



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Tierra
Sólida - SCTS



PROGRAMA PRESUPUESTAL N°068: REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES

Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA CIUDAD DE YAUCA

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Yauca - Caravelí - Arequipa

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú
2015



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE YAUCA

Provincia de Caravelí – Departamento de Arequipa

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gomez

Personal participante

Fabiola Rosado

Wilfredo Sulla

Javier Oyola

Martha Añezco

Gabriela Pérez

Jesús Huarachi

Henry Salas

Renzo Bustamante

Segundo Ortiz

Mariana Vivanco

Roberth Carrillo

Cristhian Chiroque

Abraham Gamonal

Julio Martínez

José Guzman

Apoyo Técnico

Estela Torres

Augusto Cárdenas

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Programa Presupuestal por Resultados N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres se ejecutó el proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica”, el mismo que tuvo como una de sus actividades la “Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico” obteniéndose como resultado final, la Zonificación Sísmica - Geotécnica de la ciudad de Yauca, distrito de Yauca, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Yauca han permitido identificar la existencia de dos tipos de suelos codificados como Tipo S1 y Tipo S2, y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) corresponden a las zonas: ZONA I y ZONA II.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Yauca se constituye como información primaria 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.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Sismicidad

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

7.3.- Estudios de Tsunamis

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

8.3.- Tsunamis

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Modelado Marino

9.1.1.2.- Origen Fluvial

9.1.1.3.- Origen Eólico

9.1.1.4.- Origen Erosional

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

9.2.3.- Geología Estructural

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

9.3.2.- Procesos Eólicos

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

11.3.- Periodos Dominantes

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Fichas de Calicatas

ANEXO 2: Fichas de Ensayo de Densidades

ANEXO 3: Fichas de Ensayo de Penetración Dinámica Ligera

ANEXO 4: Fichas de Posteo

ANEXO 5: Mapas formato A3

NOTA: La base de datos de campo, la información procesada y material fotográfico puede ser solicitado a la Dirección de Sismología del Instituto Geofísico del Perú. Contacto, Dr. H. Tavera (hernando.tavera@igp.gob.pe)

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “**Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres**”, el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2014 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrolla la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las siguientes ciudades:

- Ciudad de **Acarí**, distrito de Acarí, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Bella Unión**, distrito de Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Yauca**, distrito de Yauca, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Chala**, distrito de Chala, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Camaná**, distrito de Camaná, provincia de Camaná, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Arequipa**, distrito Centro, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Cocachacra**, distrito de Cocachacra, provincia de Islay, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Punta de Bombón**, distrito de Punta de Bombón, provincia de Islay, departamento de Arequipa.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región sur ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en cada ciudad y/o área urbana de la región (Silgado, 1978). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la calidad de las construcciones y la educación de la población.

Los estudios de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

a.) **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.

b.) **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.

c.) **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.

Finalmente, remarcar que el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica permite conocer las características dinámicas del suelo y se constituye como información primaria a ser utilizada por los ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, debe considerarse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

2.- OBJETIVOS

El principal objetivo a cumplir en este estudio es obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para la ciudad de Yauca, ubicada en el distrito de Yauca, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1: Plaza de Armas de la Ciudad de Yauca

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Yauca, es uno de los trece distritos de la Provincia de Caravelí, ubicada en el Departamento de Arequipa, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa, en el sur del Perú. Limita por el norte con los distritos de Acarí y Lomas; por el sur con el distrito de Chala; por el este con la Provincia de Parinacochas y por el oeste el Mar de Grau (Océano Pacífico), Figura 2. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia Católica, forma parte de la Prelatura de Caravelí en la Arquidiócesis de Arequipa.

El distrito fue creado mediante Ley del 2 de enero de 1857, en el gobierno del Presidente Ramón Castilla. De acuerdo al Censo del año 2007, el distrito tiene un área de 556 km² y una población de 1708 habitantes, a razón de 3.07 hab/km². La palabra Yauca deriva del quechua Yau (Oye) Ca (Acá). Yauca se ubica a una altura de 22 msnm. El distrito se encuentra ubicado en el kilómetro 556 de la Carretera Panamericana Sur, siendo su capital la ciudad de Yauca. El amplio valle del río Yauca se caracteriza por sus extensos cultivos de olivos, siendo las aceitunas comercializadas en los mercados de los departamentos de Lima e Ica, así como también en el mercado internacional

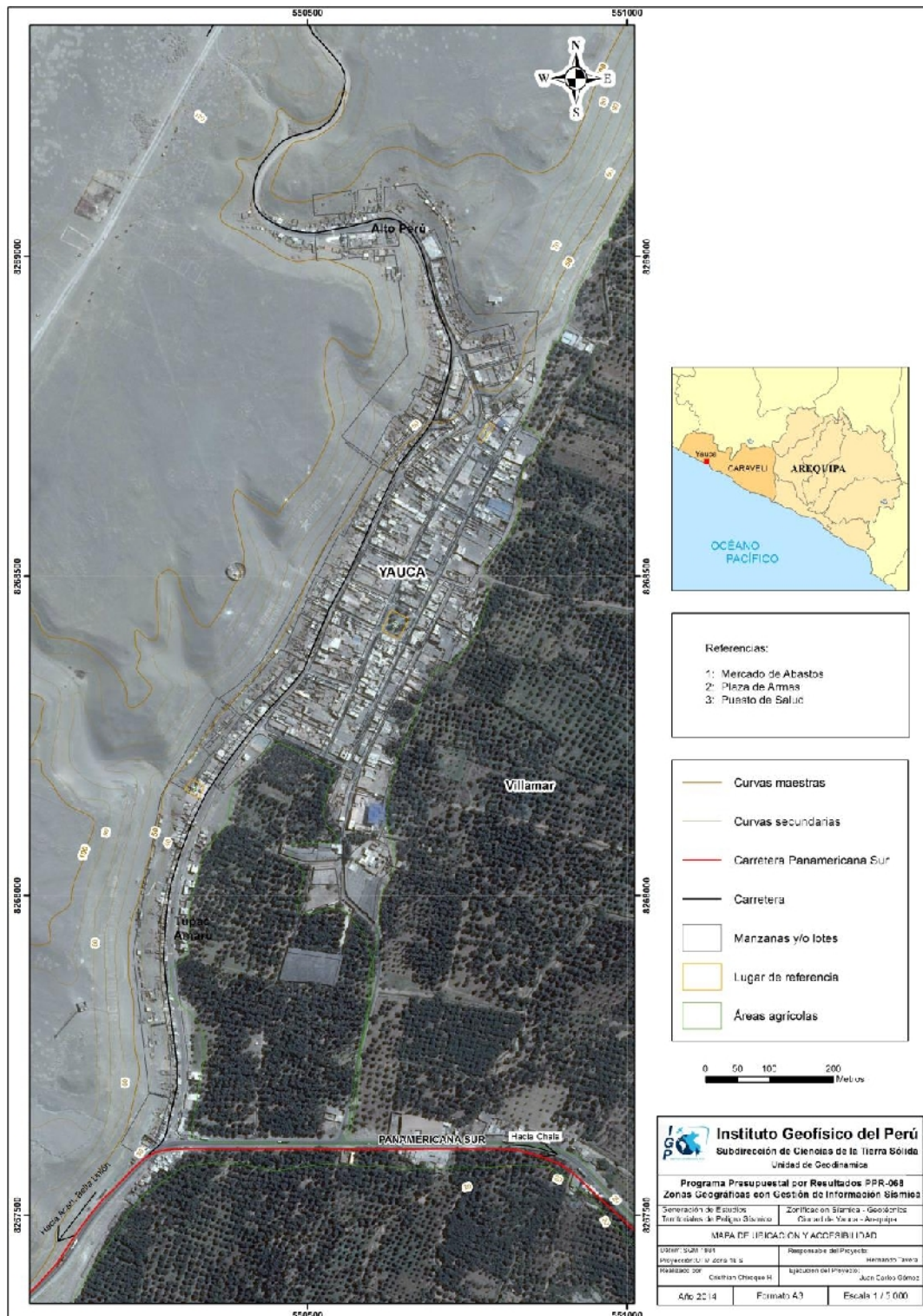


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Yauca, provincia de Caravelí, Departamento de Arequipa

4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado 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 asentamientos, 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 ciudades costeras han soportado procesos continuos de migración de población proveniente de provincias del interior del país y, debido a la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, la población inmigrante ha ocupado zonas de alto riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis y otros efectos secundarios. A estas condiciones, se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables, sin medir su vulnerabilidad e incrementando el riesgo en dichas zonas.

Considerando que el causante directo de los daños que producen los sismos en las ciudades, es la calidad de los suelos sobre el cual se encuentran las viviendas y otras obras de ingeniería, en el año 2005, la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora en la Gestión de Riesgos de Lima Metropolitana con el estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 Distritos de Lima y Callao (Microzonificación Sísmica), el mismo que se constituyó como información primaria y de base para cualquier otra investigación orientada a la gestión de riesgos (Figura 5). Como parte de este esfuerzo, el Instituto Geofísico del Perú, realiza estudios similares en los Distritos de Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino, permitiendo completar la información para el total de los distritos que conforman el área de la ciudad de Lima Metropolitana.

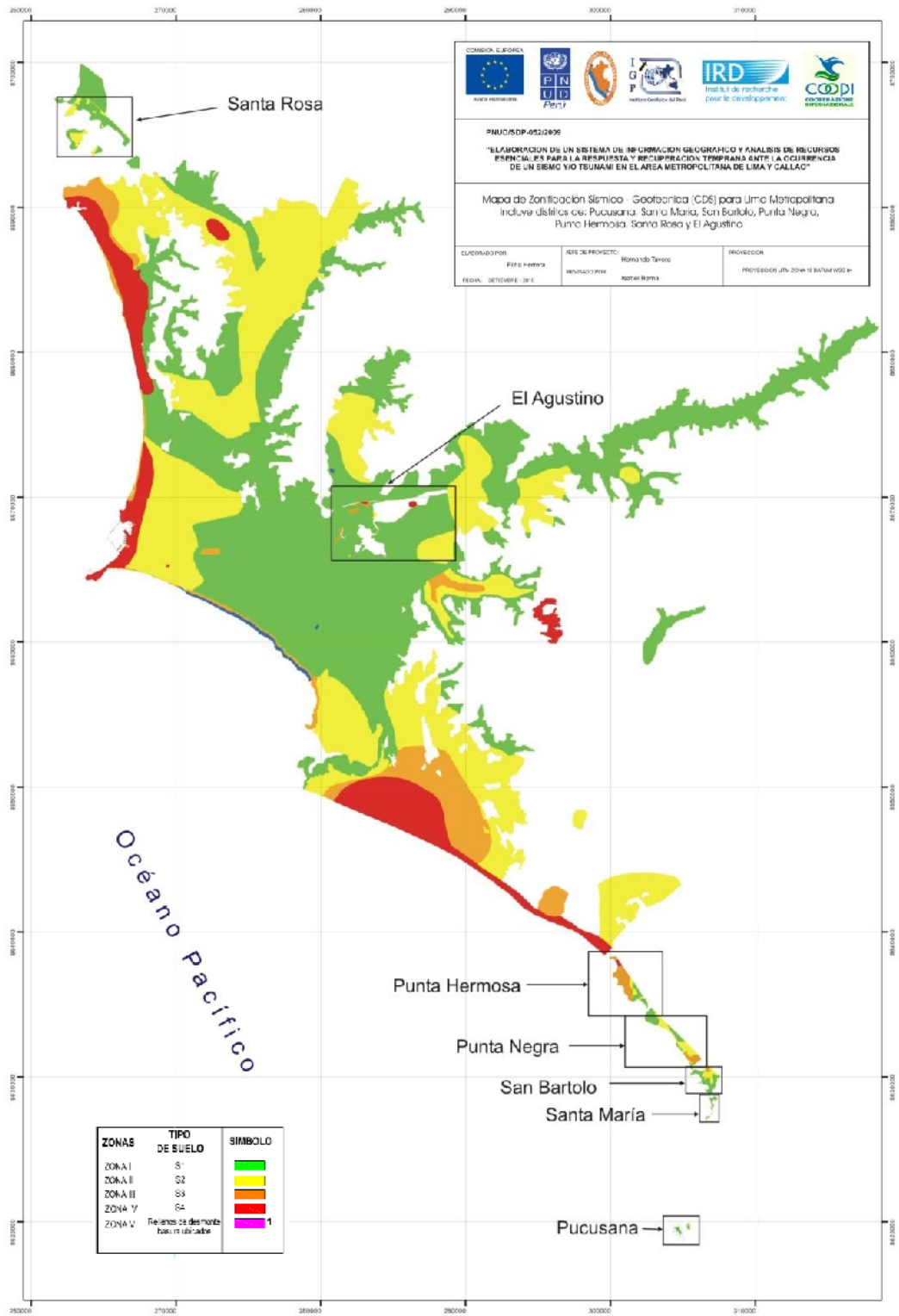


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica para las áreas urbanas de Chosica, Chaclacayo, Huaycán y Carapongo, todos ubicados en el departamento de Lima. En el año 2013, los estudios son realizados en las ciudades de Chimbote y Huarney del departamento de Ancash; además de Barranca y Huacho del departamento de Lima.

En el año 2014, el IGP realiza estudios similares en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca, Chala, Camaná, Arequipa, Punta de Bombón y Cocahacra, todas ubicadas en el departamento de Arequipa. Los resultados obtenidos para la Ciudad de Yauca son presentados en este informe bajo el siguiente título: **“Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Yauca”**.

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que 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. Este factor es fuertemente dependiente de las características geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de los suelos. En conjunto, estos factores controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en la superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas disponibles más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el **comportamiento dinámico de los suelos** (CDS) teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. 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 a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, consideran los estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica sobre las observaciones de campo y la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

En conclusión, 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.

Estudios complementarios, dependiendo de cada área de estudio, son los relacionados a tsunamis, inundaciones por crecida de los ríos, licuación de suelos y deslizamientos de tierra y piedras en zonas de pendiente. Estos escenarios son frecuentes en ciudades ubicadas en zonas costeras y otras en las regiones andinas y subandinas, próximos a zonas de alta pendiente y/o entorno a las riberas de ríos.

