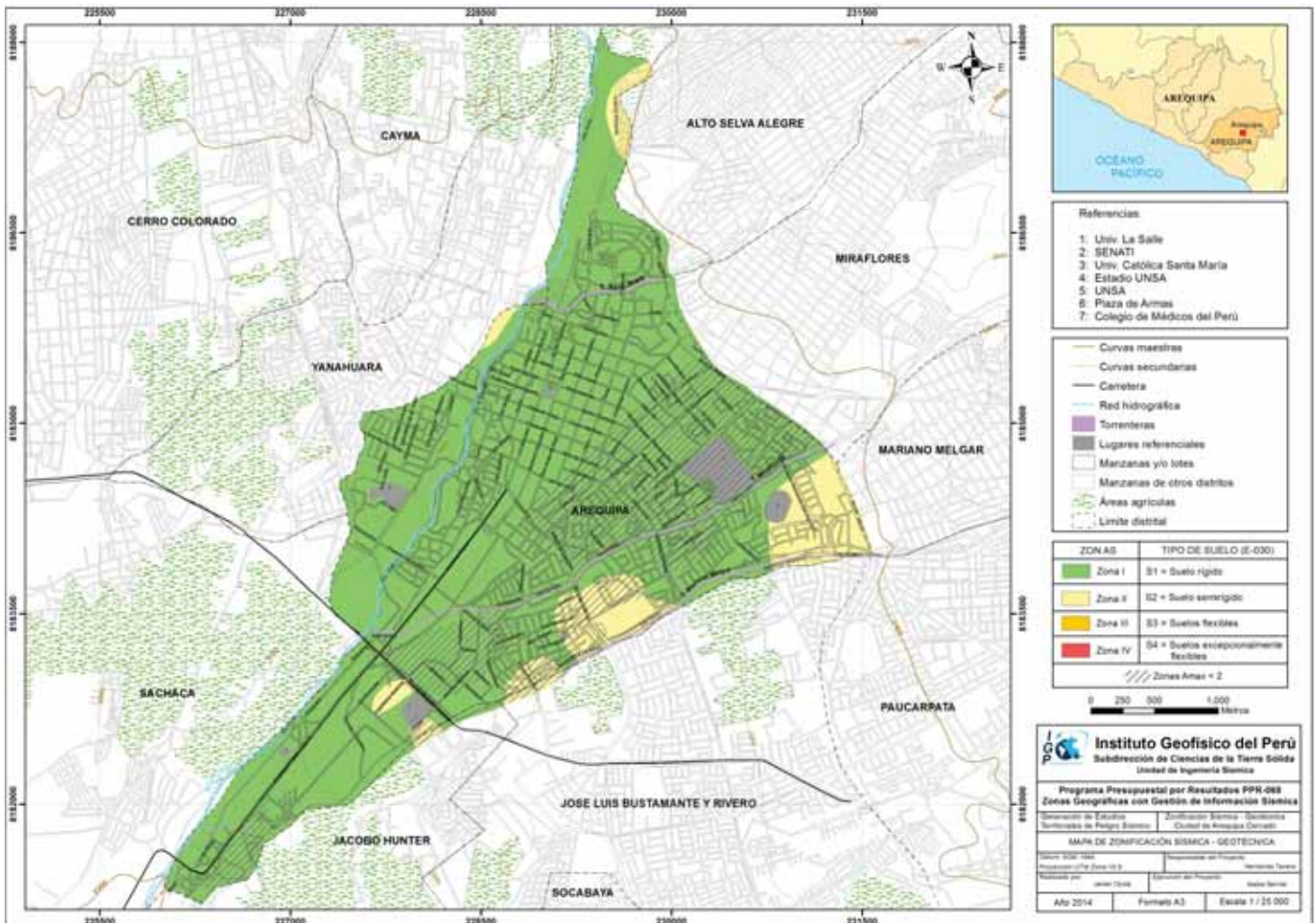
En resumen, en el extremo este de la ciudad de Arequipa Cercado, la distribución de los valores de resistividad evidencia la presencia de valores resistivos a medianamente resistivos (secciones realizadas en parques). En el extremo oeste de la ciudad, predominan valores resistivos y medianamente resistivos y en este caso las secciones se realizaron en parques, a excepción de la sección L06-AQ que se realizó próxima al río Chili y sus valores de resistividad son asociados a la presencia de gravas e infiltraciones del río y terrenos de cultivo. La sección L07-AQ se realizó en la proximidad de terrenos de cultivo con la presencia de gravas y desmontes.

## Zonificación sísmica - geotécnica

Para obtener la zonificación sísmica-geotécnica en este estudio (Mapa 15), se consideró el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Así, para la ciudad de Arequipa Cercado, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de dos tipos de suelo: Tipo S1 y Tipo S2.

- **Zona I:** Conformada por estratos de origen ígneo (material volcánico) cubiertos por un manto de origen fluvio-aluvial de menor consistencia y de poco espesor (4 a 5 metros). A profundidad el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían de entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Las velocidades de corte pueden variar alrededor de los 350 m/s para la capa superficial de poco espesor y de 500 a 700 m/s la capa más profunda (de 10 a 40 metros de espesor). Estos suelos presentan capacidad portante alta.
- **Zona II:** Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos a medios y suelos fluvio-aluviales con espesores de hasta 15 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene material de origen ígneo y sedimentario. Esta zona se ubica en el extremo este de la ciudad, principalmente entre las torrenteras de Miraflores y Mariano Melgar, y hacia el extremo norte sobre un área pequeña, donde los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Los suelos presentan capacidad portante de media a alta.





Mapa 15. Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Arequipa Cercado

## Conclusiones

Los estudios de zonificación sísmica-geotécnica (comportamiento dinámico del suelo) son indispensables para realizar la proyección adecuada del crecimiento de las ciudades, y el mapa de zonificación sísmica-geotécnica debería ser un elemento indispensable para ingenieros, urbanistas, planificadores y autoridades en general.

Para el caso de la ciudad de Arequipa Cercado, los resultados indican que ésta se encuentra asentada sobre una penillanura fluvio-aluvial producto de los materiales depositados cuando descendieron de las partes altas. Su geodinámica está representada por zonas de derrumbes e inundaciones generadas por el río Chili y la presencia de torrenteras. La capacidad portante de los suelos es alta ( $>3 \text{ kg/cm}^3$ ); es decir, suelos bastante bien compactados.

El mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que toda la ciudad de Arequipa Cercado se encuentra sobre suelos Tipo S1 y S2; y según la Norma de Construcción Sismorresistente corresponden a las zonas I y II.

## Bibliografía

- Alfaro, A., Egozcue y A. Ugalde (1999): *Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica, España.*
- Agro Acción Alemana (2010): *Gestión de riesgos en Ancash. Experiencias y propuestas. Ministerio Aleman.*
- APESEG (2005): *Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, CISMID, 10 pag.*
- Aki, K., (1957): *Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtemores. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo 35, 415–457.*
- Bard, P-Y. (1995): *Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323*
- Bard, P-Y y SESAME (2001): *The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 2207*
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh (1995): *“Nonlinear Soil Amplification: It’s Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515*
- Bernal, I. (2002): *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.*
- Bernal, I. (2006): *Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – Mexico. Tesis de Maestría, II-UNAM, Mexico.*
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): *Pruebas de vibración ambiental realizadas en la localidad de Condormarca, provincia de Bolívar. Dpto. de la Libertad. Informe Técnico, 23p.*
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): *Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP, 22p.*
- Braja, M. (2001): *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson y Learning, 580 pag.*
- Caldas, J. (1978): *Geología del cuadrángulo de San Juan, Acarí y Yauca. 31-m. INGEMMET, Boletín A-30.*
- Capon, J.,(1973): *Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array, in Methods in Computational Physics, Vol. 13, ed. Bolt, B.A., Academic Press Inc, New York*
- Carpio, J. y Tavera, H. (2002): *Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). BSGP, V94, 45-59.*
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011): *Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. J. G. R. Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166*
- Cruden, D. (1991): *A simple definition of a landslide. IAEG. Bull. 43, 27-29.*
- Casagrande. A. (1948): *Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.*

- Cobbing, J. (1970): *Geología de los cuadrángulos de Huacho (23h)*. Boletín N°26, INGEMMET.
- Dale D. (1990): *Mountain waves and Downslope Winds*. *Meteorological Monographs*. 23:59 81
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C. (1990): *Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru*. *B.S.S.A.*, 80,551-576
- Escobar, D. (1993): *Evolución climática y sinóptica de los vientos Paracas*. Tesis Ing. Meteorólogo. Facultad de Ciencias, Dpto. Física y Meteorología. UNALM.
- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). *Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects*. *Journal of Seismology*, 7, 449-467
- Goto, C. y Ogawa, Y. (1992): *Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme*. Translated for the TIME project by N Shuto.
- Guillier, B., J.-L. Chatelain . H. Tavera . H. Perfettini . A. Ochoa . B. Herrera (2014): *Establishing empirical period formula for RC buildings in Lima (Peru): evidence for the impact of both the 1974 Lima earthquake and the application of the Peruvian seismic code on high-rise buildings (in preparation)*.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008): *Geomorfología*. Pearson Education, S.A., Madrid, 898 pp.
- Gutierrez, C. y S.K. Singh (1992): *A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong motion and microtremor data*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- Guevara, C. (1961): *Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clemesi*, INGEMMET,
- Hartzel, S. H. (1992): *Site response estimation from earthquake data*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J.N. (1986): *A sliding-consolidation model for flow slides*, *Can.Geotech.J.*, 23, 115-126
- INADUR (2000): *Mapa de peligros y plan de uso del suelo de la ciudad de Chimbote*. Instituto Nacional de Desarrollo Urbano.
- INDECI (2001): *Informes de los principales desastres ocurridos en Perú*. Instituto de Defensa Civil del Perú.
- INGEMMET (1970): *Cuadrángulo Geológicos de Barranca*. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.
- Knighton, A. (1998): *Fluvial Forms & Processes: a new Perspective* . Londres. Arnold.
- Lachet, C. y P. Y. Bard (1994): *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura´s technique*, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): *Are microtremors useful in site response evaluation?*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b): *Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records*, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- Loke MH (2001): *Tutorial: 2 D and 3 D electrical imaging survey*, Geotomo Software, Malaysia
- Morisawa, M. (1968): *Streams: their dynamics and morphology*. McGraw-Hill. New York, New York, USA.

- Nakamura, Y., (1989): *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, QR of RTRI, 30, No. 1, 25-33 pp.
- Norma E-30 (2003): *Diseño sismorresistente en el Perú*, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): *Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México*. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): *Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1.*, Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): *The Microtremor Survey Method*, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Pagador, C. (2010): *Evaluación de recursos hídricos superficiales en la Cuenca del río Huaura*. Autoridad nacional del agua.
- Papazachos, et al. (2004): *Global realtions between seismic fault parameters and momento magnitude of eathquakes*. Bull. Geol. Soc. of Greece, 36, 1482-1489.
- PNUD (2010): *Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima*. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): *Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data*, Seis. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): *Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del rio Llobregat*. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- Silgado, E. (1978): *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974*. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): *Source mechanism of earthquakes in Peru*. Journal of Seismology 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): *Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo)*. Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): *Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo)*. Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): *Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú*. Sismología, IGP.
- Tavera et al, (2002): *The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001*. Journal of Seismology, 6: 279-283, 2002.
- Tavera et al. (2013): *Sismo de Acari-Yauca del 25 de setiembre de 2013 (7.0Mw)*. Aspectos Sismológicos.. Dirección de Sismología, IGP. Informe Técnico N°03-2013. 25 pags.
- Tavera, H. (2001): *El terremoto de la región sur del Perú del 23 de junio de 2001*. Instituto geofísico del Perú. Informe Especial, Dirección de Sismología. 422 pag.



- Tavera, H. (2008): *EL terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto de 2007 (7.9 Mw)*. Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología. Informe Especial. 480 pags.
- Tavera, H. (2001): *El terremoto de la región sur del Perú del 23 de Junio de 2001*. Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera, H. (2014): *Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014*. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Tavera, H. (2008): *El terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007 (7.9 Mw)*. Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera et al. (2014): *Estimación del Peligro Sísmico para el Perú*. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Varnes D.J. (1958): “Landslides types and processes”. *Special report 29: Landslides and engineering practice* (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.
- Varnes D.J. (1978): “Slope movement types and processes”. *Special report 176: Landslides: Analysis and control* (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-33.
- Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): *Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes*. *Seism. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.



# INSTRUMENTACIÓN GEOFÍSICA DE VOLCANES ACTIVOS: EL CASO DEL VOLCÁN MISTI

O. Macedo<sup>1</sup>.

## Introducción

El Misti (5822 m s.n.m.) es considerado uno de los cuatro volcanes con mayor riesgo en el mundo, título que se ha ganado por el millón de habitantes asentados en su valle y por su intensa actividad eruptiva registrada desde tiempos históricos. De acuerdo a los registros geológicos, uno de los procesos eruptivos más importantes del Misti se desarrolló hace aproximadamente 2000 años, en el cual se expulsó pómez en un radio mayor a 25 km. Estos materiales se depositaron formando capas que alcanzaron los 30 cm de espesor (Thouret et al., 2001). Este episodio originó una columna subpliniana de entre 10 km y 13 km de altura sobre el cráter.

Entre los años 1440 y 1470 de nuestra era, se produjo una nueva erupción, la cual motivó que el inca Pachacutec enviara a su esposa para calmar a la población de Chiguata, asustados ante tal fenómeno (Chávez, 1992). Los registros geológicos de aquel proceso son muy consistentes. Se halló evidencia de depósitos de ceniza de color negro (ceniza de Pachacutec) que alcanzaron algunos centímetros de espesor. Desde aquella erupción, relatos históricos dan cuenta de múltiples crisis fumarólicas desarrolladas hasta la actualidad.