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

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)”. Básicamente, 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). La Norma E-030, establece que los suelos pueden ser clasificados en cuatro tipos:

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

*.- **Suelos intermedios (Tipo S2).** Suelos con características intermedias entre las indicadas para los suelos S_1 y S_3 .*

*.- **Suelos flexibles o con estratos de gran espesor (Tipo S3).** Corresponden a suelos que presentan velocidades de ondas de corte menor e igual a 180 m/s.*

*.- **Condiciones excepcionales (Tipo S4).** A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables.*

En general, para cualquier estudio se deberá considerar el tipo de suelo que mejor describa las condiciones locales de cada zona de interés. Para este estudio, la Zonificación Sísmica – Geotécnica se realiza en función de las características mecánicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por la Norma 3-030 Diseño Sismorresistente). En tal sentido se establece la existencia de 5 zonas cuyas características son:

ZONA I: Zona 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: En la zona se incluye 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: Zona 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: Zona 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: Zona 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; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar 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.

El periodo fundamental de las estructuras puede ser deducido de la fórmula propuesta por Rodríguez y Aristizabal (1998), donde $T = N/\lambda$ (T, Periodo de la estructura; N=Número de niveles en la edificación y λ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de λ es igual a 10 y el periodo dominante para una determinada estructura puede ser estimada con solo conocer el número de pisos de cada vivienda. 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.

7.- METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Yauca se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Sismicidad

Se hace uso del Mapa Sísmico del Perú para describir las características sísmicas de la región en donde se encuentra el área de estudio (Tavera, 2014). Del mismo modo, se describe a 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 este objetivo se analiza la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990), así como la proporcionada en los reportes técnicos elaborados por la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

7.2 Estudios de Peligro Sísmico

Considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida el área de estudio en un determinado periodo de tiempo. Para tal efecto, se hace 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).

7.3.- Estudios de Tsunamis

Se caracteriza y cartografía el peligro relacionado con la ocurrencia de tsunamis asociados a un sismo de magnitud 8.5 Mw que pudiera afectar a la zona costera de la ciudad de Yauca (Figura 4). Conocido el modelo de fuente sísmica y obtenida las cartas de batimetría y topografía con alta resolución, el modelado numérico del tsunami se realiza con el algoritmo TUNAMI-N2 desarrollado por investigadores de la Universidad Tohoku de Japón (Goto y Ogawa, 1992). Los resultados obtenidos permiten conocer las zonas de inundación, el tiempo de llegada y

la altura de la primera ola de tsunami, información que permitirá orientar las medidas de gestión del riesgo en la zona de estudio.



Figura 4: Playas de Yauca – Tanaka con acopio de población en las épocas de verano y

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo, de información geológica, geomorfológica, geodinámica y de zonas susceptibles a deslizamientos y/o flujos. El objetivo es identificar y conocer las características geológicas de los suelos en la ciudad de Yauca y alrededores.

.- **Levantamiento Geológico y Geomorfológico.** Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características geológicas y geomorfológicas de carácter local, considerando bases de datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.

.- **Análisis Geodinámico:** Considera la evaluación de los diversos procesos de intemperismo y meteorización que conducen a movimientos en masa, así como el inventario de los mismos teniendo en cuenta parámetros intrínsecos como la litología,

pendientes, geomorfología, cobertura vegetal y drenaje. Asimismo, se realiza el análisis de los niveles de inundación por situaciones de crecida de ríos en épocas de lluvias intensas.

.- **Análisis Geotécnico:** La geotecnia se encarga del estudio de las propiedades físicas y del comportamiento de los suelos y rocas, y para ello se aplican técnicas de exploración y geotécnica como calicatas, perforaciones, ensayos de mecánica de rocas, etc. Estos estudios se realizan con la finalidad de elaborar el diseño de cimentaciones para estructuras tales como viviendas, edificios, puentes, carreteras, taludes, presas, etc. También permite identificar y solucionar problemas de asentamientos, licuación, expansividad y agresividad, entre otros.

En este estudio, la recolección de datos para los estudios geotécnicos se realiza mediante calicatas, ensayos de densidad de campo, muestreos con posteadora y ensayos de penetración ligera (DPL). Las características de estos métodos son (ver Anexos):

.- **Exploraciones a cielo abierto** (Norma ASTM D420): Conocidas como calicatas y consiste en realizar excavaciones de profundidad superficial (hasta 3 metros) con ayuda de una retroexcavadora. En general las dimensiones son de 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m. El objetivo es extraer muestras de suelo para realizar análisis dos tipos de análisis, el primero considera se realiza los análisis granulométricos, límites de elasticidad y contenido de humedad para conocer la clasificación de los suelos de acuerdo al Código SUCS. La segunda muestra se utiliza para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante.

.- **Densidad de Suelo in situ** (Norma ASTM D1556): Consiste en evaluar la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo. Para tal objetivo se realiza el ensayo de densidad de campo con el uso del método del cono, el cual permite conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación permite conocer la

compactación de las partículas que conforman el suelo, más compactos indica mayor resistencia a la deformación.

*.- **Exploraciones con Posteadora Manual** (Norma ASTM D1452): Se define como posteadora a un barrenador manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 6 metros, procedimiento que permite obtener muestras de suelo. Aunque estas muestras son trituradas, sirven para conocer el tipo de suelo y el contenido de humedad. La técnica no es útil en suelos compuestos por gravas y gravillas.*

*.- **Ensayo de Penetración Dinámica Ligera – DPL** (Norma DIN4094): Consiste en un equipo de campo y registro continuo sobre el número de golpes necesarios para hacer penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo. Permite estimar la resistencia del material (suelo) al hincado del cono dinámico. En este caso, la exploración solo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo – arcillosos.*

*.- **Ensayo de Corte Directo** (Norma ASTM D3080): Permite determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que se simula a la que existiría en el terreno al aplicarse una carga. Esta resistencia se debe a la cohesión (comportamiento plástico de las partículas de una muestra) y el ángulo de fricción interna o rozamiento entre las partículas granulares.*

En base a la información geotécnica recopilada en las calicatas se realiza la 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:

<i>G = Grava</i>	<i>C = Arcilla</i>	<i>L = Baja plasticidad</i>
<i>S = Arena</i>	<i>O = Limo o arcillas Orgánicas</i>	<i>W = Bien graduado</i>
<i>M = Limo</i>	<i>H = Alta plasticidad</i>	<i>P = Mal graduado</i>

La segunda muestra debe ser utilizada para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante.

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo de información sísmica y geofísica, además de la aplicación de técnicas y metodologías orientadas a conocer el comportamiento dinámico del suelo y/o sus propiedades físicas.

.- **Método de H/V:** considera como hipótesis de base que las vibraciones ambientales o microtemores generadas por la actividad humana se deben principalmente a la excitación de las capas superficiales al paso de ondas superficiales del tipo Rayleigh. El registro de esta información y su interpretación, permite conocer el periodo natural de vibración del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos resultados son correlacionados y complementados con los obtenidos de los estudios geofísicos, geológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geotécnicos. Para los registros de

vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 5).



Figura 5: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 6, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto YA-102 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en YA-90, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a 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 (ver Figura 7), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo

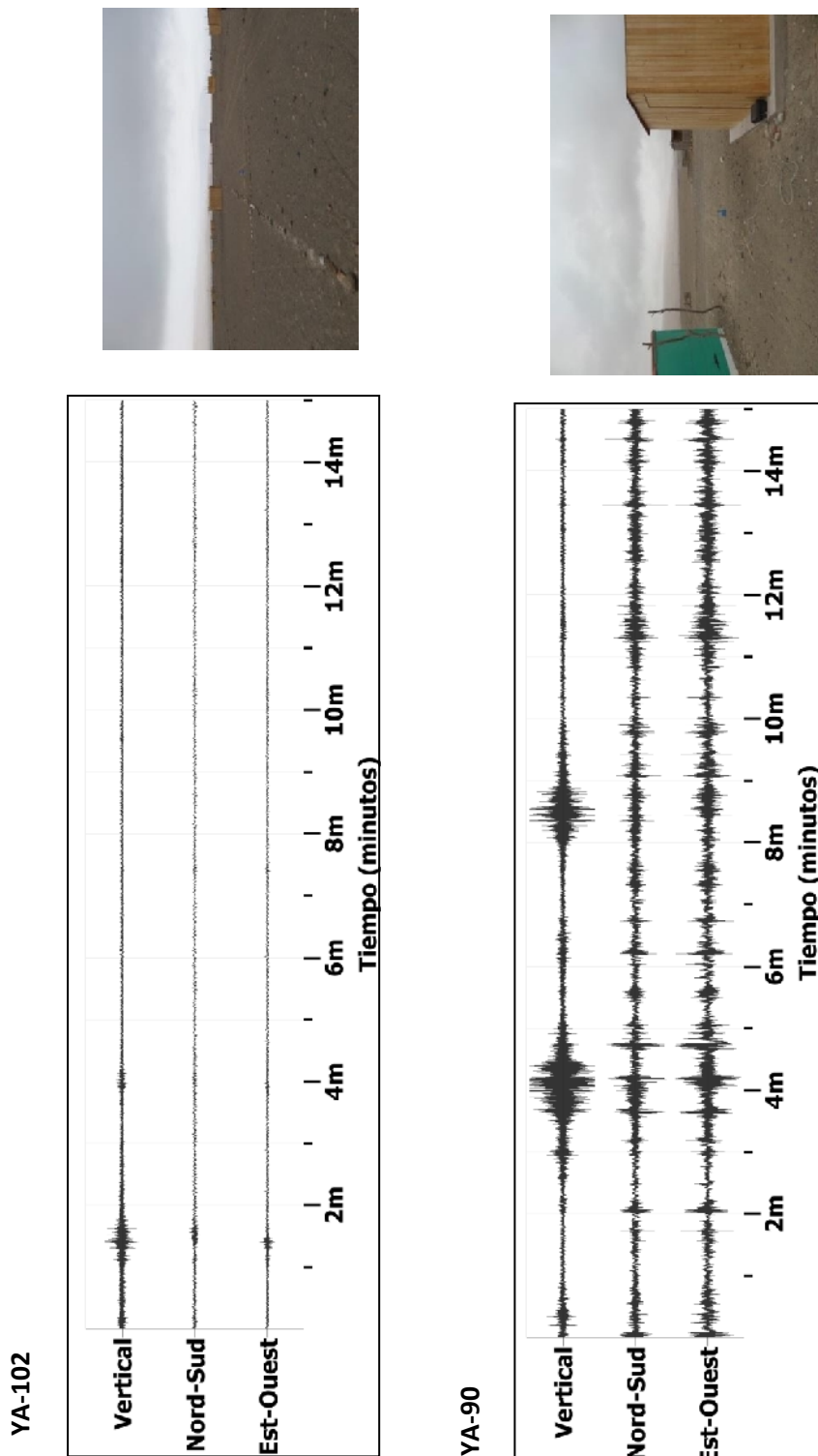
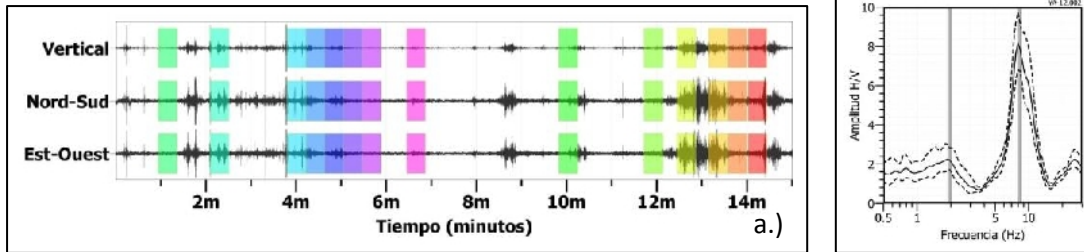


Figura 6: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro con presencia de ruido de fondo (YA-102) y otro con ruido transitorio (YA-90). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto..

YA-12



YA-33

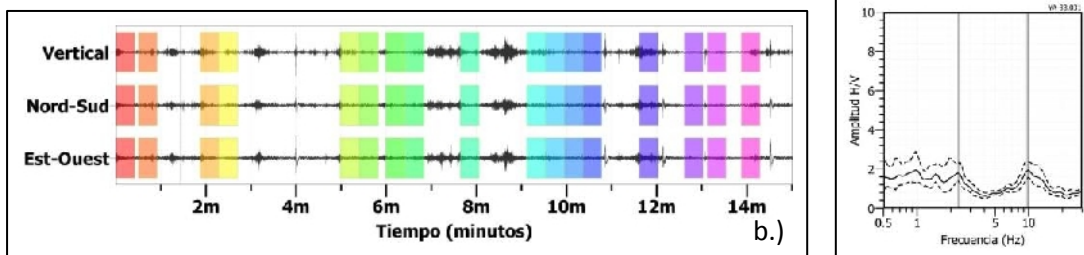


Figura 7: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. YA-12: Registros y razones H/V donde se identifica un pulso de frecuencia predominante, YA-33: Registros y razones H/V en los cuales la frecuencia predominante presenta baja amplitud o no está presente. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

Para aplicar la técnica H/V, se considera la siguiente secuencia:

- .- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- .- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- .- Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar (Figura 6). Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet y Bard, 1994): primero, debe estar presente en un

rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 30 Hz; segundo, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia) y por último, se considera el pico/rango de frecuencias más representativos para cada punto de medida.

Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

.- **Método de Arreglos Lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales (Figura 8). Con este procedimiento se pretende 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.



Figura 8: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica en la ciudad de Yauca

La aplicación de esta técnica permite determinar las características físicas del subsuelo de manera indirecta, basándose en el comportamiento de las ondas sísmicas al pasar por distintos medios, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la

información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte (V_s). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte (V_s) y ondas de volumen (V_p) para el punto medio de cada línea de estudio.

.- **Método de Prospección Eléctrica:** Tiene 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 considera los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. En este estudio se considera solo los perfiles realizados en la superficie del terreno (Figura 9).



Figura 9: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Yauca

Para el análisis de la información obtenida en campo se ha procedido con su calificación en función de la diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos (I : intensidad de corriente, V_p :

diferencia de potencia y K: constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.

La interpretación de la información considera todos los factores posibles que puedan influir en los resultados; es decir, grado de saturación del terreno, porosidad y la forma del poro, la salinidad del fluido, el tipo y composición de la roca, la temperatura, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Considerando la existencia de una estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la posible ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas en el subsuelo. De existir incrementos de fluidos en el terreno estos se verán reflejados por una disminución en los valores de resistividad.

En este estudio se considera 5 rangos de resistividad (Muy alto resistivo, Alto resistivo, resistivo, bajo resistivo y muy bajo resistivos), los cuales presentan las siguientes características:

.- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Debe considerarse que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua, pero si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.

.- Alto Resistivo (color anaranjado): Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo 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 (color verde): Comprende valores entre los 100 y 500 ohm.m. Dentro de este grupo se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.

.- Bajo Resistivo (color celeste): Comprende 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. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

.- Muy Bajo Resistivo (color azul): Comprende valores menores a 20 ohm.m .y están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico y/o arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 ohm.m., equivalente al agua de mar.

El resultado final para este tipo de estudio, es una imagen distancia-profundidad con la distribución de las resistividades reales del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos y geotécnicos.

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

La ciudad de Yauca se encuentra ubicada en el borde occidental de la región sur del Perú; por lo tanto, ha sido, es y será afectada en el tiempo por sismos de variada magnitud que pueden o no causar daños en superficie. Desde este punto de vista, es importante conocer las características de la actividad sísmica en la región, así como estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud.

8.1.- 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 (Figura 10). Una de estas ciudades es Yauca y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1913 (7.7Mw), 1942 (8.0Mw), 1996 (7.7Mw), 2001 (7.7Mw) y 2007 (7.5Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en sus construcciones precarias de adobe y quincha, además de algunos escenarios de licuación de suelos. Estos sismos causaron en la región sur del Perú intensidades del orden de IX-VIII en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978), tal como ocurrió con el sismo del año 2013.

El día 25 de setiembre del 2013 (Tavera et al, 2013), el borde occidental de la región sur del Perú fue afectado con la ocurrencia de un sismo de magnitud 7.0 Mw (magnitud momento) que produjo en el borde costero intensidades máximas de VI (MM), ver Figura 11. Este evento produjo daños mayores en las ciudades de Acari, Bella Unión, Yauca y Chala. El epicentro fue ubicado a 70 km en dirección oeste con respecto a la ciudad de Yauca, produciendo daños en viviendas de adobe y rajaduras en los muros de un gran número de viviendas de material noble (Figura 12).

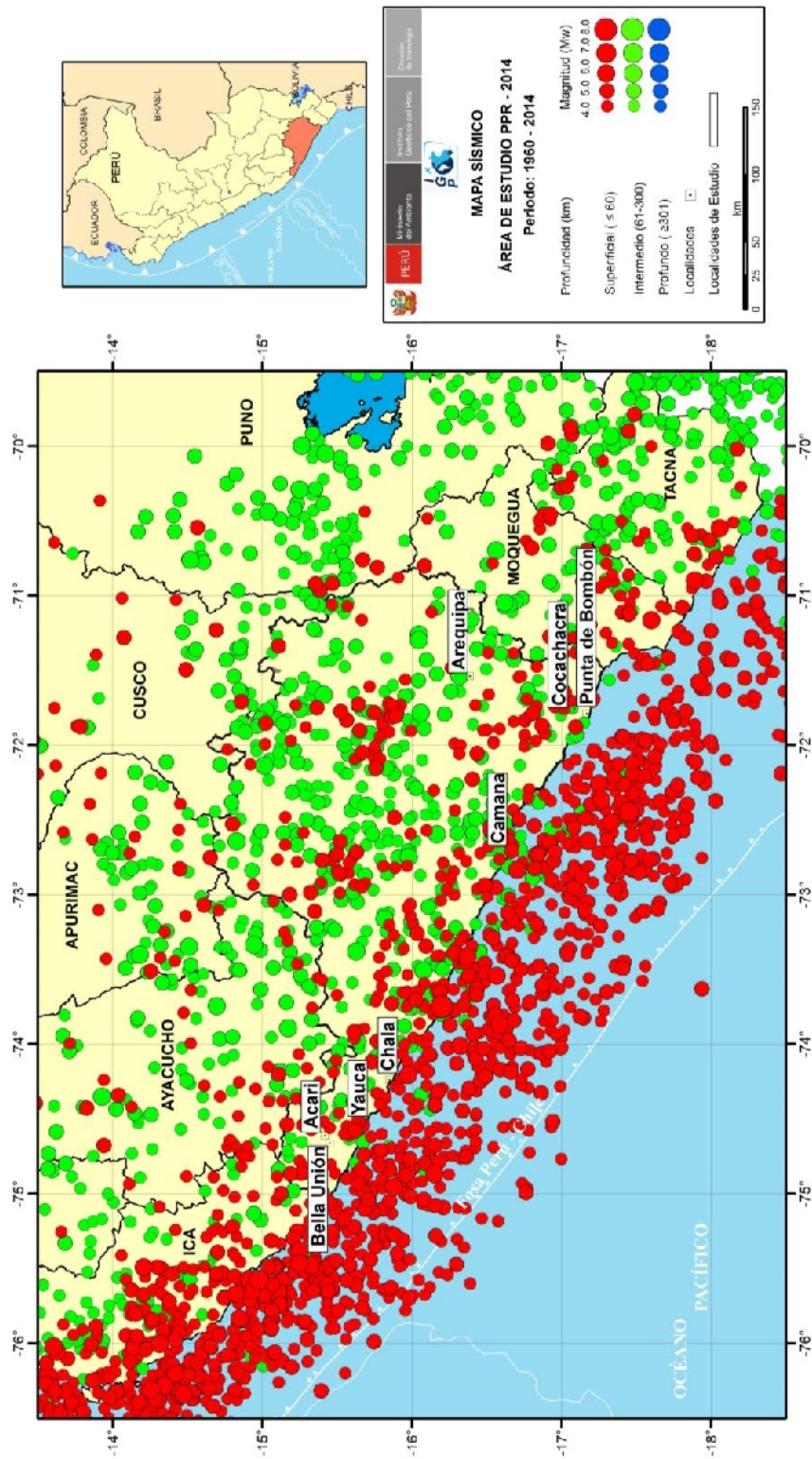


Figura 10: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

}

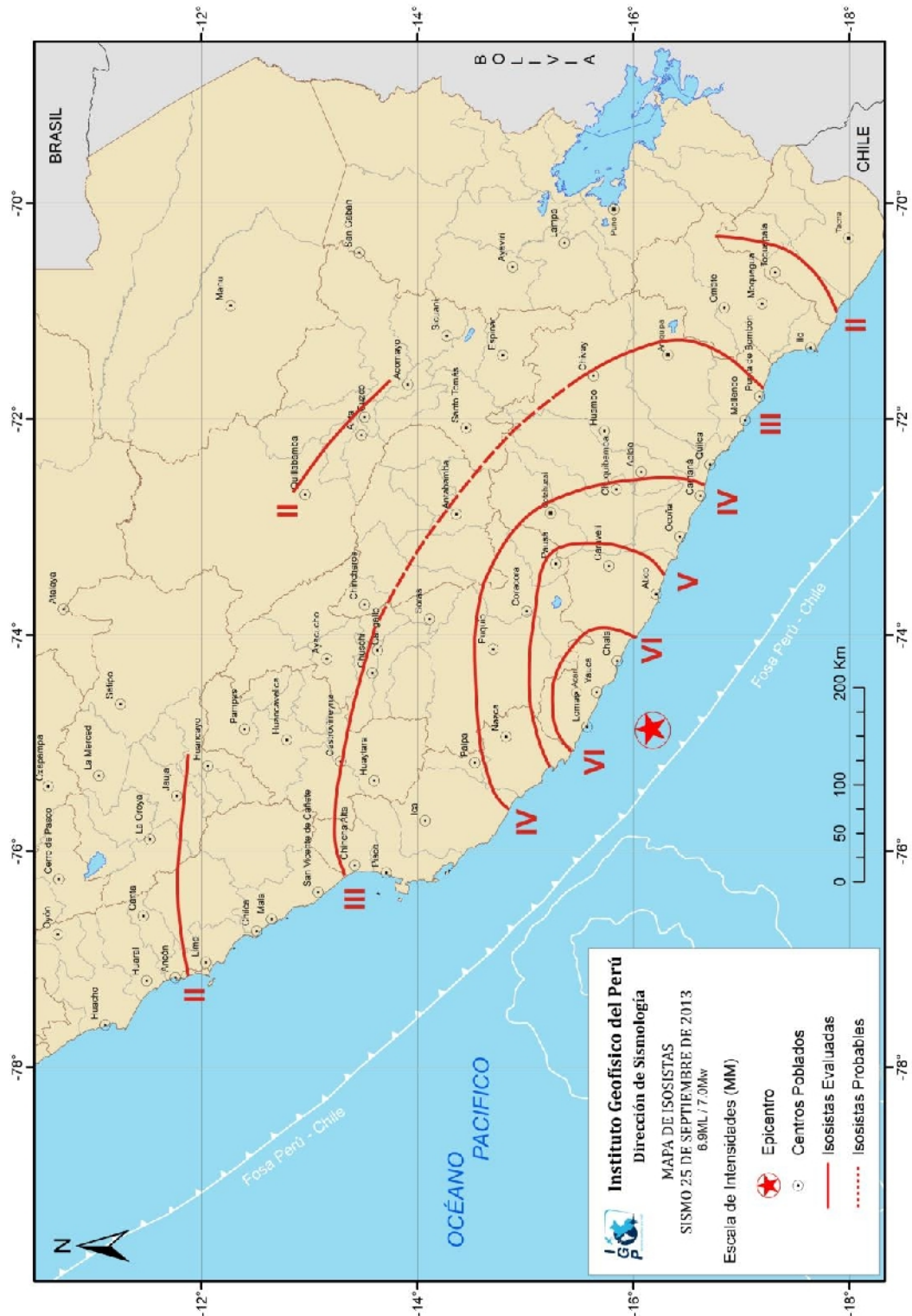


Figura 11: Mapa de intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 25 de septiembre de 2013. En la ciudad de Chala las intensidades fueron de VI (MM).



Figura 12: Imágenes de daños observados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca y Chala debidos al sismo del 25 de setiembre de 2013.

Después de ocurrido el evento sísmico, se produjo hasta 20 réplicas con magnitudes menores a 4.5 ML, siendo al menos una de ellas percibida en la ciudad de Yauca con intensidades del orden de III (MM). Por otro lado, al analizar la distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de 1966 (Nazca), 2001 (Arequipa) y 2007 (Pisco), se observa claramente que existe un área, con eje mayor del orden de 150 km paralelo a la línea de costa, que aún no experimenta ruptura y probablemente corresponda al sismo de 1913 (~8.0 Mw) que afectó toda esta región (Figura 13). De acuerdo al escenario descrito, el borde costero de la región sur y sobre todo, entre las localidades de Lomas y Chala, existe una alta probabilidad para la ocurrencia de un sismo con una magnitud ≥ 7 Mw, el mismo que causaría altos niveles de sacudimiento del suelo en toda la región.

Finalmente, en la Figura 14 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo 1961 – 2014, llegándose a observar que la ciudad de Chala, históricamente ha sido afectada por sismos que han producido en superficie

intensidades del orden de VIII (MM); por lo tanto, es una ciudad expuesta al alto riesgo para el caso de sismos.

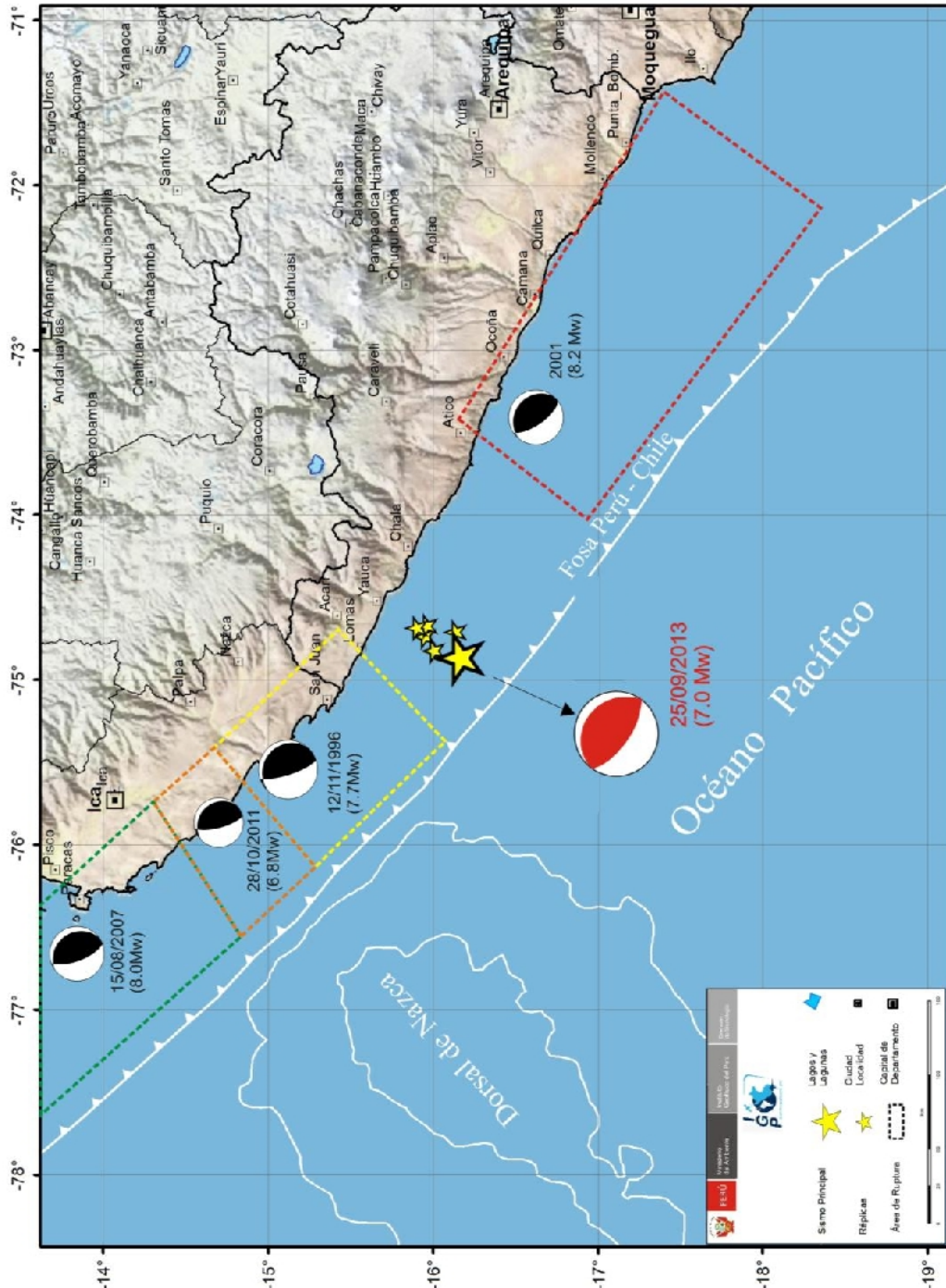


Figura 13: Distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de Nazca-1996, Pisco-2007, Ica-2011, Arequipa-2001 y Yauca-Acarí del 25 de septiembre del 2013. Los mecanismos focales indican el desarrollo de similares procesos de ruptura. El área de ruptura asociada al sismo de 1913 (7.7Ms) estaría entre las áreas de los sismos de 1996 y 2001.