El volcán Misti yace imponente a la vista de miles de personas que habitan la ciudad. Para los arequipeños, el Misti, más que un posible peligro, es un guardián. Sin embargo este coloso es considerado un volcán activo, y que en un futuro podría desarrollar un nuevo proceso eruptivo. Es por esta razón que el IGP estudia hace más de 20 años el comportamiento de este macizo. Sin embargo, no fue hasta 1998, luego de varios experimentos en distintos flancos y en el cráter del volcán, que se demostró la existencia de actividad sísmica bajo el propio edificio volcánico del Misti.

---

<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú. Correo electrónico: [omacedo@igp.gob.pe](mailto:omacedo@igp.gob.pe)

## Red sísmica permanente del volcán Misti

Dado el alto riesgo que el Misti representa para los arequipeños, en el año 2005, gracias a una labor conjunta del IGP y el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD), se instaló la primera Red de vigilancia sísmica permanente del volcán Misti. Esto fue posible, igualmente, al importante apoyo brindado por la Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A. (Egasa), institución que sigue colaborando en la actualidad con el IGP en favor de brindarle las condiciones de acceso y trabajo para realizar un monitoreo total y eficaz de este volcán.

La red sísmica de aquellos años contaba con cinco estaciones de periodo corto, distribuidas estratégicamente en los alrededores y en la cima del edificio volcánico. Cada una de estas estaciones enviaba información analógica a través de enlaces de radio (UHF) a la oficina del IGP, ubicada en el distrito de Cayma.

Hacer posible la instalación y funcionamiento de la red fue todo un reto. Con accesos limitados, los vehículos solo pueden acercarse a las faldas del volcán (~4000 m s.n.m.); sin acémilas, fue necesario el esfuerzo humano para transportar galones de agua, concreto, estructuras metálicas, entre otros componentes necesarios para la construcción de las casetas con sus respectivos mástiles de acero. Los trabajos fueron realizados entre los 4168 m s.n.m. (estación MISA) y los 5710 m s.n.m. (estación EMIS, a solo 100 metros por debajo de la cruz del Misti localizada a 5822 m s.n.m.). Finalmente, la primera red sísmica para el monitoreo permanente de un volcán en el Perú fue inaugurada oficialmente el 18 de octubre de 2005.

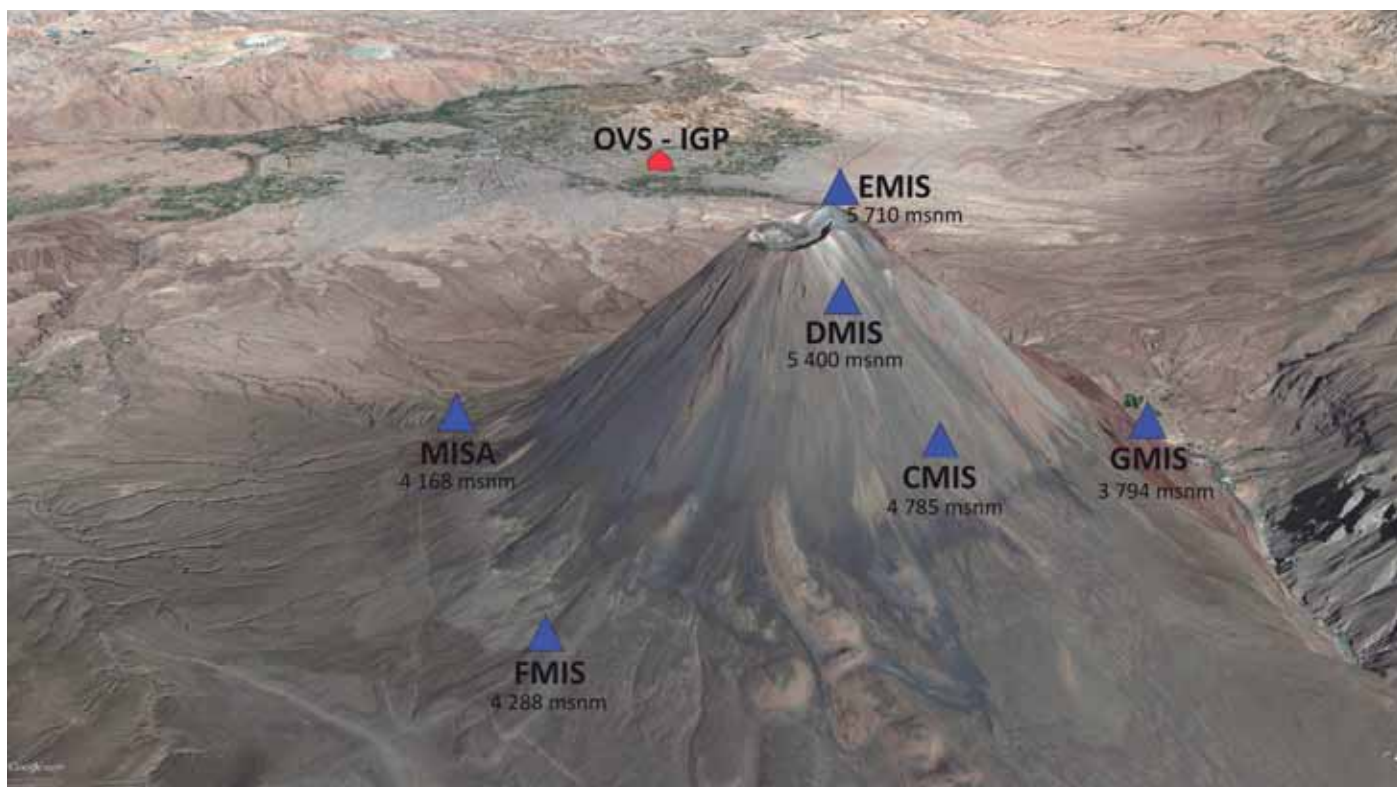


Figura 1. Red sísmica permanente del volcán Misti y la sede del IGP en el distrito de Cayma - Arequipa.

Recientemente, en septiembre de 2014, el IGP efectuó la modernización de las estaciones sísmicas telemétricas que componen la Red sísmica del volcán Misti. En total fueron seis los equipos renovados con tecnología digital. Gracias a este trabajo, el IGP ha asegurado la obtención de señales libres de ruidos e interferencias electromagnéticas, garantizándose la recepción de data en tiempo real en las mejores condiciones (Figura 1).

## Monitoreo sismovolcánico del volcán Misti

Con más de 12 años de datos recabados por la red sísmica, los especialistas del IGP han reconocido el comportamiento sísmico del Misti durante una época de calma volcánica. Gracias a ello, se ha hecho evidente un nivel de actividad base (background), lo cual quiere decir que, ante un incremento en la actividad sísmica que supere los umbrales establecidos por la línea base, el IGP estaría en la capacidad de anticiparse al inicio de una etapa eruptiva. Tal capacidad de pronóstico ha sido aplicada con éxito en el volcán Ubinas durante la última crisis eruptiva 2013–2016 (Del Carpio et al., 2016).

El monitoreo continuo que se realiza sobre el Misti tiene como objetivo principal vigilar las 24 horas del día, los 7 días de la semana y los 365 días del año la actividad sísmica que genera este volcán, a fin de detectar cualquier anomalía y brindar la información oportuna a las autoridades e instituciones vinculadas a la gestión del riesgo de desastres (Figura 2).



Figura 2. Vista de la ciudad de Arequipa localizada a los pies del volcán Misti.

Desde el inicio de la operatividad de la red sísmica permanente del Misti, el IGP cumple con emitir reportes periódicos de monitoreo sísmico sin interrupciones desde 2005. Estos documentos contienen el resumen de la actividad sísmica del macizo, así como datos satelitales de tipo térmico y de gases. Todos los reportes son gratuitos y de acceso público. Así también, gracias a la información proporcionada por la red de monitoreo se redactan reportes técnico-científicos que dan cuenta de las actividades de investigación que se desarrollan sobre el volcán Misti.

Otro de los productos importantes desarrollados por el equipo del IGP, es la publicación de mapas sísmicos (Figura 3). Este material es realizado gracias a la distribución espacial de las estaciones sísmicas alrededor y sobre el edificio volcánico, la cual permite a los especialistas localizar un grupo especial de sismos denominados volcano-tectónicos (VTs). Dichos eventos están relacionados a fractura de rocas inducida por presiones asociadas a fluidos (agua, vapor de agua y gases magmáticos). La ubicación de estos sismos ha permitido delimitar la geometría del conducto principal bajo el cráter, así como estimar la profundidad de la cámara magmática de este coloso.



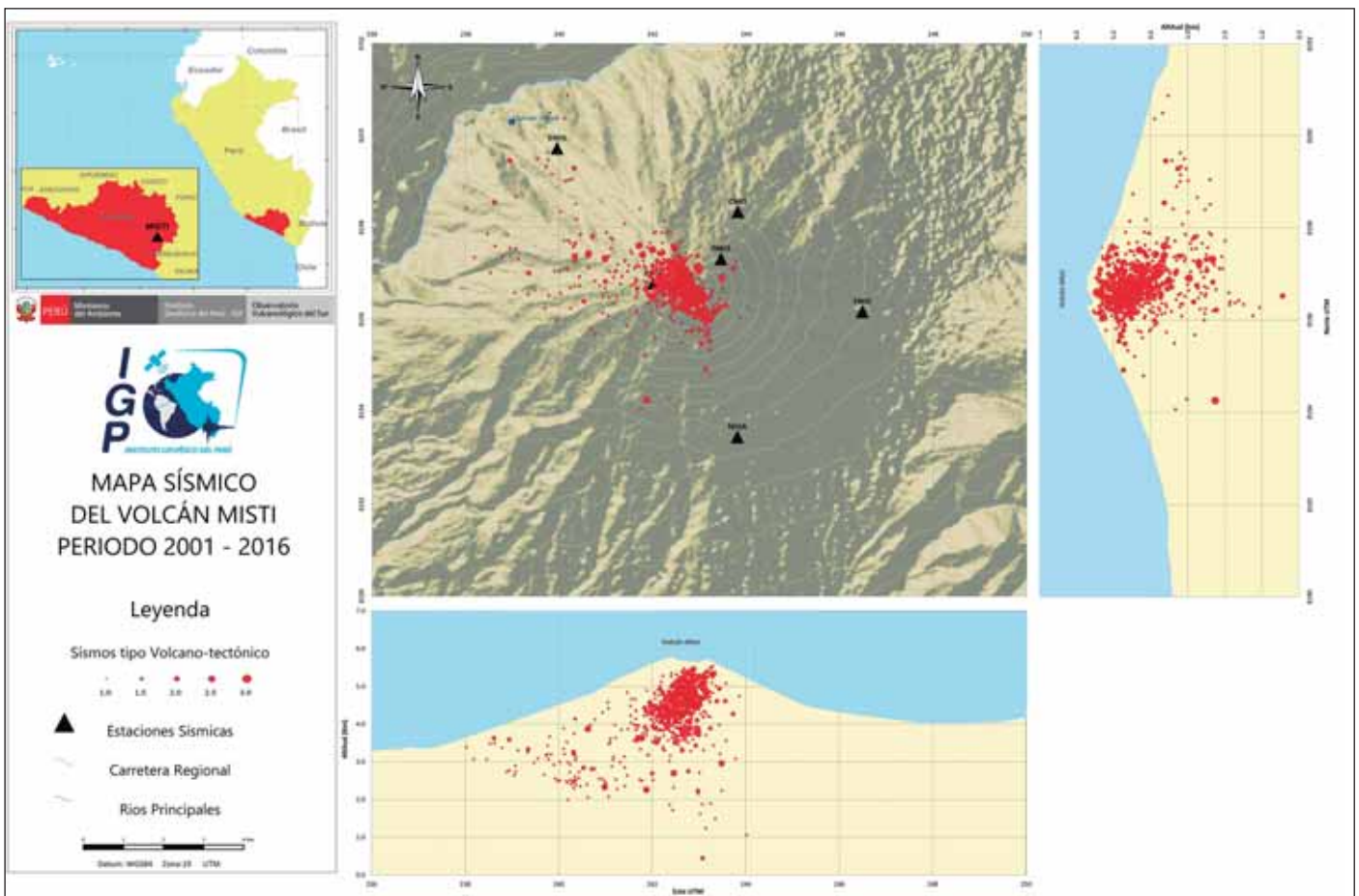


Figura 3. Mapa sísmico del volcán Misti para el periodo 2001-2016.

## Aplicación de la red sísmica permanente del volcán Misti en la detección de lahares

### Definición del fenómeno

Lahar es un término indonesio que describe la mezcla de agua, cenizas volcánicas y fragmentos rocosos que descienden por las pendientes próximas a los volcanes, por lo general, siguiendo el lecho de las quebradas y ríos a velocidades que varían constantemente según las características del terreno, la cantidad de agua involucrada y volumen de material disponible a ser erosionado. Es muy común que en un volcán activo se generen lahares, pues basta que ocurra una lluvia fuerte o que se deshiele rápidamente sus cumbres con nieve para que las cenizas situadas en terrenos de accidentada topografía cedan y se deslicen pendiente abajo. El Misti suele producir lahares secundarios, termino referido al flujo cuando el volcán no presenta erupción.