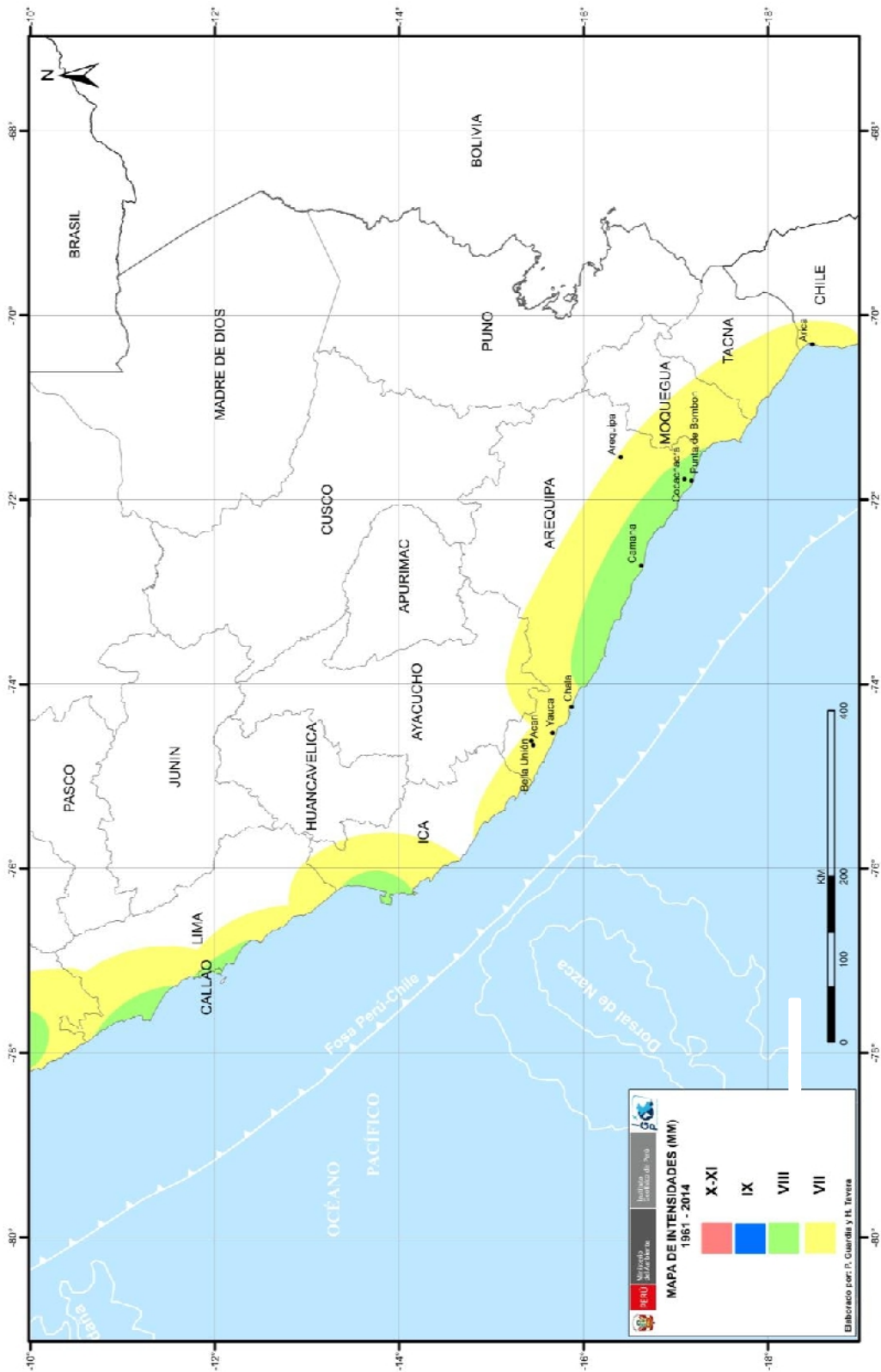


Figura 14: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que 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 involucra un área de ruptura por debajo de la península de Ilo, y que produciría en la ciudad de Punta de Bombón niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001. Esta información es corroborada por estudios realizados por Chilif et al (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En la Figura 15, se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-2 asociada al sismo de 1913, tal vez el sismo mayor ocurrido en esta zona y que tiene alta probabilidad de repetirse con una magnitud igual o mayor a 7 Mw. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

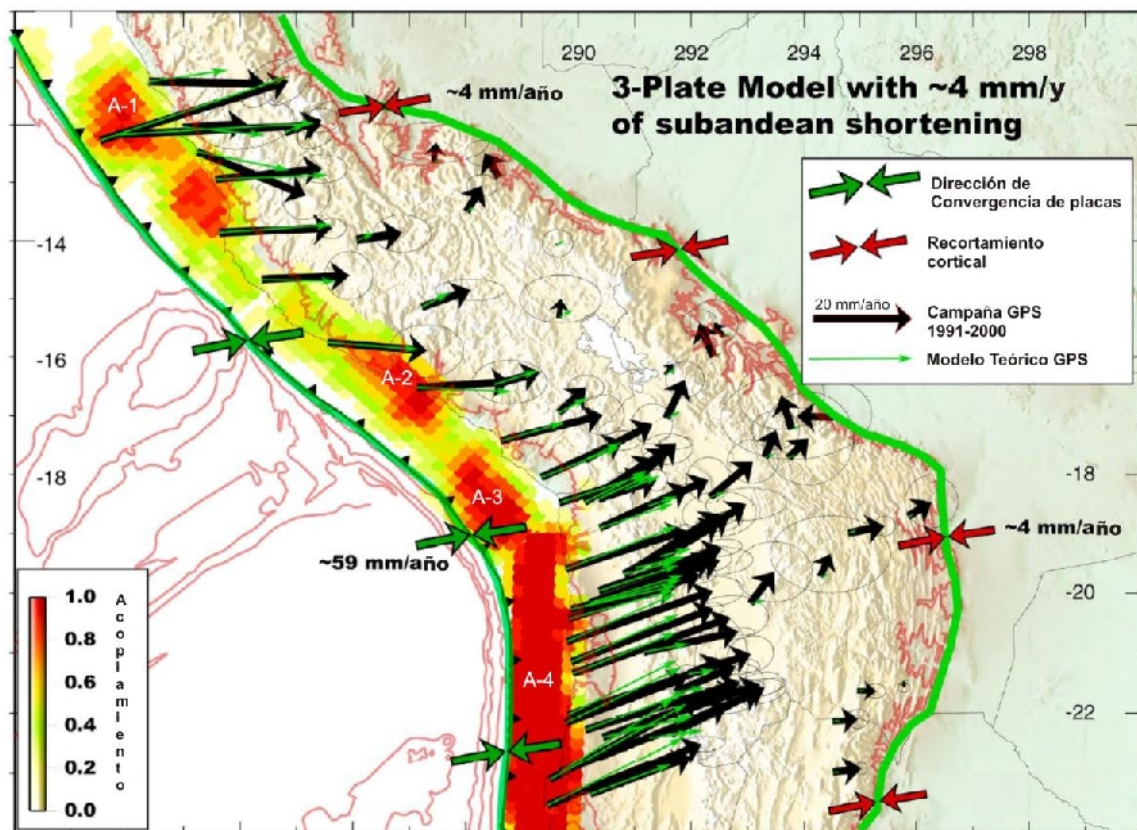


Figura 15: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

8.2.- Peligro Sísmico

Esta metodología 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 Chala se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 500 a 520 gals (Figura 16), equivalentes a intensidades del orden de VII-VIII (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), Pisco 2007 (Tavera, 2008) y Acarí 2013 (Tavera et al, 2013).

8.3.- Tsunamis

La información histórica sobre tsunamis ocurridos en la región sur del Perú y que afectaron, en diferente grado, a las zonas costeras es bastante numerosa (Silgado 1978) y en general presentaron magnitudes superiores a 7.0 Mw; además, de niveles de intensidad en la zona epicentral del orden de VIII (MM) a más. En general, los tsunamis afectaron a la zona costera de todo el departamento de Arequipa con olas de hasta 8 metros de altura. Para el caso del tsunami del año 1868, olas de 12 metros de altura causaron efectos importantes en los puertos y localidades desde Pisco hasta Iquique en Chile, muriendo en Yauca y Chala hasta 30 personas, en Arica 100 y en Iquique unas 200. Según Silgado (1978), la tercera ola alcanzo alturas de 16 metros y movilizó corbetas tierra adentro hasta distancias de 300 metros. Por otro lado, los tsunamis producidos por los sismos de los años 1996, 2001 y 2007, produjeron localmente olas con alturas menores a 8 metros, no produciendo daños a distancias mayores, tal como es el caso de la ciudad de Yauca. Sobre el sismo de 1913, con epicentro cerca de la ciudad de Yauca, no existe mayor información sobre la generación de tsunamis que permita tener idea de los posibles escenarios presentados en la ciudad ante la ocurrencia de este peligro. Sin embargo, es de

interés generar escenarios para posibles tsunamis que pudieran afectar a la zona costera de la ciudad de Yauca.

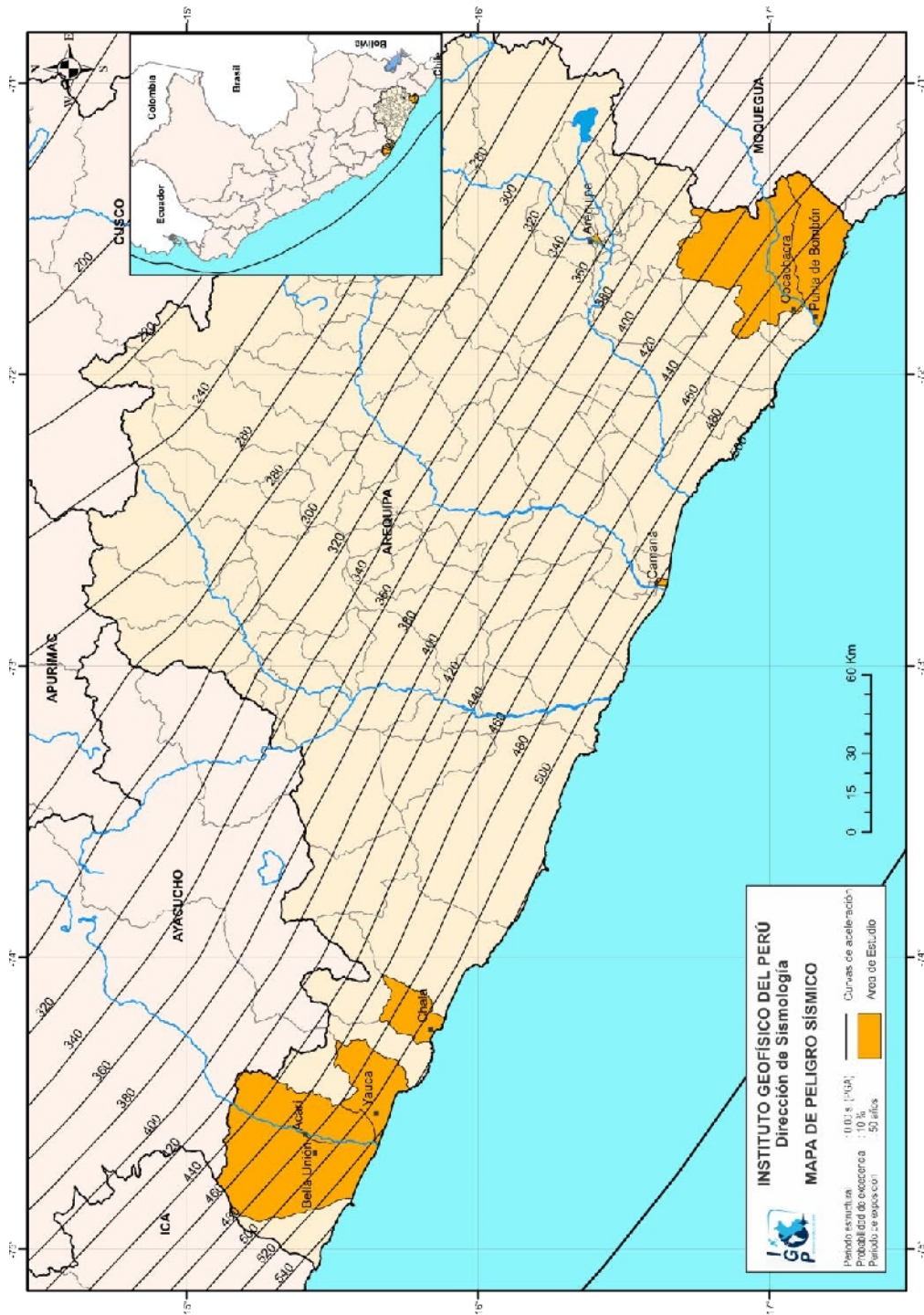


Figura 16: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Para generar los escenarios probables de tsunamis en la zona costera de la ciudad de Chala, se considera la metodología de modelamiento numérico haciendo uso de la siguiente información:

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de la carta 314-315 adquirida en la Dirección de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú (DHN), siendo su muestreo de 30 metros. La topografía local fue construida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) Aster GDEM y STRM, llegando a obtener una resolución espacial de 30 metros.

.- Modelo de fuente sísmica: Se considera como escenario un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a la zona costera de Yauca y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del promedio de los valores correspondientes a los sismos ocurridos en los años 1996 (sismo de Nazca) y 2001 (sismo de Arequipa). Otros parámetros, como las dimensiones del área de ruptura fueron estimadas utilizando las relaciones de Papazachos (2004).

.- Modelado numérico de tsunamis, TUNAMI-N2: El proceso de modelado numérico requiere tener el conocimiento sobre los procesos físicos asociados a las tres fases principales de un tsunami: generación, propagación e inundación. Para el modelado de tsunami se utiliza el algoritmo TUNAMI-N2, desarrollado por investigadores de la Universidad de Tohoku en Japón (Goto y Ogawa, 1992). Para una determinada condición de la fuente sísmica, el modelo TUNAMI-N2 simula la generación, propagación e inundación del tsunami con una exactitud bastante alta (comparación con muchos tsunamis históricos). Así mismo, proporciona información sobre el tiempo de arribo de la primera ola y su altura en una determinada región costera, además de los niveles de inundación horizontal.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica del tsunami indican que en la zona costera de la ciudad de Yauca, la primera ola llegaría en 17-19 minutos después de ocurrido el sismo y tendría una altura del orden de 9 metros, afectando principalmente el área del delta del río Yauca. Los niveles de inundación horizontal y la altura del volumen de agua, tierra adentro con respecto a la línea de costa y para varios puntos de referencia se detalla en la Tabla 1. De acuerdo a estos resultados, la mayor longitud de inundación se produciría a lo largo del río Yauca (3 km) con

volúmenes de agua que alcanzarían los 3 metros de altura. Del mismo modo, en Playa Yauca el volumen de agua alcanzaría una altura de 4.5 metros y una inundación horizontal de solo 0.7 km. De acuerdo a las Figuras 17 y 18, el área urbana de la ciudad de Yauca, podría no se afectada por el tsunami.

Tabla 1: Valores de longitud y altura de inundación por tsunami en la ciudad de Yauca.

YAUCA		
Localidad	Altura de Inundación (m)	Longitud de Inundación (km)
Rio Yauca	3	3
Playa Yauca	4.5	0.7
San Isidro	3	1

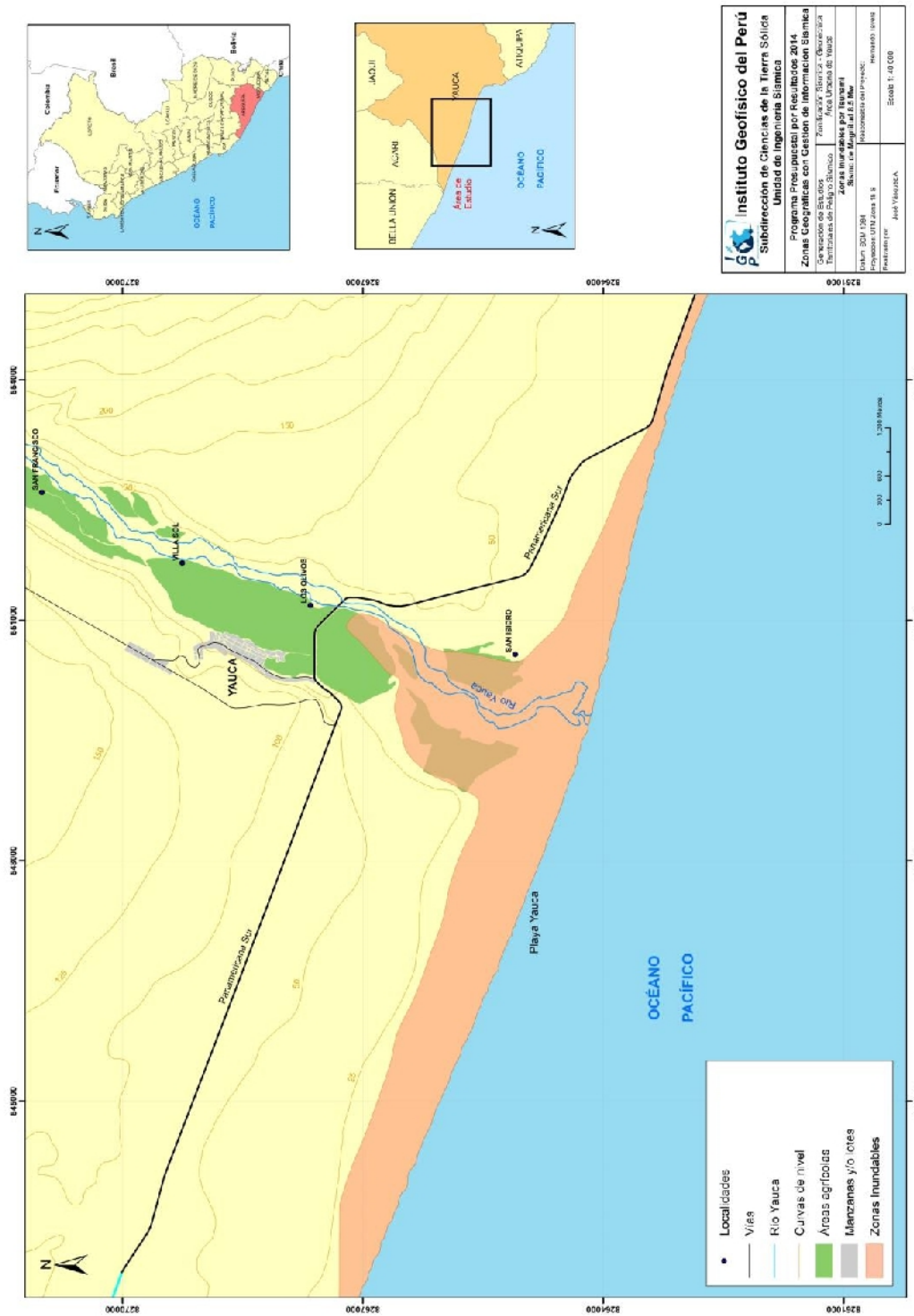


Figura 18: Mapa de niveles de inundación horizontal por tsunami en la zona costera de la ciudad de Yauca

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Yauca 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 de 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).

Para este estudio, en base de la topografía de terreno y el uso de herramientas computacionales como SIG y CAD se ha elaborado 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 Yauca.

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/EGM96 (Zona 18S). La topografía se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica de fotografías aéreas de los años 1975 a 1990 a escala 1:15000. El MDT elaborado se presenta a escala gráfica de 1:5000 y cubre un área de 2.5 km² (Figura 19). La ciudad de Yauca se asienta sobre tres unidades de terrazas que se encuentran entre 25 y 160 m.s.n.m., el valle fluvio-aluvial con altitudes entre 5 y 35 m.s.n.m. y las dunas originadas por la actividad eólica que alcanzan hasta 70 m.s.n.m.

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. La ciudad de Yauca se encuentra sobre una terraza fluvial antigua con pendientes entre 5° y 10°; mientras que, las laderas de los AAHH Alto Tupac y Alto Perú, presentan pendientes de 20° a 45° (Figura 20).

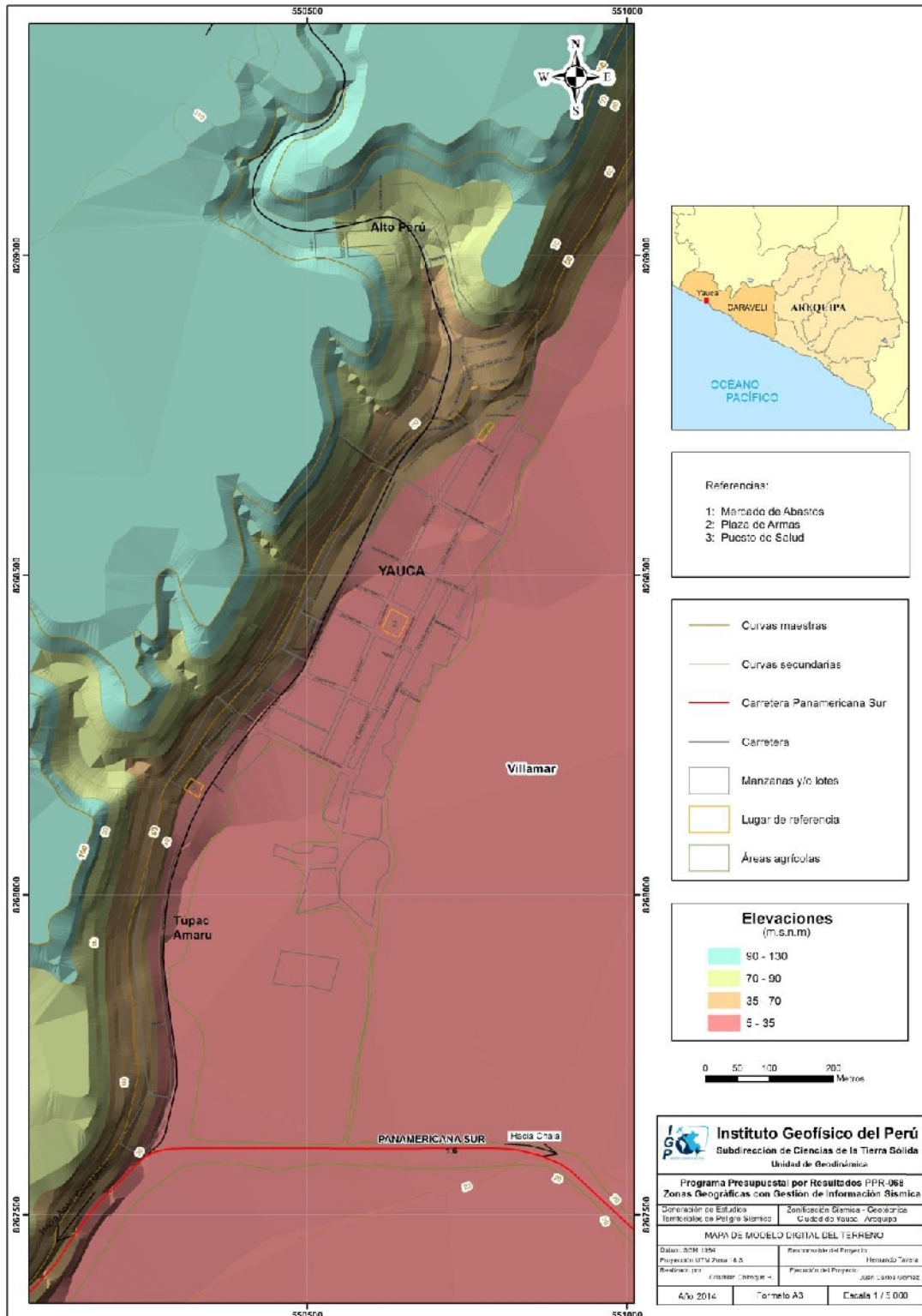


Figura 19: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Yauca y alrededores

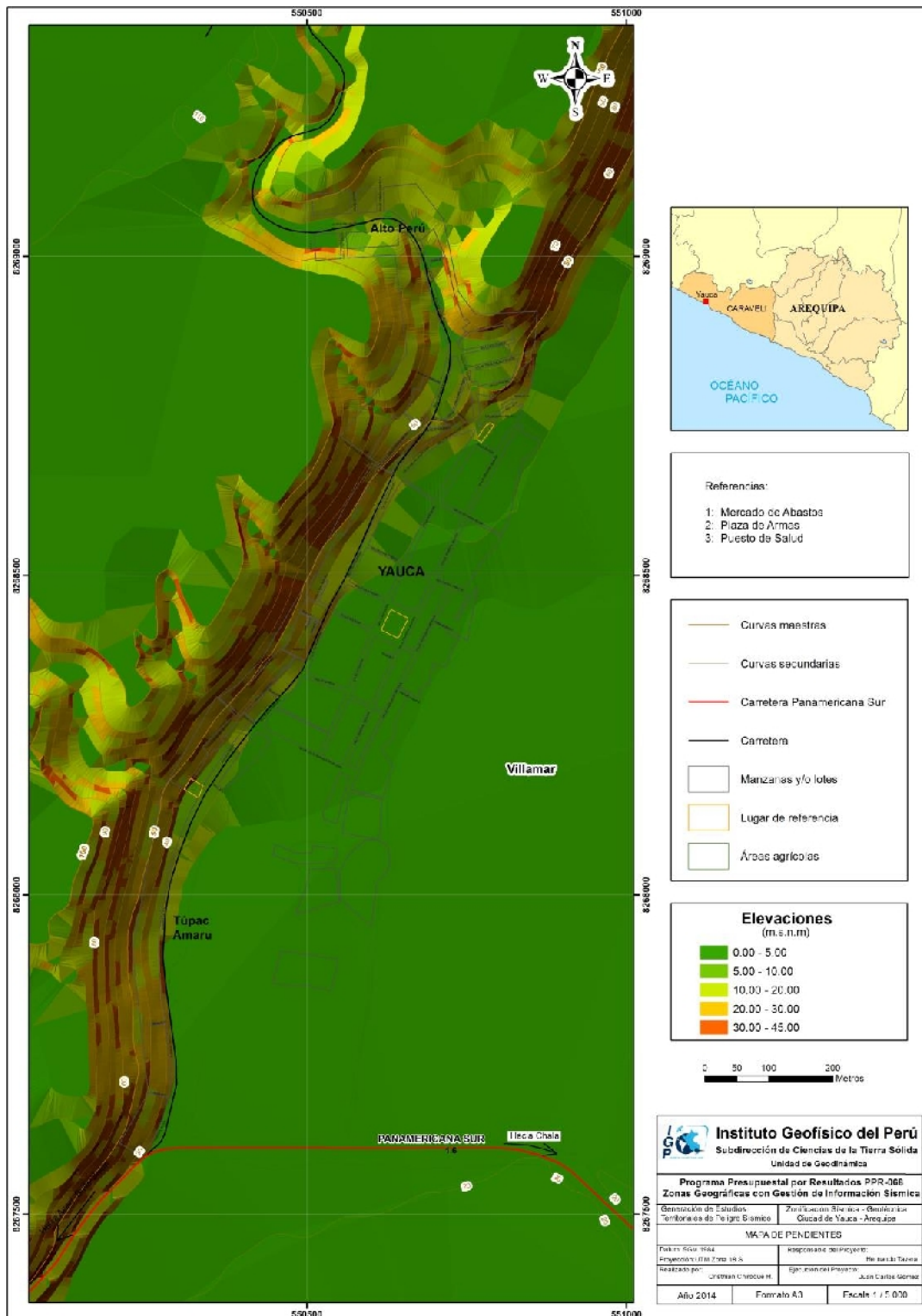


Figura 20: Mapa de pendientes para la ciudad de Yauca y alrededores

9.1.1. Unidades Geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Yauca se ha identificado la existencia de 8 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 21):