### Problema

El Misti, ese coloso de forma cónica y belleza singular, presenta fuertes pendientes de la base a la cima y grandes volúmenes de material volcánico acumulados en sus flancos, los cuales son ingredientes necesarios para generar lahares (huaico con material volcánico). Estos flujos son canalizados por varias quebradas, las principales ubicadas en los flancos este, oeste y sur (Figura 4) y cuya desembocadura pone en peligro a la población arequipeña e importantes infraestructuras.

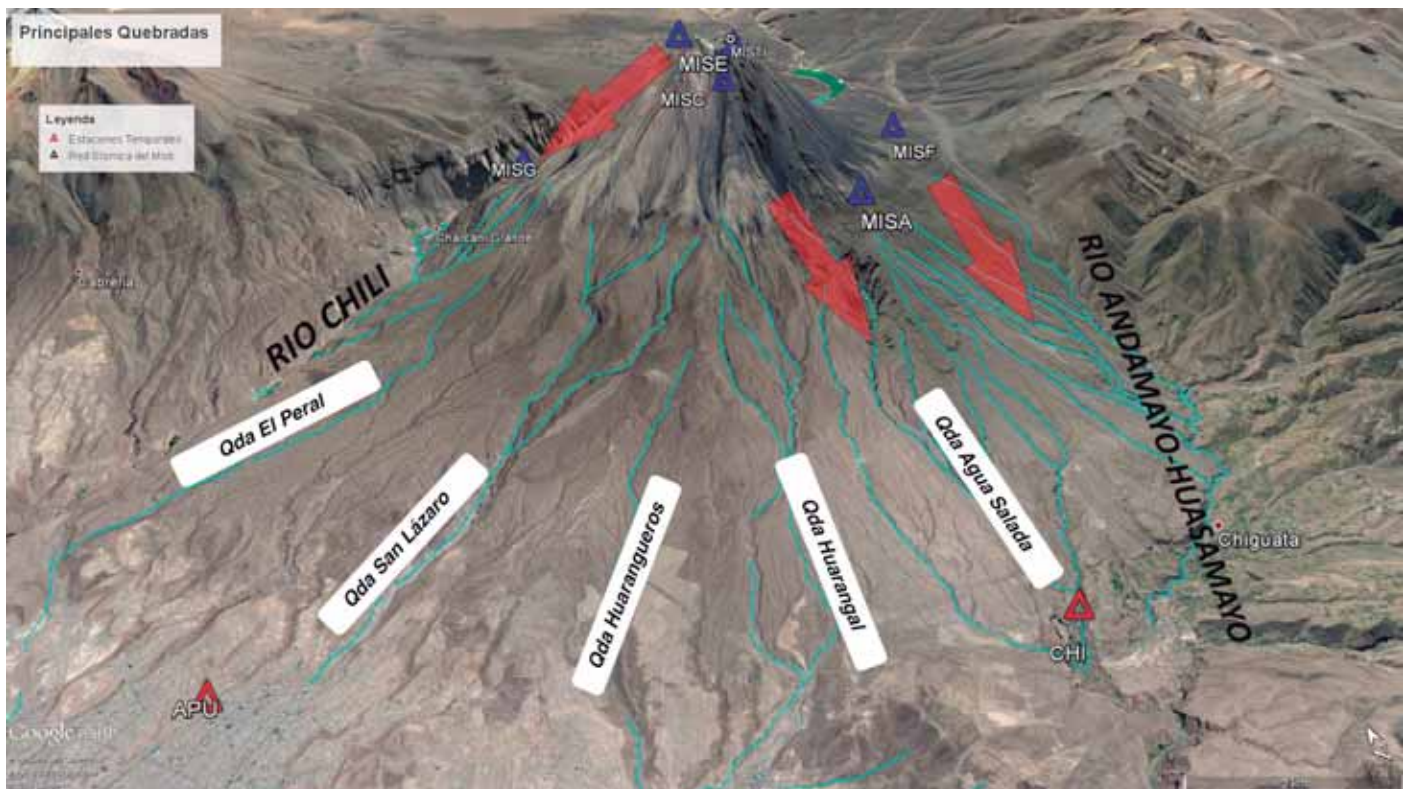


Figura 4. Muestra a las principales quebradas que tienen origen en las partes altas del volcán Misti y que desembocan en zonas pobladas (torrenteras), así como en importantes infraestructuras. También se observa en la figura las estaciones temporales (triángulos rojos) APU y CHI instaladas exclusivamente para la detección de lahares.

## Justificación

La intensidad inusual del periodo de lluvias enero-marzo de 2017, generó el descenso de importantes lahares desde los flancos este, oeste y sur del volcán Misti. La magnitud de estos eventos ha hecho posible que la red sísmica permanente (seis instrumentos) instalada en este macizo pueda detectarlos. Sin embargo, se requería observar las mismas señales sísmicas en zonas tan distantes como las faldas del volcán (cerca de la población). Es así que se decide instalar, durante marzo, dos sismómetros adicionales para obtener el registro sísmico que confirme y caracterice el paso del lahar en zonas alejadas del edificio volcánico.

## Objetivo

- Aplicar la red sísmica del volcán Misti para la detección temprana de lahares.
- Obtener las características sísmicas y forma de onda de las señales relacionadas a lahares para alertar la ocurrencia de futuros eventos.

## Metodología

Los lahares producen vibraciones sísmicas durante su descenso. Estas vibraciones son registradas con mayor energía por las estaciones que están más cercanas a la fuente; así también, el tiempo en el que inicia el registro varía entre los sismómetros y esto depende de la distancia a la que se encuentra dicho fenómeno. Por lo tanto, es posible hacer una triangulación del evento gracias a la amplitud del registro y al tiempo de inicio en cada estación (Figura 5).

En conclusión, mientras más estaciones sísmicas tenga el arreglo, mejor será la triangulación del fenómeno.

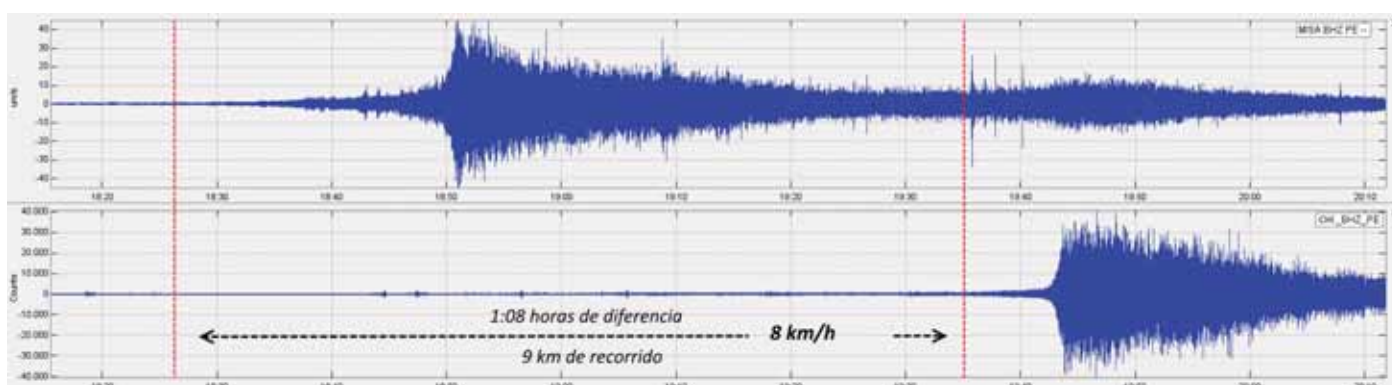


Figura 5. Se observa claramente la señal sísmica relacionada al lahar registrada, en primer lugar, en la estación MISA (4168 m s.n.m.). Una hora y ocho minutos después es detectada por la estación temporal CHI (2806 m s.n.m.), ubicada a 9 km al Sur.

## Procedimiento y resultados

En febrero de 2017, un grupo de especialistas del IGP instaló dos nuevos equipos en la zona baja del edificio volcánico. El primer equipo, con código CHI (13 km de distancia al cráter), se ubica en la margen derecha de la quebrada Agua Salada; la segunda estación, denominada APU (15 km del cráter), se encuentra a 600 m del margen derecho de la quebrada San Lázaro (Figura 4). Con los equipos sísmicos ya operativos solo debía esperarse la generación del lahar.

Finalmente, el 13 de marzo en horas de la tarde, se registró el lahar. En primer lugar, fue registrado en la estación GMIS a las 18:28 UTC (13:28 HL), con una amplitud de 20  $\mu\text{m/s}$ . Casi instantáneamente, se registró en las estaciones EMIS (5686 m s.n.m.), DMIS y CMIS. La estación MISA, ubicada en el flanco SE del Misti a 4229 m s.n.m., detectó el flujo entre las 18:28 UTC y 18:30 UTC; en esta estación el lahar registró una amplitud de 40  $\mu\text{m/s}$  (menor altitud, mayor energía), continuando pendiente abajo. En 9 km de recorrido, la señal sísmica de este evento fue detectada por la estación temporal CHI a las 19:42 UTC (14:42 HL), 1 hora y 8 minutos después de haber sido registrada por la red sísmica del Misti (Figura 5), ubicada en las partes altas del cono volcánico. Luego de efectuada la triangulación de las señales, se determinó que el flujo se generó a 5000 m s.n.m. y se desplazó a una velocidad aproximada de 8 km/h entre las estaciones MISA y CHI.

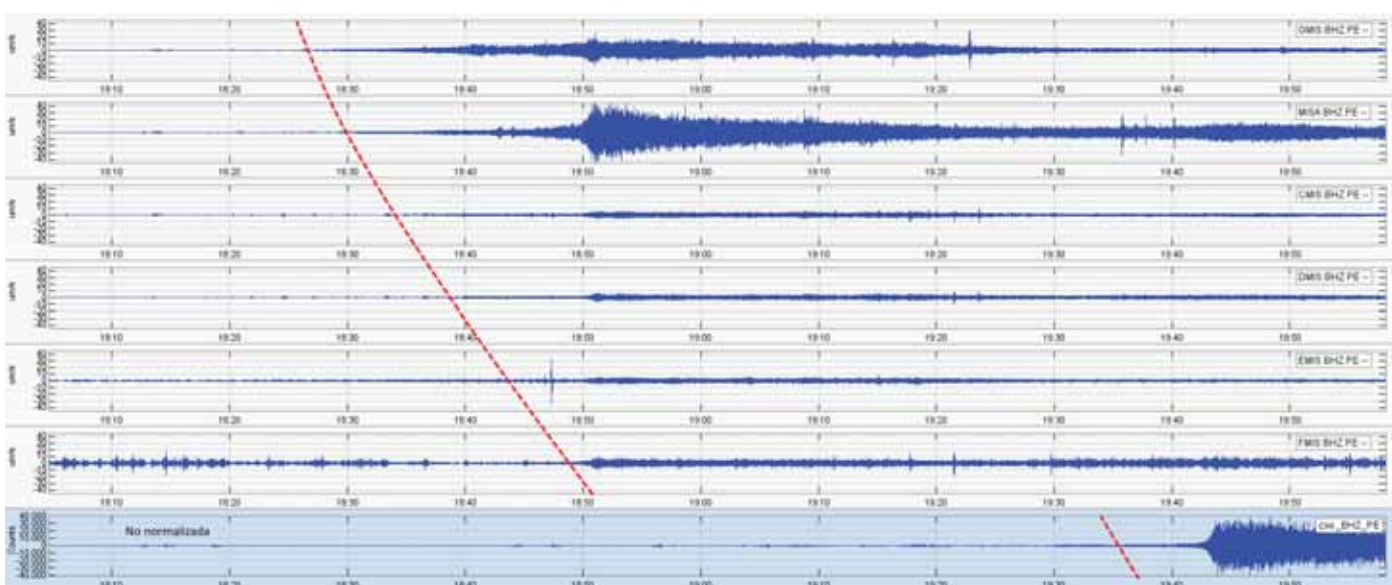


Figura 6. Se observa el registro del evento en toda la red sísmica del Misti, así como en la estación temporal CHI (1 hora y 08 minutos después de observarse en la estación MISA, a 9 km de distancia).



Asimismo, el lahar tomó dos direcciones: un primer flujo hacia el flanco oeste, en dirección del río Chili, y un segundo flujo hacia el sureste, en dirección del distrito de Chiguata.

Dado el número limitado de estaciones sísmicas de la red Misti y el retiro de operatividad de las estaciones CHI y APU, se procedió a extraer la forma de onda, el espectro y espectrograma de frecuencias que generan los lahares en las estaciones sísmicas permanentes (Figura 7). Con esta información será posible reconocer mediante el análisis sísmico los lahares que se generen a futuro en los flancos del volcán Misti y estimar indirectamente la dirección del flujo.

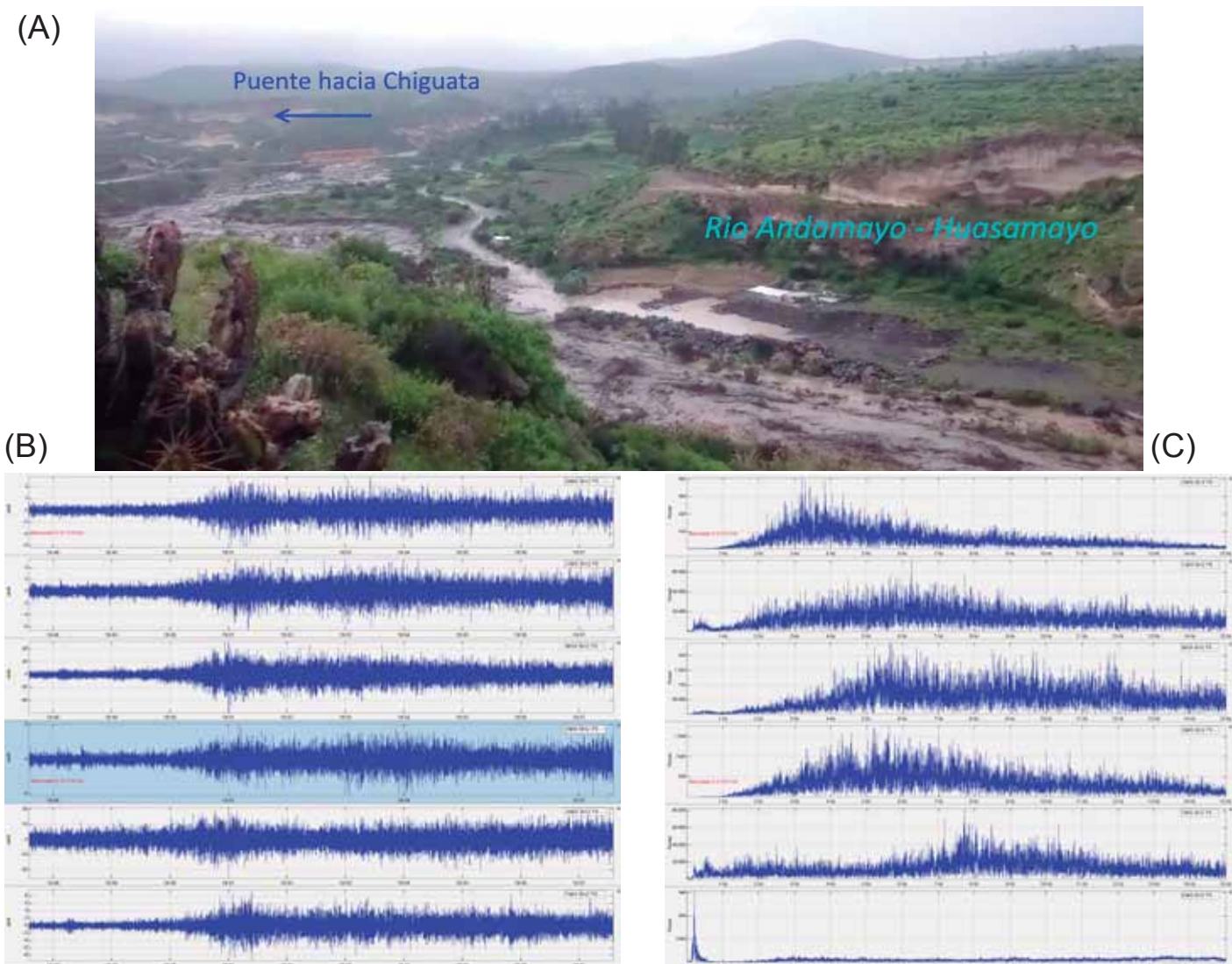


Figura 7. (A) Se observa el paso del lahar por el río Andamayo-Huasamayo, a 11 km del Misti. (B) La forma de la señal sísmica es detectada por toda la red permanente. (C) El espectro de frecuencias muestra valores principales mayores a 5 Hz.

## Conclusiones

- La red sísmica permanente del volcán Misti, instalada y operada por el IGP, es la principal herramienta de vigilancia para la alerta temprana ante una erupción volcánica, así como ante la ocurrencia de lahares.
- El monitoreo continuo de este macizo por los especialistas del IGP ha permitido determinar el nivel sísmico base en periodos de “tranquilidad volcánica”. El análisis de un futuro incremento de esta actividad facultará al IGP realizar pronósticos de erupciones, tal como se realizó con éxito en el volcán Ubinas.

- La red del Misti es también capaz de detectar lahares (huaicos) que descienden por las quebradas en época de lluvias. El 13 de marzo de 2017, a las 13:28 HL, detectó señales de un lahar que se generó a los 5000 m s.n.m. La velocidad en las partes bajas que alcanzó este fenómeno fue de 8 km/h. Este evento desplazó dos flujos principales: el primero con dirección hacia el río Chili, probablemente por la zona de Charcani Grande, y el segundo en dirección del río Andamayo-Huasamayo, en dirección del distrito de Chiguata.
- El experimento recientemente realizado ha validado que la red en tiempo real del Misti puede servir como instrumento de alerta temprana contra lahares o huaicos que se originen en los flancos del volcán y desciendan por las quebradas adyacentes. Estos fenómenos, sin lugar a dudas, pueden representar serios riesgos para la ciudad de Arequipa.

## Bibliografía

- *Chávez Chávez, J.A. (1992): La erupción del volcán Misti, pasado, presente y futuro: Arequipa, Impresiones Zenit, 158 p.*
- *Del Carpio, J., Macedo, O. & Torres, J. (2016): A new method for volcanic eruption forecasting applied with success on Ubinas volcano, world engineering conference on disaster risk reduction 2016, Lima-Peru.*
- *Observatorio Vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú (2017): Eventos de tipo LAHAR: caso del flujo registrado el 13 de marzo de 2017, 7 p.*
- *Thouret, J.C., Finizola, A., Fornary, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A. & Frechen, M. (2001): Geology near of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru, Geol. Soc. Amer., Bull-113 (12): 1593-1610.*

# CAMPO DE VELOCIDAD GPS Y ACOPLAMIENTO INTERSÍSMICO EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PERÚ

*W. Quiroz<sup>1</sup> y J. C. Villegas*

## Introducción

Los grandes terremotos son eventos extremos recurrentes en el tiempo y pueden ocurrir en intervalos que varían de décadas a cientos de años, como consecuencia de un proceso continuo de acumulación y liberación de esfuerzos, al que se denomina ciclo sísmico. Este proceso de carga y descarga de esfuerzos fue postulado por Reid (1910), en su teoría del rebote elástico y está basado en observaciones de campo tomadas después del terremoto de San Francisco en 1906. En la actualidad, gracias al desarrollo de la geodesia espacial es posible identificar y cuantificar las fases del ciclo sísmico.

Los grandes terremotos ocurren en zonas de subducción como la que forma la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana frente a las costas del Perú. Esto hace indispensable estudiar el ciclo sísmico asociado a dichos eventos con la finalidad de evaluar su potencial sísmico (magnitud del próximo evento) y la amenaza que representan para la población. En este contexto, el sur del Perú ha sido escenario de grandes terremotos como el sucedido el 13 de Agosto de 1868 que alcanzó una magnitud de 8.8 Mw con epicentro aproximado frente al puerto de Arica y una extensión de área de ruptura de 500 kilómetros (Dorbath et al., 1990; Bejar et al., 2010). Desde entonces sólo el terremoto de Arequipa 2001 de magnitud Mw 8.2 (Tavera, 2002), ha ocurrido en dicha región, presentando una longitud de ruptura de ~300km aproximadamente (Pritchard et al., 2007), cubriendo parcialmente el área de ruptura del gran terremoto de 1868, por lo que se considera que el segmento de la zona de subducción entre Ilo y Arica está en un período de silencio sísmico.

Los estudios de geodesia espacial en esta región son pocos, Norabuena et al., (1998), efectuó las primeras estimaciones del campo de velocidad intersísmica con datos recolectados entre 1994-1996; posteriormente con nuevas mediciones estimó los efectos cosísmicos del terremoto de Arequipa del 2001 (Norabuena, 2004). Estudios más recientes muestran resultados preliminares de campo de velocidades para el sur del Perú y norte de Chile (Ortega 2013, Villegas, et al., 2016) utilizando estaciones GPS permanentes. Esto ha generado la necesidad de densificar el monitoreo geodésico de esta región instalando puntos de control con observaciones temporales bianuales a modo campaña (Quiroz, 2015).

---

<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú. Correo electrónico: [wquiroz@igp.gob.pe](mailto:wquiroz@igp.gob.pe) - [jcvillegas@igp.gob.pe](mailto:jcvillegas@igp.gob.pe)



## Antecedentes

La zona de subducción de la región sur del Perú (entre la dorsal de Nazca y el codo de Arica) ha sido escenario de la ocurrencia de grandes terremotos y tsunamis a lo largo de la historia. Los reportes históricos, que se remontan al siglo XVI, dan cuenta de la ocurrencia periódica de varios terremotos, destacando entre ellos los de mayor magnitud ocurridos en 1604 (~8.7Mw), 1784 (~8.4Mw), 1868 (~8.8Mw) y 2001 (~8.2 Mw). La ocurrencia de estos eventos sugiere diferentes periodos de recurrencia para sismos grandes y megasismos. Si bien el sismo del 2001 de Arequipa (Mw=8.2) relajó un porcentaje importante de energía acumulada desde el megasismo de 1868, especialmente en el sector entre Acarí y Arequipa, el extremo sur frente a las costas de Moquegua y Tacna aún no ha experimentado un sismo mayor desde 1868, existiendo un importante remanente de energía sísmica que puede liberarse próximamente produciendo sismo de gran magnitud.

En los últimos años las técnicas de geodesia espacial, en particular el Sistema de Posicionamiento Global por Satélite, han contribuido a cuantificar los procesos de deformación de la corteza terrestre, brindando información precisa sobre el estado de acumulación de esfuerzos en la zona de contacto de placas. En el Perú estos trabajos se iniciaron con el monitoreo de puntos geodésicos de campaña en el año 1994 con el proyecto SNAPP. En los últimos años, gracias al esfuerzo de proyectos nacionales (IGP, IGN) y de cooperación internacional (ISTerre de Francia, y Caltech de EE. UU., entre otros), se han incrementado paulatinamente los puntos de observación geodésica de campaña y permanentes a lo largo del territorio nacional (Figura1).

En este trabajo se presentan resultados del campo de velocidad GPS y del estado de acumulación de esfuerzos para la región sur del Perú. Los resultados muestran un patrón de velocidad consistente con la dirección de convergencia de placas con ligeras variaciones a lo largo del margen de subducción, lo cual refleja un fuerte acoplamiento heterogéneo en la interfaz de subducción. Cuando se compara un modelo de deformación elástica con las velocidades GPS que se observan frente a Moquegua y Tacna, estas son consistentes con una interfaz de placa bloqueada entre 10 y 50 km de profundidad. Tomando en cuenta este resultado y la extensión de las velocidades a lo largo del margen, se concluye de manera preliminar que esta región presenta un alto potencial sísmico, suficiente como para generar un sismo de magnitud superior a 8.0.

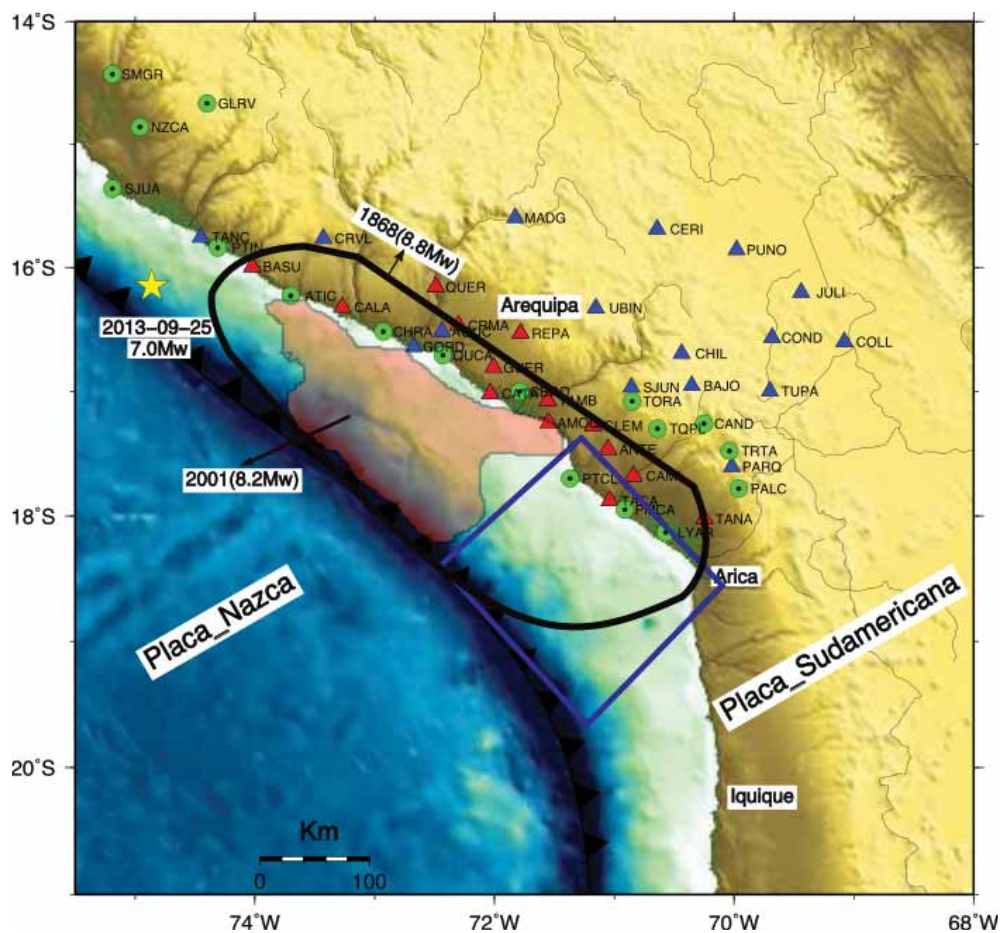


Figura 1. Mapa topográfico del borde occidental de los Andes centrales que muestra las áreas de ruptura de los últimos terremotos de gran magnitud ocurridos en el sur de Perú y norte de Chile desde 1868. El área rectangular indica el gap sísmico. Los triángulos azules y rojos representan la red de estaciones geodésicas ISTerre-IGP y los círculos verdes a las estaciones geodésicas continuas. La red se extiende del norte de Tanaka (Arequipa) hasta la ciudad de Tacna en el sur. Hacia el este se extiende hasta Puno en el altiplano. Los triángulos en color rojo corresponden al subconjunto de estaciones que fueron reinstaladas en el 2013. La estrella indica la ubicación del epicentro del sismo de Acarí del 2013 (Mw=7.0).