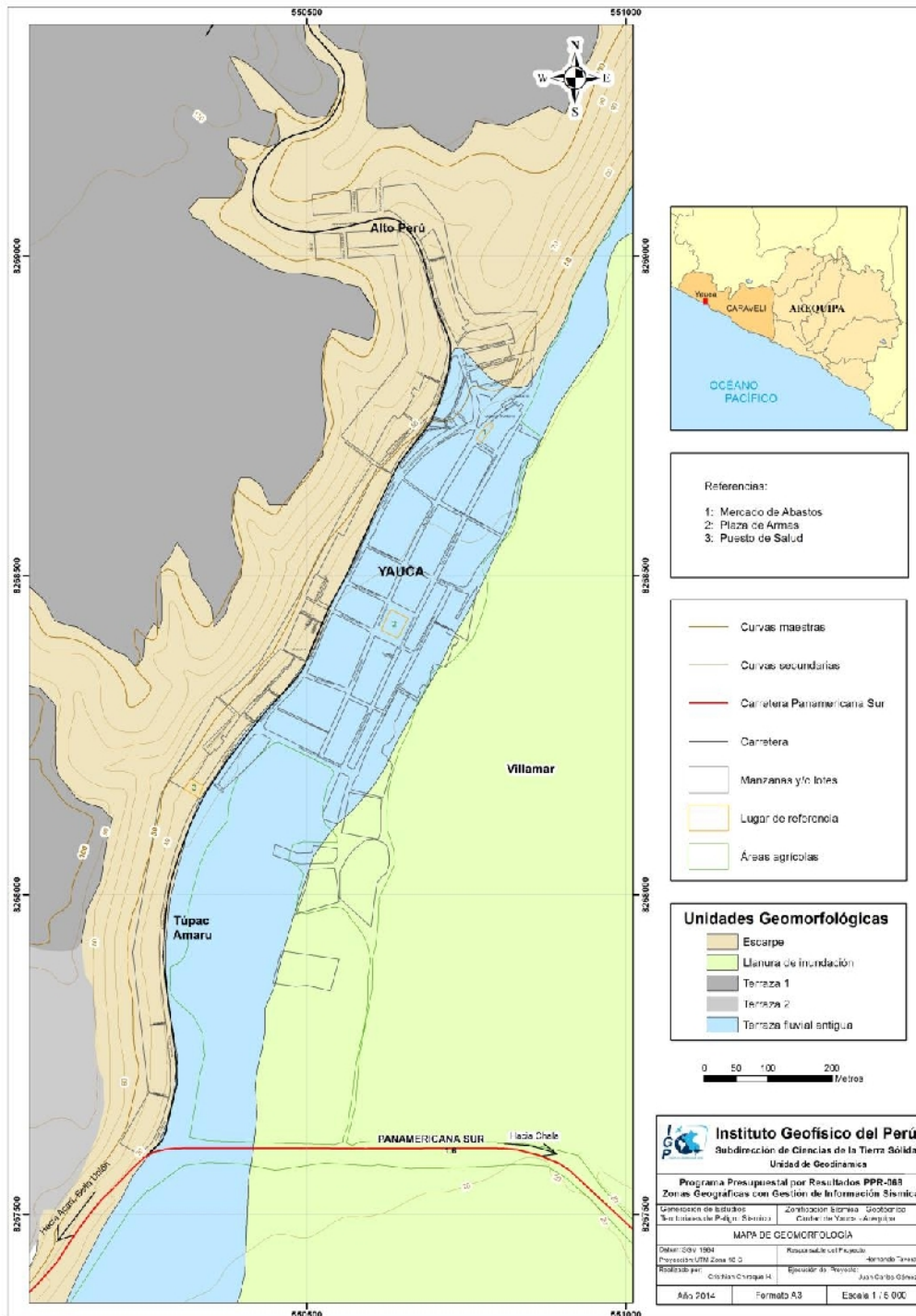


Figura 21: Mapa geomorfológico de la ciudad de Yauca y alrededores

9.1.1.1.- Modelado Marino

El resultado del modelado son las terrazas marinas; es decir, formas deposicionales generadas como consecuencia de la sedimentación en la zona costera. Se trata de materiales deltaicos retrabajados y gravas resultantes de la erosión marina, la misma que se encuentra presente por encima de la línea de costa actual debido a levantamientos de la zona costera como producto de la tectónica regional.

*.- **Terrazas marinas:** Son grandes superficies planas con una suave inclinación hacia la costa, y un escarpe con desniveles de hasta 10 m de altura (Figura 22). Estas terrazas conforman un relieve escalonado que evidencia el desarrollo de movimientos eustáticos, levantamientos o pulsaciones que debieron ser lo bastante rápidos y continuos como para que las superficies anteriormente emergidas no fueran erosionadas por la acción marina (Figura 23).*



Figura 22: Relleno de terraza marina que a la derecha, pasa a la rampa de una terraza superior.

Se han distinguido hasta 3 niveles de terrazas marinas denominadas Terraza 1, Terraza 2 y Terraza 3, y su delimitación se ha realizado en base a sus características topográficas y cambios de pendiente. Estas geoformas son de gran extensión y se encuentran a ambos lados de la zona urbana de la ciudad de Yauca.



Figura 23: Vista de la Panamericana Sur cruzando una llanura de inundación (áreas de cultivo) y lastres terrazas presentes en Yauca (ver mapa geomorfológico).

9.1.1.2.- Origen fluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968), ella crea gran parte del relieve y forman llanuras de inundación en las que se construyen gran porcentaje de las ciudades. Los ríos son esencialmente agentes de erosión y 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).

En la zona de estudio el modelado de origen fluvial está conformado por agentes externos tales como los cursos de aguas permanentes o regulares, la escorrentía superficial y las redes de drenaje originadas por periodos de lluvias intensas. Las formas resultantes del modelado fluvial son: la llanura de inundación y las terrazas fluviales.

Llanura de inundación: Es la superficie fluvio-aluvial adyacente al curso fluvial del río Yauca y que frecuentemente suele inundarse (Figura 24). Ocupa la parte central de la zona de estudio, con una dirección N 20° S aproximadamente.



Figura 24: Llanura de inundación y terraza fluvial del río Yauca. La mayor área se encuentra destinada al cultivo.

Terraza fluvial antigua: Son formas deposicionales producto de la sedimentación del material transportado por el río Yauca. Corresponden a antiguas llanuras de inundación que están por encima del nivel máximo de las aguas del río (Leopold et al. 1964). Las terrazas se han formado en el momento en el que el río se encaja sobre su propio curso y por consiguiente, sobre sus propios depósitos. Son superficies formadas por terrazas con escarpes de muy poca altura.

Se considera que el mayor porcentaje de la zona urbana de la ciudad de Yauca está asentada sobre una terraza fluvio-aluvial antigua y situada por encima de la llanura de inundación del río Yauca (Figura 25). Esta terraza se formó durante un episodio de encajamiento y levantamientos originados por procesos tectónicos y posterior erosión fluvial del río.



Figura 25: Vista panorámica de Yauca. El 90% del área urbana de la ciudad de encuentra asentada sobre una terraza fluvial antigua.

.- **Lecho fluvial:** Son formas deposicionales producto de la sedimentación del material transportado por el río Yauca. Corresponden a antiguas llanuras de inundación que están por encima del nivel máximo de las aguas del río (Leopold et al. 1964). Las terrazas se han formado en el momento en el que el río se encaja sobre su propio curso y por consiguiente, sobre sus propios depósitos. Son superficies formadas por terrazas con escarpes de muy poca altura. Es el canal o cauce originado por la acción erosiva del agua y por los materiales en conjunto durante todo el desarrollo y evolución del río Yauca. Este proceso ha dejado evidencia de los antiguos cauces, del perfil transversal y en general, de las formas del drenaje fluvial (Figura 26). En este caso se ha identificado la presencia de dos lechos fluviales: Lecho menor, es el cauce por donde fluye el agua en períodos de sequía debido a las escasas precipitaciones, este se encuentra junto al área urbana de la ciudad. Lecho mayor, se encuentra al Este del área urbana de la ciudad, el agua circula en períodos de avenidas o precipitaciones intensas

9.1.1.3.- Origen eólico

Este tipo de modelado y sus principales geoformas son originados por la acción del viento y está representado por pavimentos desérticos y por acumulaciones eólicas.

.- **Pavimento desértico:** Están conformados por clastos angulosos cubiertos por una matriz de arena generada por deflación, proceso en el que las partículas

finas son transportadas por el viento, quedando el material grueso como un residuo que llega a constituir el pavimento (Gutiérrez, 2008), Figura 27.



Figura 26: Lecho fluvial activo del río Yauca. El cauce principal mide 70 metros aproximadamente.

En el área de estudio existen pavimentos desérticos presentes en zonas elevadas que se encuentran a ambos lados del valle fluvial. El pavimento situado al Oeste, en su evolución ha incrementado su contenido en sales, movilizadas por capilaridad y que quedaron atrapadas entre los cantos, desarrollándose una costra salina superficial de espesor variable desde 2 a 150 cm, alcanzado mayor espesor en las áreas de ladera por acumulación (Figura 28).



Figura 27: Pavimento desértico ubicado al Este del área de estudio. Debido a la escasa actividad eólica no hay presencia de dunas.



Figura 28: Imágenes que muestran la presencia en el área de estudio de costras salinas de variados espesores, 2 a 150 cm.

.- **Dunas:** Son depósitos de arena que resultan de la sedimentación de partículas transportadas por el viento y en caso de la ciudad de Yauca, están presentes en el margen este del valle. Estas arenas tienen su origen en las zonas de playa y son transportadas por el viento en dirección S45°E. En la zona existe gran número de dunas tipo Barcan; es decir, dunas aisladas en forma de media luna (Figura 29), cuya característica principal es que su cresta es perpendicular a la dirección del flujo de arena y sus cuernos apuntan en el sentido de la dirección del viento. Las laderas de barlovento de las dunas son convexas y de menor pendiente que las de sotavento, estas se han desarrollado sobre pavimentos desérticos y se encuentran en toda la zona Este del área de estudio.



Figura 29: Las dunas tipo Barcan se han formado por el accionar de vientos que avanzan en dirección SE-NO. En algunas zonas de observa la presencia de varias dunas y depósitos de arena en forma de mantos de poco espesor con desarrollo de ripples que cubren la superficie.

9.1.1.4.- Origen erosional

Los principales agentes que intervienen en este tipo de modelado son las corrientes de aguas superficiales (escorrentía). En la zona de estudio se han observado áreas en las que los materiales han sido erosionados y desprendidos de las laderas.

.- Colinas: Son zonas con paredes verticales a subverticales que no superan los 30° de pendiente y que a lo largo de su conformación exponen planos de estratificación horizontal. Hacia el Este del área urbana se encuentran cubiertos por mantos de arenas que se deslizan (Figura 30), mientras que, en la zona urbana de Yauca se han depositado gravas redondeadas y clastos acompañados de caliches con arenas de grano grueso.



Figura 30: Vista hacia el Este del área urbana de la ciudad de Yauca. Observese la presencia de mantos eólicos cubriendo paredes casi verticales correspondientes a los escarpes.

9.2.- Geología

La geología es la ciencia que se encarga del estudio de la tierra teniendo en cuenta aspectos como: origen, estructura, composición, evolución, así como los distintos procesos internos y externos que se desarrollan en ella a través del tiempo. Para la comprensión de dichos procesos es necesario la interacción de la geología con otras disciplinas como:

Geología histórica: Se encarga del estudio de los distintos procesos por los que ha pasado el planeta Tierra, desde su origen hasta la actualidad, para ello se creó una división cronológica conocida como la escala del tiempo geológico que se subdivide en: eras, períodos, edades, etc.

Geología estructural: Se encarga del estudio del comportamiento de la corteza terrestre ante la acción de los diversos esfuerzos tectónicos que generan diversidad de estructuras geológicas tales como: pliegues, fallas, estratificaciones, entre otros.

Además, existen otras disciplinas como la vulcanología, geomorfología, geodinámica y geotecnia, encargadas del estudio de las rocas para la extracción de depósitos de minerales, hidrocarburos, aguas subterráneas, entre otros.

Por otro lado, el campo de aplicación de la geología es muy variado; sin embargo, en el presente estudio se hace incidencia en el reconocimiento de las propiedades físicas de las rocas y suelos sobre los cuales se asientan las áreas urbanas. Las distintas estructuras que se presentan en sus alrededores, las geoformas existentes y los eventos geodinámicos internos y externos, a fin de determinar el comportamiento del terreno ante la presencia de los distintos procesos geológicos que puedan suscitarse.

Para el estudio geológico de la ciudad de Yauca, se hace 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). Se debe describir las principales unidades litológicas aflorantes y sus características más resaltantes; información importante para cualquier estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica.

9.2.1- Geología Regional

Las unidades litológicas presentes de la ciudad de Yauca son principalmente de origen sedimentario y correspondiente a la edad Terciaria y Cuaternaria. El Terciario es representado por materiales Miocenos de la Formación Pisco, caracterizada por sedimentación de ambiente marino. Los materiales del

Cuaternario son de edad Pleistocena inferior, época en la que comenzaron a depositarse geoformas correspondientes a terrazas marinas debido al desarrollo de depósitos eólicos y aluviales. Estos materiales cuaternarios cubren el mayor porcentaje de la superficie del área de estudio (70% del total de su superficie).