## Datos y análisis

Se analizaron datos GPS de campañas realizadas en junio 2012, junio 2013 y octubre 2013 por el Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP), en los departamentos de Moquegua, Tacna, Arequipa y Puno. En el año 2012 se instalaron y midieron 32 marcadores geodésicos y en el año 2013 un subconjunto de solo 14 sitios fueron reocupados. En el año 2014 solamente 7 sitios fueron reocupados, pero esta vez en estaciones cercanas al área epicentral del terremoto de Acarí del 25 de setiembre de 2013. En 2015 un total de 29 estaciones fueron reocupadas. De este modo, todos los sitios geodésicos cuentan con al menos 2 mediciones que permitirán calcular su desplazamiento. Por otro lado, en el estudio publicado por Villegas et al. (2016), se procesaron datos de la red GPS continua del Instituto Geográfico Nacional y de la red GPS del proyecto LISN. Para el sur del Perú se analizaron datos de 9 estaciones con un periodo de datos desde el 2010 al 2014.

A fin de conseguir un mejor ajuste y estabilización de los resultados se incluyeron algunas estaciones de la Red Internacional GNSS (IGS), las cuales fueron seleccionadas en base a varios criterios como: estabilidad, calidad y disponibilidad de datos continuos, velocidades ITRF2008, así como la forma geométrica de la red. Las estaciones utilizadas en este estudio se muestran en las figuras 1 y 3. Los datos GPS fueron procesados con el software GAMIT/GLOBK desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology - MIT (Herring et al., 2010), con el cual se obtuvieron series de tiempo para cada punto GPS que permitieron calcular el campo de velocidad intersísmico y el desplazamiento cosísmico en las estaciones más cercanas al epicentro del sismo de Acarí.

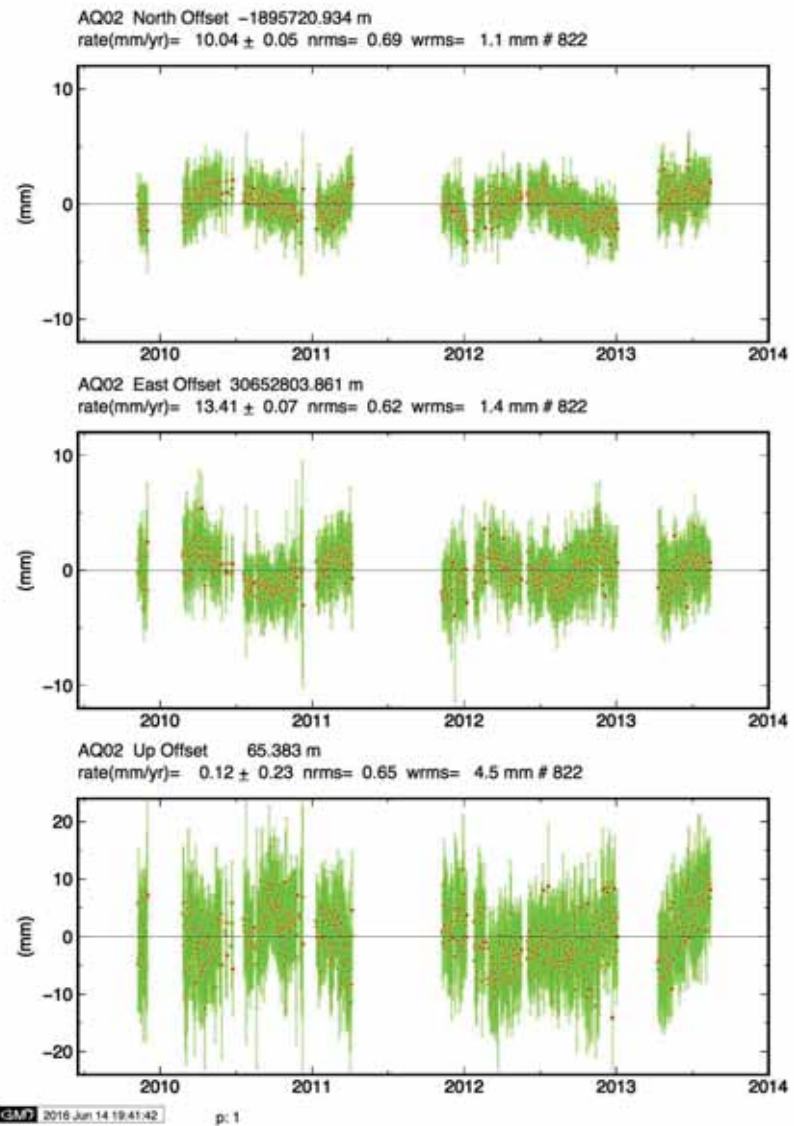


Figura 2. Series de tiempo GPS de las estaciones POCO (de campaña) y AQ02 (permanente) en el sur del Perú (de arriba hacia abajo se observa las componentes E, N y U). Cada punto representa la posición correspondiente para un solo día. Las barras verticales corresponden a los errores asociados con las mediciones diarias.

## Campo de velocidades para el sur del Perú

Las soluciones GPS diarias para todas las estaciones permanentes y de campaña fueron estimadas respecto al marco de referencia ITRF 2008 (Altamini et al., 2011), las cuales se ajustaron a una función lineal para estimar las velocidades de sitio y sus errores asociados. La pendiente de la tendencia es una estimación de la velocidad intersísmica (Figura 2).

A fin de describir el movimiento tectónico en el sur del Perú asociado a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana es necesario transformar las coordenadas obtenidas en un marco de referencia regional, en este caso se utilizó el marco de referencia de Sudamérica estable. Esto puede ser hecho usando los polos de Euler definido por modelos de movimiento de placa como GEODVEL o MORVEL (De Metts, 2010, Argus et al., 2010). En este estudio se utiliza el Polo de Euler estimado por Villegas et al., (2016), el cual está localizado en las siguientes coordenadas: 18.66° S, 132.72°W a una velocidad angular de 118°. Este polo fue determinado a partir de un subconjunto de estaciones localizadas en la parte estable de la placa Sudamericana que muestran un movimiento mínimo absoluto inferior a < 1mm. El campo de velocidad GPS para el sur de Perú obtenido en este estudio es la primera aproximación para obtener una distribución actualizada y más densa de la deformación intersísmica en la región, lo cual permitirá en futuros estudios iluminar la distribución de acumulación de esfuerzos en el plano de falla y la estimación del tamaño del terremoto que podría producirse en esta región, lo cual es fundamental para la evaluación de riesgos.



Figura 3. Velocidades GPS intersísmicas para el sur del Perú correspondientes al periodo 2012-2015 obtenidas por Quiroz (2016). Estas velocidades corresponden a puntos geodésicos de campaña y permanentes correspondientes a la red IGP-Isterre

La dirección del campo de velocidades GPS resultante sigue aproximadamente la dirección de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana N 81° E. La principal causa de que estos desplazamientos presenten esta dirección se debe a que la zona de contacto de las placas de Nazca y Sudamericana está “acoplada” ocasionando el empuje y deformación en el sentido de la dirección de convergencia (Figuras 3 y 4). Se puede observar también que las estaciones costeras entre las regiones de Ica y Moquegua tienen los movimientos más altos, en el rango de 20.43 a 25.97 mm/año y están aproximadamente de manera paralela a la dirección de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. Las estaciones tierra adentro de la presente red presentan velocidades más bajas en el rango de 7.58 a 8.5 mm/año, y tienen un ligero cambio de movimiento en la dirección de las agujas del reloj, como se puede ver en las estaciones de SMRG, REPA, AREQ y SJUN.



En general se observa que los sitios ubicados en la zona costera de sur del Perú presentan altas tasas de deformación superficial que reflejan un acoplamiento significativo en la interfaz de subducción. Las velocidades que se observan al frente de los departamentos de Moquegua y Tacna reflejan que, aún después de ocurrido el sismo de Arequipa del 2001 ( $M_w=8.4$ ), existe un importante nivel de deformación que refleja un fuerte acoplamiento en la zona del gran sismo de 1868. En la Figura 5 se muestran los gradientes de velocidad horizontal derivados a partir de modelos directos de dislocación elástica para diferentes profundidades de acoplamiento (Okada, 1985), junto con las velocidades GPS proyectadas sobre un perfil perpendicular a la línea de costa o fosa (Villegas et al., 2016).

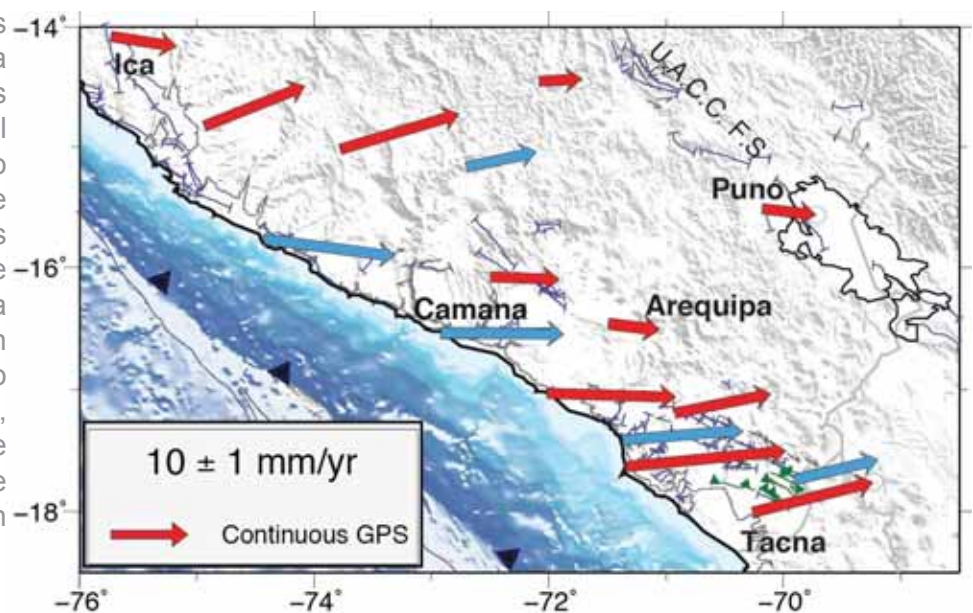


Figura 4. Velocidades GPS intersísmicas para el sur del Perú correspondientes al periodo 2010-2014 obtenidas por Villegas et al (2016). Los vectores de color rojo corresponden a las estaciones permanentes a la red IGN y LISN y los azules a los vectores re-calculados a partir de las observaciones de Norabuena et al (1998) previas al sismo del 2001 de Arequipa. Este campo de velocidad está expresado con respecto al marco de referencia de Sudamérica estable. Para referencia de escala, la estación MQ02 muestra una velocidad de 20 mm/yr.

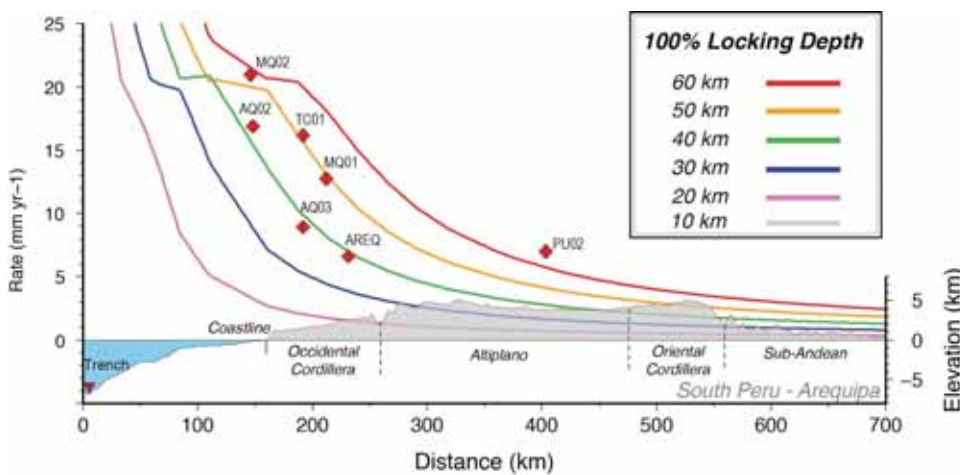


Figura 5. Perfil de velocidad GPS. Las líneas de color representan los gradientes de velocidad horizontal derivados a partir de modelos de dislocación elástica siguiendo la metodología de Okada (1985) y considerando modelos completamente acoplados para profundidades de 20, 30, 40, 50 y 60 km. Para la zona sur del Perú las velocidades GPS son consistentes con una zona acoplada entre 40 y 50 km

## Efecto post-sísmico del sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001 (serie de tiempo)

El análisis de las series de tiempo GPS para la estación IGS AREQ muestra características particulares e intrigantes. Esta zona fue afectada por el terremoto de 8.4 Mw de Arequipa en 2001, que indujo un gran desplazamiento postsísmico en los años posteriores al terremoto (Perfettini y Avouac, 2004), este desplazamiento parece haberse extendido por más de una década (Villegas-Lanza et al., 2016). La Figura 6 muestra la serie resultante desde el año 1996. Claramente se nota que la pendiente en las componentes E y N antes del sismo del 2001 no es la misma durante muchos años después del sismo, el efecto de la fase postsísmica parece recién terminar a finales del 2015, aunque es necesario continuar con el monitoreo.