Durante el Mioceno superior se produjeron esfuerzos tensionales que culminaron en movimientos extensivos, con la correspondiente invasión del mar en las zonas costeras. El resultado de estos eventos fue el depósito de materiales marinos conformando la Formación Pisco con materiales piroclásticos provenientes del intenso vulcanismo que se desarrollaba al mismo tiempo en la región cordillerana. La sedimentación empezó con la acumulación en ambientes playeros, cambiando gradualmente a condiciones de aguas poco profundas para dar como resultado alternancias de sedimentos marinos con cenizas y tufos redepositados.

Durante el Plioceno, la transgresión se extiende hacia la Cordillera de los Andes, para luego producirse el levantamiento del bloque andino ocasionando la formación de intensos fallamientos en el borde continental e involucrando movimientos diferenciales, entre los bloques de fallas y el hundimiento de esta zona costera. La zona de estudio se situaría en un bloque de falla limitado al Este por el sistema de fallas de Tanaka-Yauca, que sufrió hundimiento respecto al bloque de Tanaka, situado más al Este (Macharé et al. 1997). Más tarde se inicia la regresión y se produce el basculamiento del frente andino hacia el Oeste. Asimismo, en el Pleistoceno ocurren nuevos levantamientos y continúa la regresión iniciada en el Plioceno produciendo el desarrollo de terrazas marinas. Estos rasgos geomorfológicos son disectados por la erosión de los ríos de la costa, cuyo poder erosivo se ve aumentado por los efectos de la glaciación en la región cordillerana. Sobre esta geomorfología se acumularon dunas, cubiertas eólicas y depósitos aluviales. Además la acción eólica fue modificando incipientemente el relieve durante el Holoceno hace 2.5 millones de años hasta la actualidad.

9.2.2- Geología Local

Para la elaboración del mapa geológico local se ha considerado la recopilación de la información publicada por INGEMMET (Caldas, 1998), mapas geológicos y estudios neotectónicos. Posteriormente, en campo se realizó el reconocimiento y delimitación de las principales unidades geológicas aflorantes. Finalmente, se

obtiene el mapa geológico a escala 1:10000 (Figura 31) y su información ha permitido identificar las siguientes unidades geológicas:

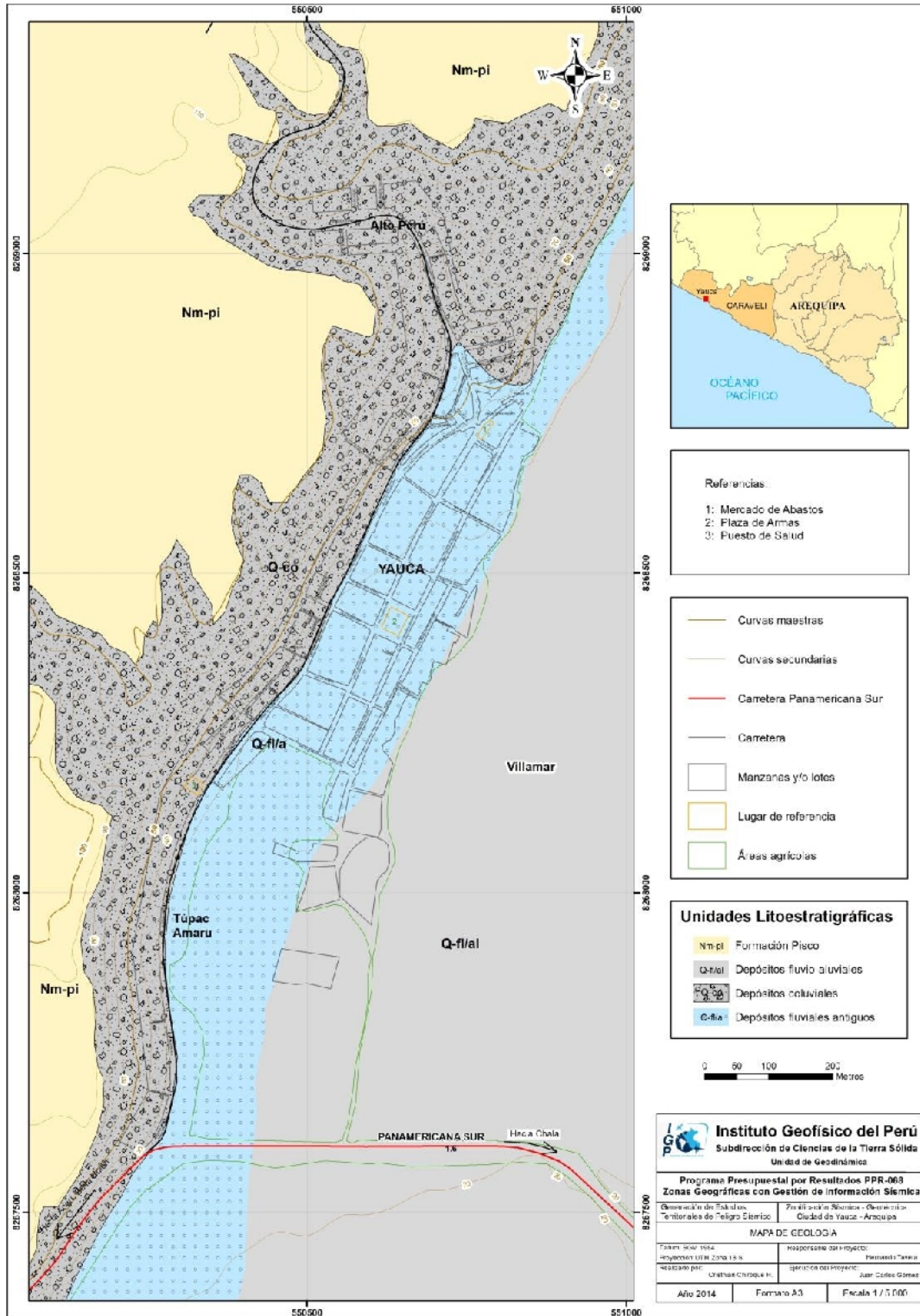


Figura 31: Mapa geológico local de la ciudad de Yauca y alrededores

.- Formación Pisco (Nm-pi): En la zona de estudio, se distingue en varios cortes naturales, los miembros estratigráficos correspondientes a la formación Pisco, de la cual aflora en planta la sección miembro superior con las siguientes características (Figura 32):

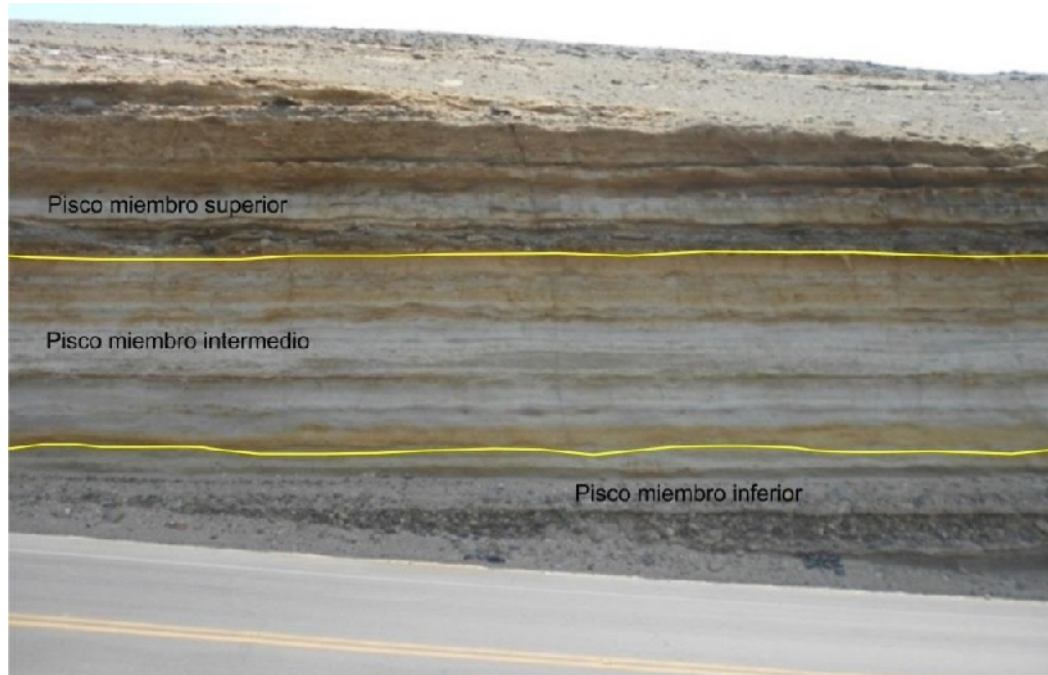


Figura 32: Aspectos que presentan los materiales de la formación Pisco en el corte ubicado en la Panamericana Sur con cruce con la ciudad de Yauca.

Pisco miembro superior: Se compone de capas delgadas con intercalaciones sedimentarias consistentes de areniscas margozas cubiertas por sales y carbonatos denominados caliches. En la formación aparecen intercalaciones de arcillas bentónicas que se rompen levantando los horizontes de areniscas suprayacentes. Su formación se produce por la probable acción de estructuras diapíricas (Figura 33).

Los conglomerados están conformados por cantos heterogéneos redondeados de 20 a 40 cm. de tamaño medio, y se disponen en estratos de tamaño decimétrico. La matriz consiste de arena de grano fino a medio y fragmentos de conchas calcáreas. Las formaciones presentes a lo largo de varios cortes tienen una estructura granosostenida en la parte baja inferior de la secuencia y sostenidos por la matriz, en la parte alta. Asimismo, están presentes otros estratos de conglomerados con matriz arenosa de espesor métrico.



Figura 33: Estructura de escape de fluidos desarrollada en arcilla.

Los tufos y cenizas volcánicas se disponen en capas de espesor decimétrico, son de color blanco y están retrabajadas mostrando estructuras cabalgantes (Figura 34) y morfologías en forma “de olas” (Figura 35) con consistencia frágil. (Areniscas tufáceas blancas). En los niveles superiores aparecen intercalados niveles conchíferos bastante triturados por el oleaje, en una matriz arenosa muy bien cementada por soluciones calcáreas de hasta 30 cm de espesor.



Figura xx: Morfología retrabajadas en capas de cenizas volcánicas y niveles conchíferos en una matriz calcárea muy bien cementada.



Figura 35: Estructuras cabalgantes en capas de cenizas volcánicas.

Depósitos Cuaternarios: estos depósitos pueden ser fluvio-aluviales, fluviales, eólicos, coluviales y fluviales antiguos con las siguientes características:

Depósitos fluvio-aluviales (Qh-fl/al): Consisten en conglomerados de cantos heterogéneos, redondeados y subredondeados, con matriz areno-limosa (Figura 36). Estos conforman depósitos acumulados por inundación en el fondo del valle del río Yauca, ocupando los espacios denudados de las terrazas marinas. Sobre gran parte de estos materiales se ha desarrollado actividad agrícola.



Figura 36: En la ciudad de Yauca, los materiales fluvio-aluviales conforman el mayor porcentaje de zonas destinadas a cultivos.

Depósitos fluviales (Qh-fl): Conformados por gravas redondeadas, con presencia de bancos de arena (Figura 37). Son depósitos que han sido transportados y depositados por el río Yauca, por lo que se encuentran distribuidos a lo largo del cauce del mismo.

Depósitos eólicos (Qh-e): Están constituidos por arenas de grano fino y medio, que han sido transportados y depositados por la acción del viento (Figura 38). Se observan cubriendo las áreas elevadas al Este de la zona de estudio, y al sur, invadiendo el valle de Yauca.



Figura 37: Depósitos fluviales conformados por gravas y arenas en el cauce del río.



Figura 38: Depósitos eólicos conformados por arenas de grano medio a fino cubriendo los pavimentos desérticos.

Depósitos eólicos (Qh-co): Son materiales que se encuentran distribuidos en los escarpes de las terrazas limitando con las terrazas de la Formación Pisco. Los depósitos son producto de la erosión y acción de la gravedad, siendo los principales agentes que intervienen, el agua y el viento, Los materiales están conformados por gravas redondeadas con arenas de grano grueso, Figura 39.

Depósitos fluviales antiguos: La zona urbana de Yauca se asienta sobre depósitos fluviales antiguos, formados por la depositación de materiales transportados por el río Yauca. Los levantamientos de la cuenca producto de la orogenia andina y las fallas, aumentaron el poder erosivo del río. Sobre estos depósitos no se evidencia el desarrollo de procesos geodinámicos activos.

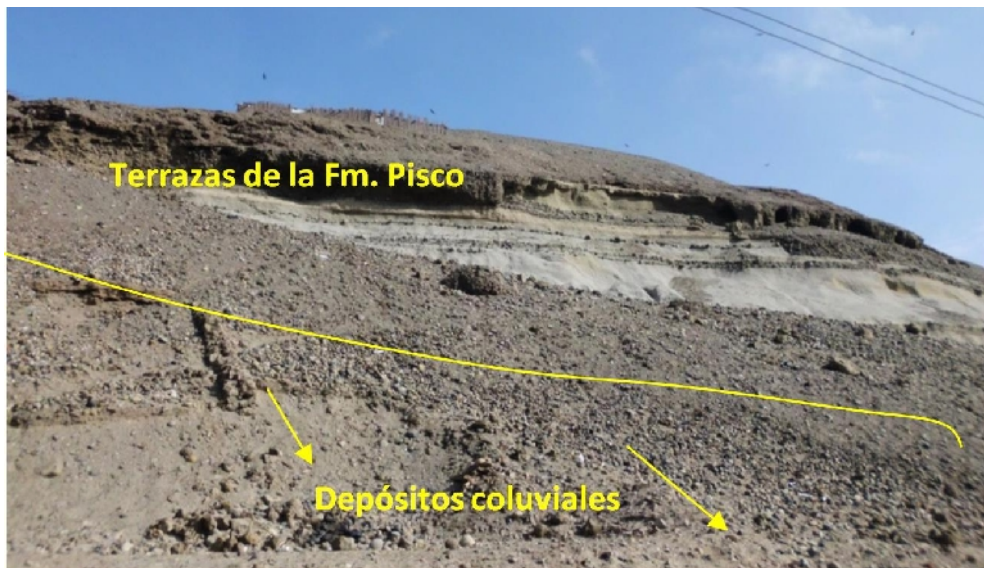


Figura 39: Materiales como gravas, arenas y limos se encuentran formando conglomerados. Los agentes de meteorización degradan y erosionan estos materiales para luego depositarse en las laderas.