El cálculo de la velocidad intersísmica para este punto GPS obtenido por Villegas et al. (2016) para el periodo 2007-2013 es de 6.6mm/año, aproximadamente la mitad de la velocidad intersísmica antes del terremoto del 2001 que fue de 13.6 mm/año. Estos resultados indican que el segmento sur de la zona de subducción todavía está experimentando una pequeña contribución de deformación postsísmica que requiere ser cuantificada y corregida con más detalle. El bajo acoplamiento que muestra Villegas et al. (2016), para el sector de la zona de Arequipa se explicaría por este efecto.

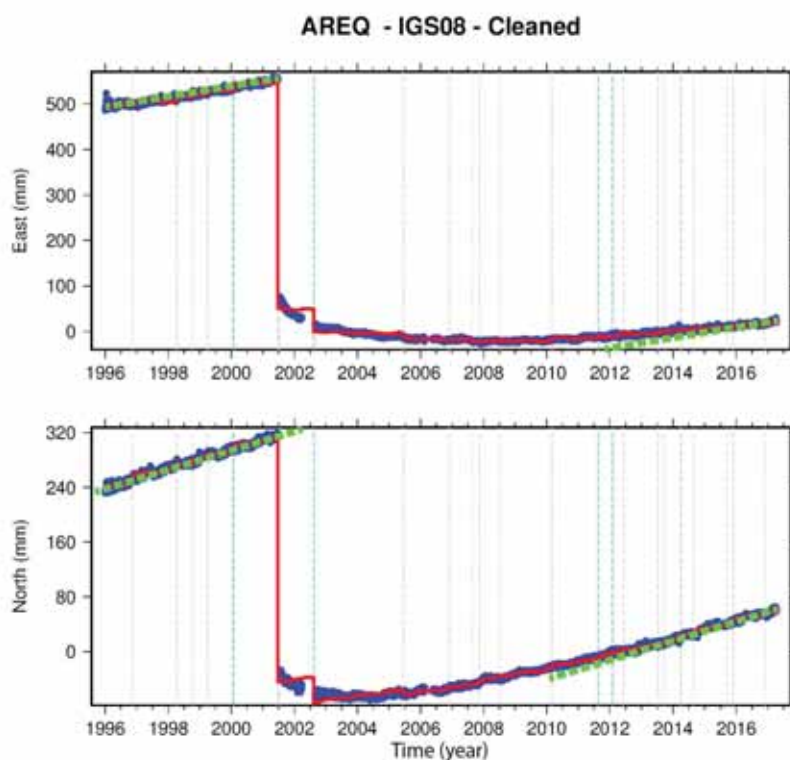


Figura 6. Serie de Tiempo GPS para la estación de Arequipa. Los puntos de color azul son las coordenadas diarias. Se observa el efecto cosísmico del sismo del Arequipa del 2001 ( $M_w=8.4$ ) y un largo efecto post-sísmico que parece extenderse hasta el año 2014-2015. La serie de tiempo obtenida del centro de Procesamiento Geodésico de la Universidad de Nevada.

## Conclusiones

En los últimos años la geodesia espacial ha revolucionado la comprensión de los procesos que ocurren durante todas las etapas del ciclo sísmico, es decir antes, durante y después de los terremotos. Las mediciones GPS efectuadas en el sur del Perú, ya sea en modo continuo o de campaña, han permitido estudiar y cuantificar los desplazamientos de corteza terrestre asociados a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana durante la fase intersísmica. Esta región se encuentra en silencio sísmico desde el terremoto de Arica de 1868.

Los estudios del campo de velocidad GPS en el sur de Perú efectuados en los últimos años muestran la deformación superficial intersísmica es consistente con los esfuerzos impuestos por la convergencia de la placa de Nazca contra la placa Sudamericana más una pequeña contribución de esfuerzos impuestos por la variación del strike de la fosa respecto al ángulo de convergencia. Los valores de deformación superficial GPS para el sur del Perú son consistentes con modelos de interfaz de placa completamente acoplados hasta una profundidad de 40 a 50 km. Especialmente estas deformaciones se extienden hasta el norte de Chile.

Estos resultados sugieren de manera preliminar que la zona de subducción en el sur del Perú está actualmente completamente acoplada y lista para liberar energía para producir un terremoto de magnitud superior a 8.0. No obstante, se requiere realizar una mayor densificación de puntos de observación de campaña; más importante aún, se requiere densificar la instalación de instrumentos GPS permanentes para el monitoreo continuo de la deformación y para una mejor previsión. Un monitoreo continuo con GPS podría servir para brindar una alerta eficaz y oportuna en caso de tsunamis de origen local o cercano.

## Bibliografía

- Argus, D.F., Gordon, R.G., Heflin, M.B., Ma, C., Eanes, R.J., Willis, P., Peltier, W.R. and Owen, S.E., 2010. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy. *Geophysical Journal International*, 180(3), pp.913-960.
- Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L., 2011. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), pp.457-473.
- Béjar-Pizarro, M., Socquet, A., Armijo, R., Carrizo, D., Genrich, J. and Simons, M., 2013. Andean structural control on interseismic coupling in the North Chile subduction zone. *Nature Geoscience*, 6(6), pp.462-467.
- Blewitt, G., Hammond, W. and Kreemer, C., 2016, April. Operational GPS Imaging System at Multiple Scales for Earth Science and Monitoring of Geohazards. In *EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 18, p. 17867)*.
- DeMets, C., Gordon, R.G. and Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), pp.1-80.
- Dorbath, L., Cisternas, A. and Dorbath, C., 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(3), pp.551-576.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. and Rizos, C., 2009. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems. *Journal of Geodesy*, 83(3), pp.191-198.
- Herring, T.A., King, R.W. and McClusky, S.C., 2010. Documentation for the GAMIT GPS software analysis, release 10.05. Mass. Inst. of Technol. Cambridge.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S., Ocola, L. and Ellis, M., 1998. Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the central Andes. *Science*, 279(5349), pp.358-362.
- Norabuena, E. (2004): *Space geodetic studies of crustal deformation in subduction zones: The central Andes and Costa Rica*. 2004. PhD Thesis. University of Miami, USA.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75(4), 1135–1154, doi:10.1016/0148-9062(86)90674-1.
- Ortega, F. (2013): *Aseismic Deformation in Subduction Megathrusts: Central Andes and North-East Japan*, 1–198 pp., California Institute of Technology.
- Perfettini, H., Avouac, J.P. and Ruegg, J.C., 2005. Geodetic displacements and aftershocks following the 2001 Mw=8.4 Peru earthquake: Implications for the mechanics of the earthquake cycle along subduction zones-art. no. B09404. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 110(B9), pp.NIL\_1-NIL\_19.
- Pritchard, M.E., Norabuena, E.O., Ji, C., Boroschek, R., Comte, D., Simons, M., Dixon, T.H. and Rosen, P.A., 2007. Geodetic, teleseismic, and strong motion constraints on slip from recent southern Peru subduction zone earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B3).
- Quiroz, W. (2016): *Interseismic velocity field in southern Peru: Four years of GPS measurements*. Master Thesis, Univ. Grenoble Alpes, France.
- Reid, H. F. (1910): *The mechanics of the earthquake*, Carnegie institution of Washington.



• Tavera, H., Buforn, E., Bernal, I., Antayhua, Y. and Vilacapoma, L., 2002. The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6(2), pp.279-283.

• Villegas Lanza, J.C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire Chira, J. and Nocquet, J.M., 2016. Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), pp.7371-7394.

# SISMOS CONTINENTALES: EL CASO ICHUPAMPA

*H. Tavera<sup>1</sup>*

## Introducción

Los grandes sismos que han afectado al Perú han tenido principalmente como epicentro el mar, siendo los más recordados en el pasado reciente el del 31 de mayo de 1970 (Ancash), el 23 de junio del 2001 (Arequipa) y el 15 de agosto del 2007 (Ica). Sin embargo, es importante tener presente que existe una amenaza más cercana a las ciudades debido a su origen continental por acción de las denominadas fallas geológicas, entre este tipo de sismos se tiene el del 30 de mayo de 1990 y 5 de abril de 1991 (San Martín), así como el del 17 de julio del 2013 (Arequipa), para citar algunos.

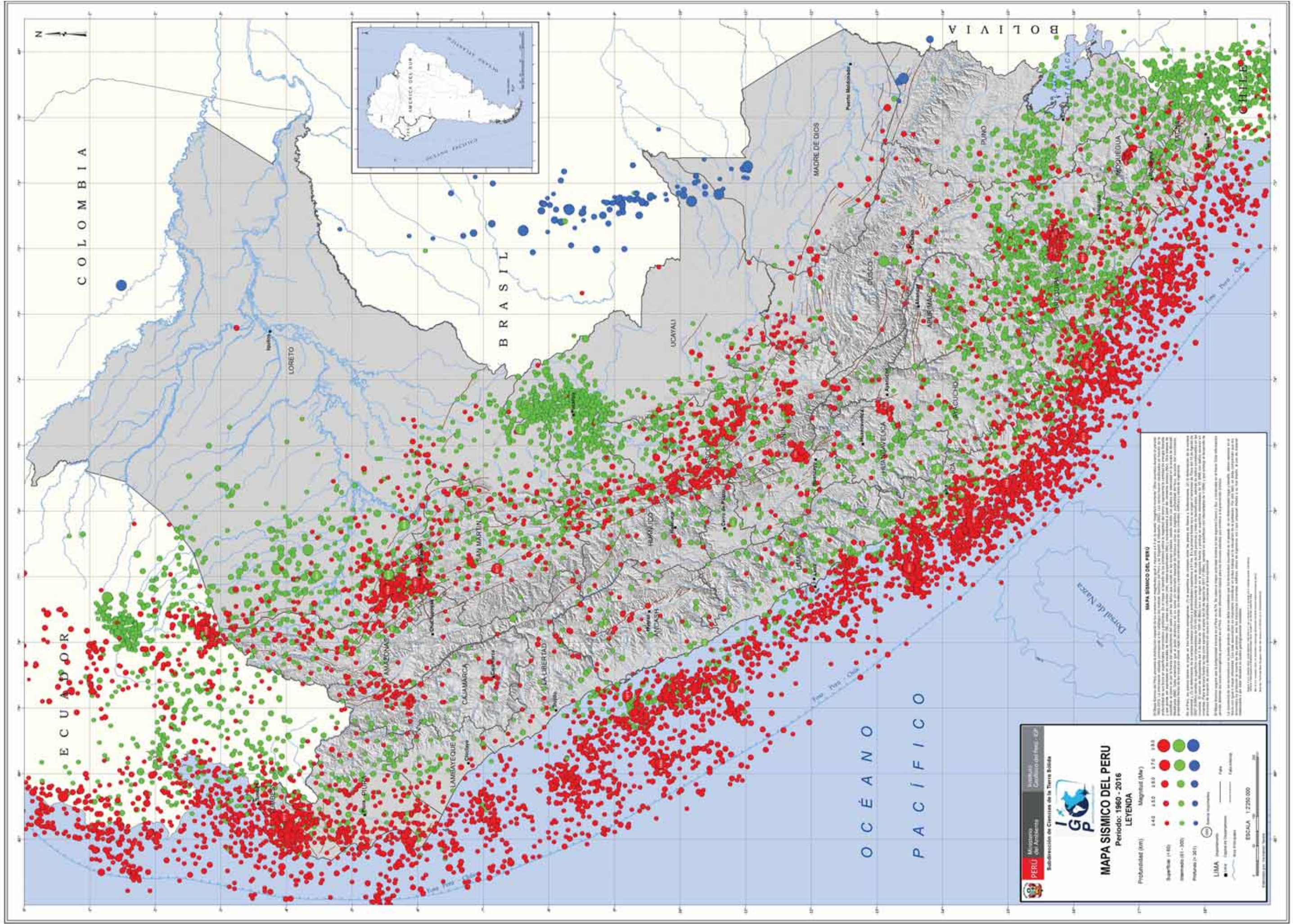
Arequipa ha sido afectada por sismos con epicentro tanto en el mar como en continente, lo que es una muestra de su importante actividad sísmica, esto sin considerar la dinámica que generan los volcanes que alberga. Esta región sufrió en el 2016 un sismo de origen continental, conocido como el “sismo de Ichupampa”.

Este ocurrió el 14 de agosto del citado año, fue de tipo cortical con una magnitud moderada de 5.3 ML, y con epicentro ubicado a 10 km al oeste de la localidad de Chivay. Tuvo una profundidad de 8 km (foco superficial) y en general, presentó un área de percepción con radio del orden de 100 km ( $I_{max}=II$ ), siendo mayor su intensidad ( $I_{max}=VI$ ) en torno a las localidades de Ichupampa, Maca, Yanque y Achoma, distrito de Chivay, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. En este artículo se describen los parámetros hipocentrales del sismo, intensidades evaluadas, orientación de la fuente, eventos precursoros y réplicas, así como su interpretación sismotectónica.

---

<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú. Correo electrónico: [htavera@igp.gob.pe](mailto:htavera@igp.gob.pe)





Mapa 1. Sísmica del Perú para el periodo 1960 y 2014. La magnitud de los sismos es diferenciado por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos.



## Tectónica local

La región del cañón del Colca ha experimentado una importante actividad tectónica en las últimas décadas, la misma que fue puesta en evidencia por Huamán et al. (1993) y Huamán et al. (1995) a partir del análisis e interpretación de imágenes de satélite Landsat MSS y observaciones de campo. El resumen de estas investigaciones se presenta en el Mapa 1, en la cual se observa la presencia de una importante deformación tectónica local representada principalmente por las fallas de Ichupampa, Huanca y el sistema Huambo – Cabanaconde, donde sobresalen las fallas de Solarpampa y Trigal (Figura 1).



Figura 1. Principales sistemas de fallas y lineamientos en la región del Cañón del Colca - Arequipa

Estas trazas de falla de tipo normal se encuentran ubicadas en los extremos noroeste, suroeste y noreste del complejo volcánico Ampato – Sabancanya – HualcaHualca (Sébrier, 1985). Asimismo, en la misma figura se observa la presencia de un importante número de lineamientos que sustenta el desarrollo de altos índices de deformación local con la ocurrencia de importante actividad sísmica.

Los sismos más recientes ocurridos en esta región fueron en los años 1991, 1992, 1998 y 2013, cuyas características se presentan a continuación:

- Sismo del 23 de julio de 1991, ocurrió a las 14:45 (hora local) con una magnitud de 5.4 mb (foco a 4 km de profundidad) y epicentro a 6 km al sureste de la localidad de Maca. Este sismo produjo en la superficie importantes asentamientos y deslizamientos de tierra, además de numerosos desprendimientos de roca a lo largo de las pendientes del río Colca. Las localidades más afectadas fueron las de Lari y Maca, en donde el 20% y 80% de las viviendas – respectivamente – fueron destruidas, además 14 personas fallecieron y hubo numerosos heridos. La evaluación de daños permitió considerar que estas localidades soportaron una intensidad máxima de VIII grados en la escala de Mercalli Modificada (Rodríguez y Huamán, 1992).

- Sismo del 01 de febrero de 1992, ocurrió a las 12:22 (hora local) con una magnitud de 5.0 mb y foco a 5 km de profundidad. El epicentro del sismo fue localizado a 3 km al noroeste de las localidades de Hituhuasi y Visconoja en Pampa Sepina. Este sismo fue seguido por un importante número de réplicas y produjo la caída de rocas y asentamientos de tierras en el valle de Sepina. Las localidades más afectadas fueron Huituhuani, Sahuana y Layuni, donde la intensidad máxima llegó a VI MM (Antayhua y Tavera, 2002).
- Sismo del 12 de abril de 1998, ocurrió a las 18:49 (hora local) con una magnitud de 5.2 mb y epicentro localizado a 9 km al sur de la localidad de Cabanconde y a 13 km al noreste de Huambo. Este sismo no produjo daños personales; sin embargo, casi el 50% de las viviendas de ambas localidades fueron dañadas o destruidas debido a la precariedad de sus construcciones (adobe y piedras). Además, algunas carreteras fueron interrumpidas por la caída de rocas y tierra. Las localidades más afectadas fueron las de Huambo, Cabanconde, Tapay y Choco, las mismas que soportaron intensidades máximas de V (MM).
- Sismo del 17 de julio de 2013, tuvo una magnitud de 5.7 ML y epicentro a 9 km al noreste de la localidad de Huambo. El sismo ocurrió a una profundidad de 7 km y produjo en superficie intensidades máximas de VI (MM) en las localidades de Huambo y Cabanconde. Las localidades afectadas con menor intensidad fueron Maca, Madrigal y Aplao. Se reportó el derrumbe de 35 viviendas construidas con sillar, adobe y piedras, además de 80 que quedaron dañadas con fisuras. Algunos tramos de la carretera Chivay a Huambo fueron cerradas por la presencia de derrumbes.

## Características del evento

A continuación se describen las principales características del evento del 14 de agosto del 2016: parámetros hipocentrales, intensidades sísmicas, así como información sobre las réplicas y orientación de la fuente.

### Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales fueron obtenidos utilizando información de las estaciones que integran la Red Sísmica Nacional y de las provenientes de la Red Sísmica Temporal que funcionan cerca del volcán Sabancaya, a cargo del Instituto Geofísico del Perú.

**Tiempo Origen: 02h 58min del día 15 de agosto, 2016 (Hora Universal)**

21h 58min del día 14 de agosto, 2016 (Hora Local)

Latitud Sur:  $-15.64^{\circ}$

Longitud Oeste:  $-71.67^{\circ}$

Profundidad: 8 km

Magnitud: 5.3 ML

Epicentro: A 10 km al oeste de la ciudad de Chivay (Arequipa)

Intensidad Máxima: VI en la escala MM en Maca, Yanque, Achoma e Ichupampa

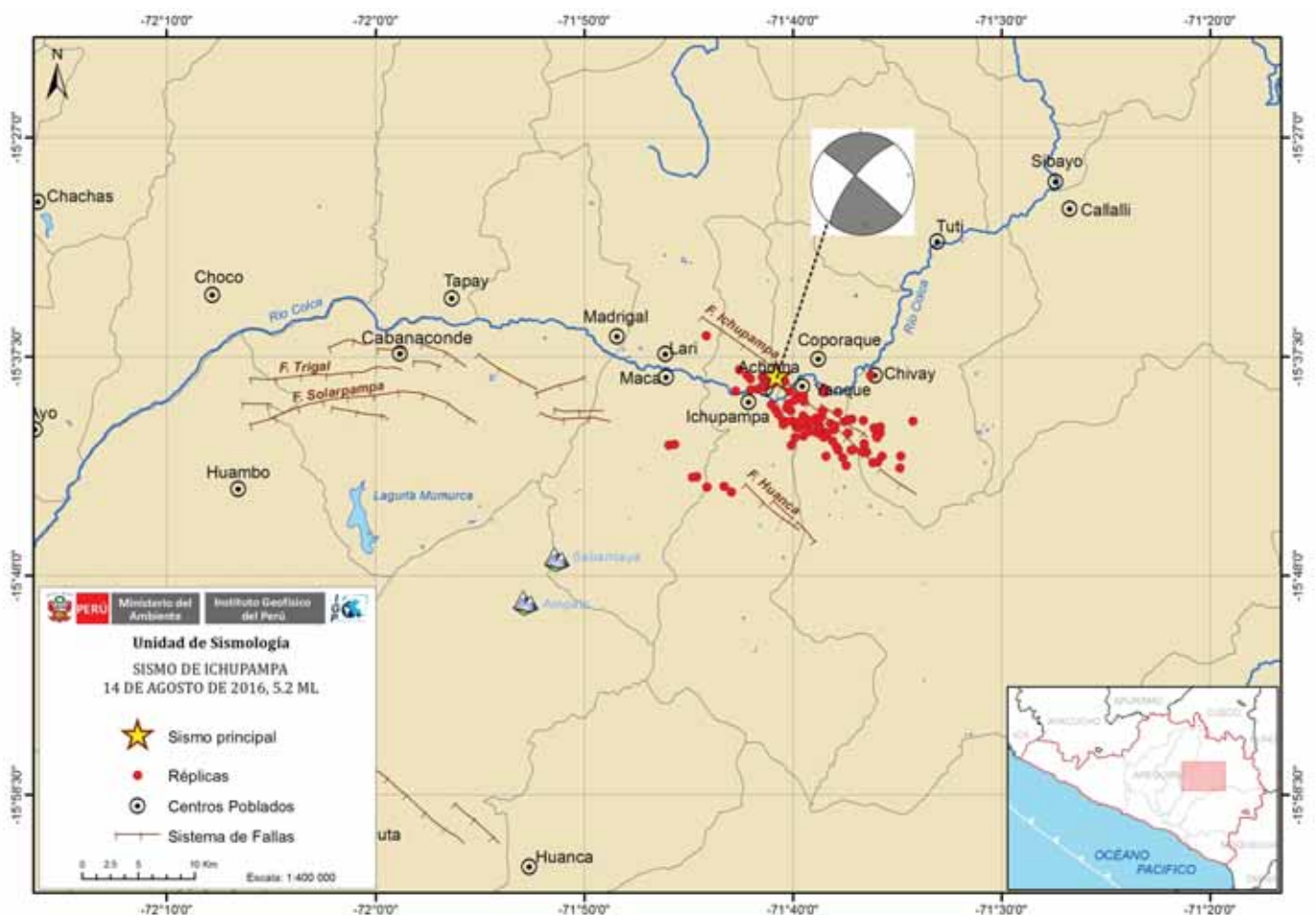
Momento Sísmico:  $2.8E+24$  dina-cm (USGS)

Magnitud Momento: 5.6 Mw (USGS)

## Intensidades Sísmicas

Tras el sismo de Ichupampa se procedió a realizar la evaluación del radio de percepción y niveles de sacudimiento del suelo a fin de conocer de manera indirecta los efectos y daños causados en la región del cañón del Colca. Las evaluaciones fueron realizadas por el personal del Instituto Geofísico del Perú, y la información obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (Mapa 2). A continuación, los principales hallazgos:

- En las localidades de Maca, Yanque, Achoma e Ichupampa el movimiento sentido fue muy fuerte. Un gran número de viviendas de material rústico colapsaron y algunas de material noble presentaron fisuras de diversas dimensiones. Se reportaron hasta cuatro personas fallecidas y un gran número de heridos. Las carreteras se bloquearon por la presencia de derrumbes en las vías de Arequipa a Chivay y Huambo. Se produjeron además deslizamientos de tierra y fisuras en los suelos en varios sectores de estas localidades. En las mismas la intensidad evaluada fue de VI en la escala de Mercalli Modificada.
- En Coporaque, Chivay, Madrigal y Pinchollo el movimiento también fue fuerte, muchas personas salieron de sus casas, algunos muros de viviendas se dañaron y cayeron objetos. Se reportaron personas heridas y las carreteras de comunicación fueron obstruidas por derrumbes de tierra y piedras. En estas localidades la intensidad evaluada fue de V en la escala de Mercalli Modificada.
- En Cabanaconde, Lluta y Huambo el movimiento sentido fue relativamente fuerte y por largo periodo de tiempo. La mayoría de la población salió a las calles. El movimiento estuvo acompañado de ruido. No se reportaron daños en viviendas ni en personas. En estas localidades la intensidad evaluada fue de IV en la escala de Mercalli Modificada.



Mapa 2. Intensidades sísmicas correspondientes al sismo del 14 de agosto de 2016 (5.3ML).



Las altas intensidades evaluadas en las localidades de Maca, Achoma, Yanque e Ichupampa, se debieron principalmente al grado de afectación en viviendas precarias de adobe, piedra y sillar (dañadas por el paso del tiempo y la presencia de lluvias), en comparación con las viviendas de ladrillo que no tuvieron daño mayor. Estas mismas características se han observado después de la ocurrencia de los sismos de 1998 y 2013; por lo tanto, existe un efecto combinado entre la calidad de los suelos y el tipo de vivienda ante la sollicitud sísmica, que en este caso fue intensa debido a la profundidad superficial del foco sísmico (8 km).

## Réplicas y orientación de la fuente

El sismo de Ichupampa del 14 de agosto de 2016 fue precedido por cuatro sismos de magnitudes menores a 3.8 ML que fueron percibidos por la población en intensidades de III en la escala de Mercalli Modificada (MM) en las localidades de Maca y Chivay. Estos precursores sísmicos ocurrieron los días 28 y 29 de julio y el día 14 mismo en horas de la mañana. Del mismo modo, luego de ocurrido el sismo principal, el 17 de agosto se registraron un total de 120 réplicas, de las cuales 8 fueron percibidas por la población con intensidades del orden de III-IV (MM). En la figura 4 se muestra el registro del evento y su serie de réplicas correspondiente a la estación sísmica que funciona en la localidad de Cajamarca.

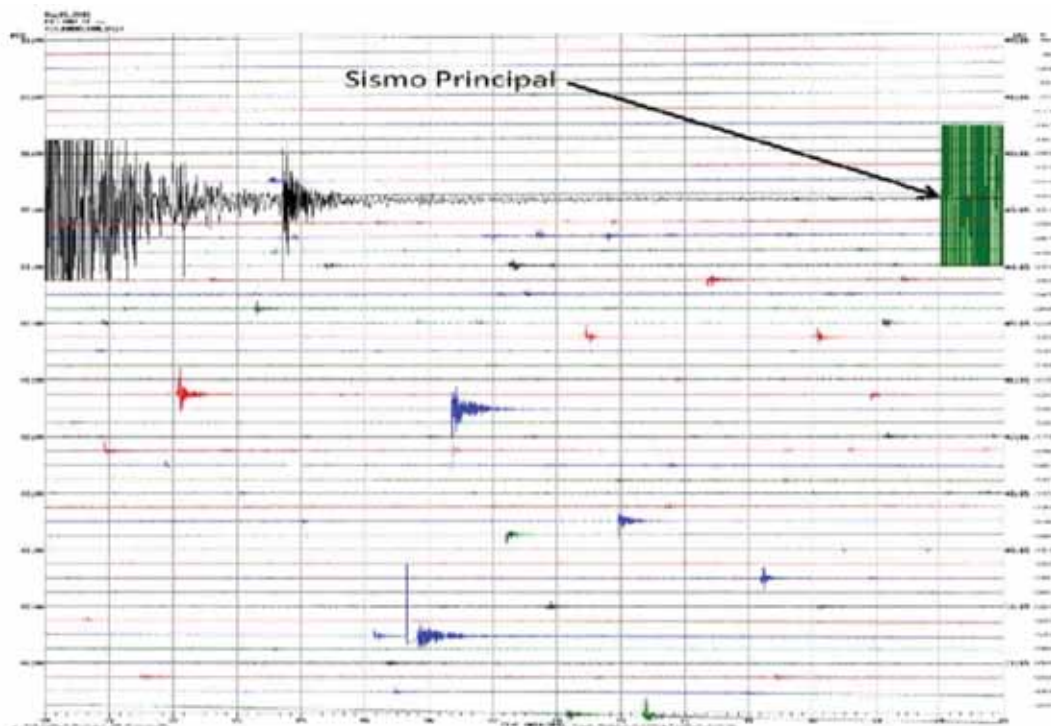
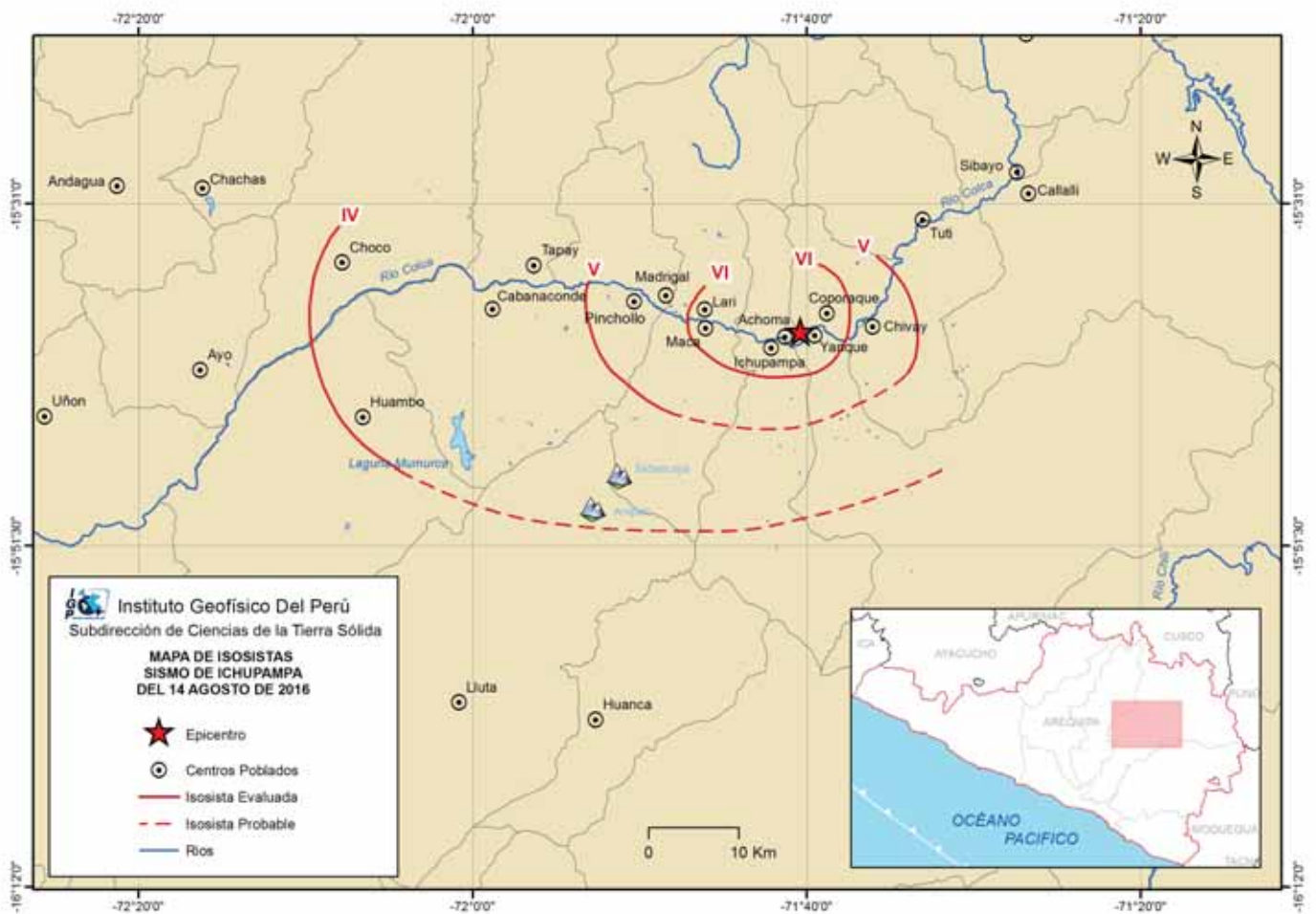


Figura 2. Sismograma correspondiente a la estación CAJ (Cajamarca) en la cual se observa el registro del sismo de Ichupampa y algunas de sus réplicas (comparar amplitudes de la señal correspondiente a cada evento).

En el Mapa 3 se observa la ubicación del sismo y su serie de réplicas registradas hasta el 17 de agosto (120 réplicas), todas distribuidas a lo largo de la traza de la falla de Ichupampa. Esto confirmó que la falla pasó por un periodo de reactivación dentro de todo el complejo del cañón del Colca. El epicentro del sismo y sus réplicas en mayor número ocurrieron entre las localidades de Ichupampa, Yanque y Achoma, lo cual explicaría los daños observados en la superficie.

En la misma figura se muestra el mecanismo focal reportado por la Agencia Internacional USGS, el mismo que corresponde a un proceso de movimiento de tipo falla normal con un gran componente de desgarre, casi describiendo un proceso de ruptura de tipo desplazamiento horizontal, en donde el extremo norte de la falla se ha desplazado hacia el oeste y el bloque inferior hacia el este.



Mapa 3. Distribución espacial del sismo de Ichupampa y su serie de réplicas hasta el día 17 de agosto. El mecanismo focal reportado por la USGS es de tipo normal con gran componente de desgarre es coherente con los proceso de deformación de la falla Ichupampa.

## Efectos secundarios del evento

Los sismos con magnitudes elevadas como el de Ichupampa generan altos niveles de sacudimiento del suelo en zonas continentales, lo que produce una variedad de efectos secundarios en torno a la zona epicentral. De estos efectos, los más comunes son los deslizamientos de tierra y piedras en superficies con pendiente (derrumbes), licuación de suelos y daños en viviendas de una gravedad que dependerá del tipo de suelo, calidad de los materiales y de su antigüedad.

Es conocido que en la región del cañón del Colca las carreteras se encuentran al pie de los cerros y las localidades, en general, están asentadas sobre antiguos deslizamientos de tierra. Además, las viviendas en mayor porcentaje son de tapial, adobe y piedras deterioradas por el paso de los años. Para este evento en particular, los mayores daños en viviendas reportados ocurrieron en las localidades de Maca, Yanque, Achoma e Ichupampa. Los



Figura 3. Imágenes de diversas viviendas Ichupampa, Yanque y Achoma construidas con adobe, sillar, piedras y ladrillo pandereta que colapsaron por la fuerte intensidad de sacudimiento del suelo debido al sismo de Ichupampa (fuentes RPP y Facebook valle del Colca).

mismos fueron observados en viviendas precarias de adobe, sillar y piedras que se encuentran en los alrededores de los lugares antes mencionados, muchas de ellas muy antiguas y dañadas por el tiempo; por lo tanto, muy vulnerables a la ocurrencia de sismos (Figura 3).

Por otro lado, según el M.Sc. Juan Carlos Gómez, investigador del IGP (comunicación personal), señaló que durante el sismo de Huambo del 2013 se presentó similar escenario al del sismo de Ichupampa, pero que las viviendas de tapial y adobe de reciente construcción, así como las de ladrillo existentes en la Plaza de Armas de la localidad de Cabanaconde, no presentaron ningún tipo de daño estructural. Esto confirma que las viviendas precarias son las más vulnerables ante la sollicitación sísmica (Figura 4).



Figura 7. Viviendas de adobe, tapial y ladrillo en la plaza de armas de Cabanaconde que no fueron afectadas por el sismo de Huambo (Foto: J.C. Gomez)

Por otro lado, los principales escenarios de deslizamientos (derrumbes) de tierra y piedras se presentaron en las carreteras a lo largo de la región del cañón del Colca. Aquellas que unen a la ciudad de Arequipa con las localidades de Chivay, Cabanaconde, Huambo, Caylloma, Maca, entre otras, fueron las más afectadas por derrumbes de diferente grado y volumen de piedras y tierra.

## Conclusiones

La región del cañón del Colca se caracteriza por presentar un complejo proceso de deformación superficial puesto en evidencia ante la presencia de fallas tectónicas y lineamientos de diversa longitud. Los sistemas de fallas de mayor importancia son Ichupampa, Huambo-Cabanaconde y Huanca.

El sismo del 14 de agosto del 2016 y su serie de réplicas tuvieron su origen en la traza de la falla Ichupampa, ubicada entre las localidades Chivay, Coporaque e Ichupampa, y los niveles de intensidad en la escala de Mercalli Modificada presentaron valores máximos de VI en las localidades de Maca, Ichupampa, Yanque y Achoma. En estas localidades produjeron el colapso y derrumbe parcial de un gran número de viviendas rústicas construidas con adobe, ladrillo, sillar y piedras. Las viviendas de material noble presentaron algunas de estas fisuras, pero no colapsaron.

Los daños observados en las localidades afectadas se debieron principalmente a la alta intensidad de sacudimiento del suelo debido a que el sismo ocurrió a profundidades superficiales (8 km) y a la mala calidad de las construcciones, típicas de estas localidades. Además debe sumarse el factor suelo que en su mayoría corresponde a antiguos deslizamientos. Estos mismos escenarios fueron observados después de la ocurrencia de sismos en el cañón del Colca en los años de 1998 y 2013, poniéndose en evidencia que la debido a la existencia de un gran número de fallas tectónicas, lineamientos y volcanes, esta región es dinámicamente muy activa.

## Bibliografía

- Antayhua Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., y V. Aguilar (2002): *Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Región del volcán Sabancaya. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, V93, 63-72.*
- Antayhua. Y. y Tavera, H. (2001): *Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, V92, 79-88.*
- Barriga, V. (1951). *Los terremotos en Arequipa: 1582-1868. La Colmena S.A. Arequipa. 332 p.*



- Brune, J., (1970): *Tectonics strain and the spectra of seismic shear waves from earthquakes.* *J.Geophys. Res.* 75, 4997-5009.
- Dorbath, L., A. Cisternas, y Dorbath C. (1990): *Assesment of the size of large and great historical earthquakes in Peru,* *Bull.Seims.Soc.Am.,* Vol. 80, N° 3, pp. 551-576.
- Gonzáles, E., Kosaka, M y Minaya, A., (1996): *Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención.*
- Huamán, D. (1990): *Vigilancia del volcán Sabancaya: Observaciones realizadas a la fecha 03-08-90, por el grupo IGP-Arequipa.* *Inf. Int. IGP,* 6p.
- Huamán, D., Guillande, R., Rodríguez, A., Rivera, R. y Antallaca, A. (1991): *Teleanálisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: El Sistema de fallas Sepina.* *Inf. Int. IGP,* 8p.
- Huamán R. D., Chorowicz, J., Deffontaines, B., Guillande, R. et Rudant, J. P. (1993): *Cadre structural et risques géologiques étudiés á l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Perú):* *Bull. Soc. Géol. France,* t.164, no 6, 807-818
- Huamán, D. (1995): *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa).* *Tesis de Ingeniero, Univ. Nac. San Agustín, Arequipa.* 138p.
- Kanamori, H., Anderson, D., (1977): *Theoretical basis of some empirical relations in seismology.**Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1073-1095.
- Lahr, J. (1998): *Hypoellipse a computer program for determinating local a regional earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern.*
- Lazo, M., Kosaka, R., Minaya, A., Gonzales, E. y Soto, J. (1991): *Evaluación de la actividad sísmica del volcán Sabancaya: VII Congreso Peruano de Geología, Lima: volumen de resúmenes extendidos.* 19-21.
- Silgado, E. (1978): *"Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974)",* *Bol. 3, Serie C, Instituto de Geología y Minería, Lima-Perú,* 133 pp.
- Thouret, J.C., Gourgaud, A., Guillande, R., y G. Salas (1995a): *La actividad eruptiva del volcán nevado Sabancaya (Sur de Perú): geología, sensores remotos, evaluación y mapeo de zonas de riesgo. Resúmenes Extendidos. Seminario Taller: Evaluación de la Litósfera en los Andes peruanos y sus márgenes. Programa PICG, 188. Lima-Perú.*
- Thouret, J.C., Gourgaud, a., Uribe, M., Rodriguez, A., Guillande, R. y G. Salas (1995b): *Geomorphological and geological survey and remote sensing of the current activity of nevado Sabancaya strato volcano (South Perú): assessment for hazardzone mapping.**Z. Geomorph.N-E.,* 39, 4,515-535.
- Tavera, H., Y. Antayhua (2000): *Señales sísmicas de volcanes activos: ejemplos del volcán Sabancaya, Arequipa (Perú).* *Bol. Soco Geol. Perú,* v. 90: p. 107-119.
- Travada y Cordoba (1752): *El suelo de Arequipa convertido en cielo (historia general de Arequipa): primer festival del libro Arequipeño,* 1958, 15p.
- Uribe, M. (1995): *Evaluación de la actividad sísmica en relación con el proceso eruptivo del volcán Sabancaya y el valle del Colca. Resúmenes Extendidos. Seminario Taller: Evaluación de la Litósfera en los Andes Peruanos y sus márgenes. Programa PICG 288. Lima Perú.*






© Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú  
Central Telefónica: (511) 317 2300  
<http://www.igp.gob.pe>

 /igp.peru

 /igp\_peru

 /c/igp\_videos

ISBN: 978-612-47606-0-0



9 786124 760600