9.2.3- Geología Estructural

La formación Pisco se sitúa debajo de las terrazas marinas que afloran en los cortes de la carretera Panamericana Sur, cerca de la ciudad de Yauca y en las vertientes generadas por la erosión fluvial del río. La formación se dispone en capas horizontales que son afectadas por una traza de falla normal que se orienta en dirección NO-SE (Figura 40), con desplazamientos de 1.5 metros, fácilmente visible en la margen izquierda del río, hacia el extremo norte de la ciudad de Yauca.

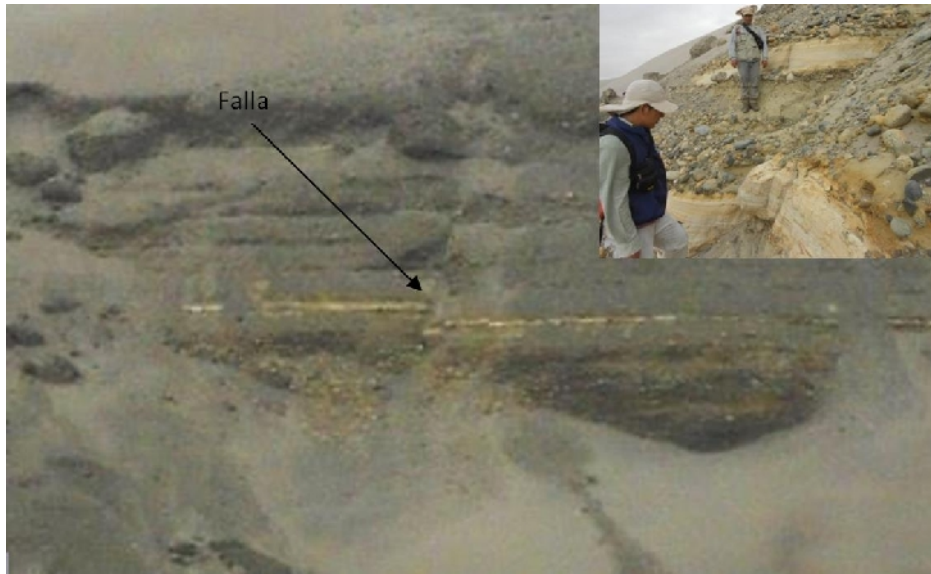


Figura 40: Traza de falla afectando a los materiales de la Formación Pisco. Extremo Este de la ciudad.

9.3.- Geodinámica

La geodinámica abarca el estudio de los procesos y cambios físicos que ocurren constantemente sobre la superficie de la Tierra. Estas transformaciones son posibles debido a la intervención de agentes internos y externos que crean, forman, degradan y modelan la superficie terrestre. Esta rama de la geología se subdivide en:

.- Geodinámica Interna: *El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la interacción de las placas Sudamericana y Nazca, escenario considerado como la primera fuente sismogénica en el Perú debido a la frecuencia de sismos y por dar origen a los eventos de mayor magnitud. La segunda fuente, la constituye la zona continental, cuya deformación ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores (Cahill et al, 1992; Tavera et al, 2001). Históricamente, la ocurrencia de sismos en la zona de estudio, se constituye como el principal detonante de eventos geodinámicos como los movimientos en masa, la caída de rocas y derrumbes.*

.- Geodinámica Externa: *La geodinámica externa estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra. En tal sentido, las precipitaciones pluviales son las de mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de los Movimientos en Masa (MM), como*

los deslizamientos, derrumbes y caída de rocas; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren este tipo de eventos.

Además, la presencia de “El Niño” ocasiona el incremento de la temperatura en la superficie del mar, provocando lluvias torrenciales con valores que sobrepasan los índices normales de precipitaciones en la costa; mientras que, en la sierra y en especial en el altiplano, las lluvias son escasas, presentándose estadios largos de sequías. Históricamente, las condiciones descritas en la costa centro y norte del territorio peruano son debidas a la presencia de “El Niño” y a otros factores relacionados con la actividad antrópica.

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 Yauca (Figura 41).

9.3.1.- Movimientos en Masa

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan laderas abajo, rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). Para proceder a la clasificación de los movimientos en masa en la ciudad de Yauca, se hace uso de las tablas propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988). Estas tablas tienen en cuenta el tipo de movimiento y el tipo de material. En cuanto al primero, se considera 5 clases: caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Dentro de los materiales se consideran: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras. El trabajo de campo realizado en la ciudad de Yauca y alrededores, ha permitido identificar procesos de caída de rocas y bloques (tipo de movimiento), siendo sus características las siguientes:

.- Caída de rocas y bloques: *Son eventos que involucran el desprendimiento de clastos y bloques de rocas que caen por efectos de la gravedad o por ocurrencia de movimientos sísmicos y lluvias extremas. En su caída, los materiales pueden aumentar o disminuir su velocidad y volumen. Al final sus dimensiones dependerán de la pendiente, el grado de intemperismo y diaclasamiento de las rocas. En el extremo sur de la ciudad se encuentra el AA.HH Alto Túpac, próximo a taludes inestables que presentan desprendimientos de rocas (Figuras 42 y 43) y que incrementan el riesgo. Del mismo modo, en muchos taludes*

inestables se observa la presencia de viviendas que aumentan la carga sobre ellos, situación que favorece la ocurrencia de movimientos en masa, Figura 44.

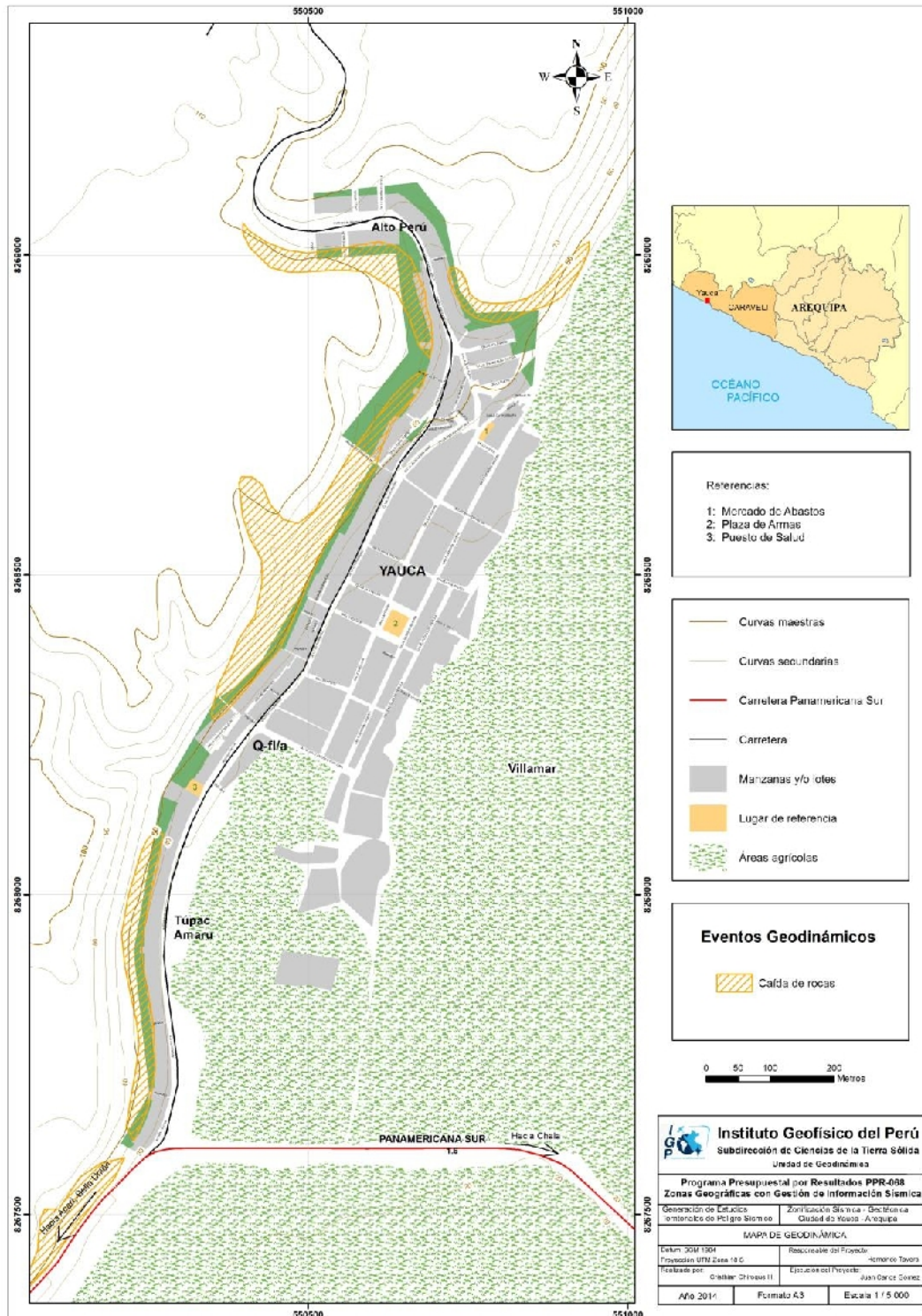


Figura 41: Mapa de geodinámica para la ciudad de Yauca y Alrededores.

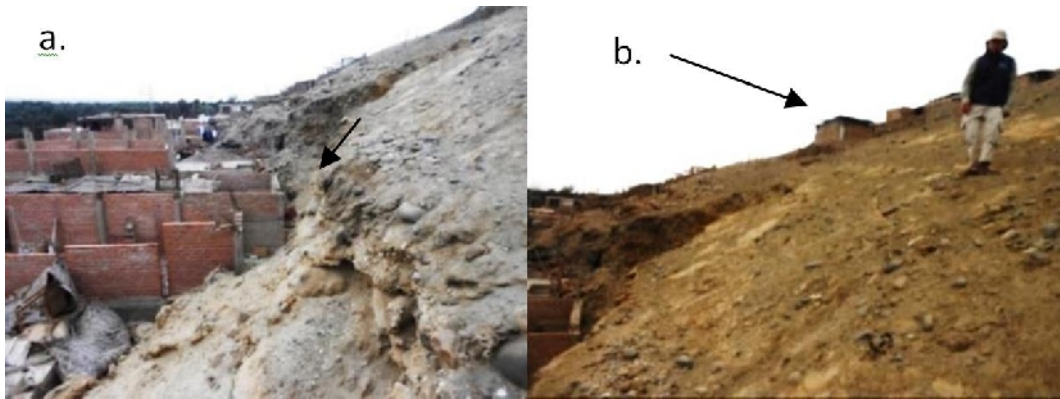


Figura 42: Laderas en los AAHH Túpac Amaru (a) y Alto Tupac (b), este último se ha establecido recientemente sobre materiales inestables.



Figura 43: Escombros vertidos sobre las viviendas ubicadas en la parte baja del AAHH Alto Túpac. En las laderas se puede observar la presencia de grietas de hasta 5 cm de ancho.



Figura 44: Viviendas autoconstruidas sobre el talud inestable, AAHH Alto Túpac.

Por otro lado, en la zona de estudio se observa que el factor antrópico incrementara el peligro frente a los movimientos de masa, esto debido a que las viviendas no tienen servicios básicos, lo que propicia por parte de la población el arrojado de aguas servidas que finalmente se filtran al subsuelo desestabilizando a los materiales. En estas condiciones, las áreas involucradas se constituyen como altamente susceptibles a colapsar ante la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud.

9.3.2.- Procesos eólicos

Los principales procesos eólicos identificados en la ciudad de Yauca son:

.- Migración de arenas, Vientos Paracas (VP): En la zona de estudio se han registrado la presencia de vientos que circulan en dos direcciones: SSE y NNO, ambas relacionadas a los denominados “Vientos Paracas”. Esta fenomenología es un factor determinante en la dinámica eólica presente en la ciudad de Yauca. El estudio realizado por Escobar (1993), refiere que los Vientos Paracas (VP) corresponden a tormentas de arena y polvo que se inician en Tanaka (Arequipa) hasta Pisco en Ica. La máxima ocurrencia de vientos se da entre los meses de julio y setiembre, siendo sus velocidades superficiales de 17 m/s aproximadamente (Figura 45).



Figura 45: Migración de arenas que forman dunas sobre el pavimento desértico de la ciudad de Yauca ubicado al Este del área urbana.

En general, los factores locales como la topografía (cerros) y su interacción con el viento en superficie (Dale, 1990), generan una intensificación local del viento a sotavento (a favor del viento), en cambio en las zonas con topografía más elevada se produce la reducción relativa a barlovento (opuesto a la dirección del viento). Además, la ocurrencia de los VP está relacionada a la cantidad de radiación que llega a la superficie debido a la ausencia de nubosidad.

10.- GEOTÉCNIA

Los estudios geotécnicos tienen por finalidad analizar y cuantificar las características físicas de los suelos, siendo su comportamiento relevante al momento de utilizarlo como elemento de medida para el soporte de una estructura determinada (cimentaciones). Para el estudio de los suelos en la ciudad de Yauca se recolectó información según las siguientes técnicas:

- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Yauca se construyeron 7 calicatas (Tabla 2 y Figura 46), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.2 metros y la mínima de 1.5 metros (ver Anexos). La profundidad varía porque en algunos suelos se encontró materiales muy compactos y difíciles de escavar como bloques y caliches.

Tabla 2: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	Cota (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
AYA-01	550858	8268807	35	2.40
AYA-02	550651	8269060	74	2.90
AYA-03	550621	8267917	24	3.20
AYA-04	550637	8268662	39	2.80
AYA-05	550416	8268225	28	2.80
AYA-06	550351	8267612	24	2.60
AYA-07	550562	8268174	25	1.50

- 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. Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 3 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación.

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 7 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 4), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 2.55 metros y la mínima de 0.1 metros (ver Anexos). Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares

donde no existe información geotécnica a fin de tener mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Yauca.

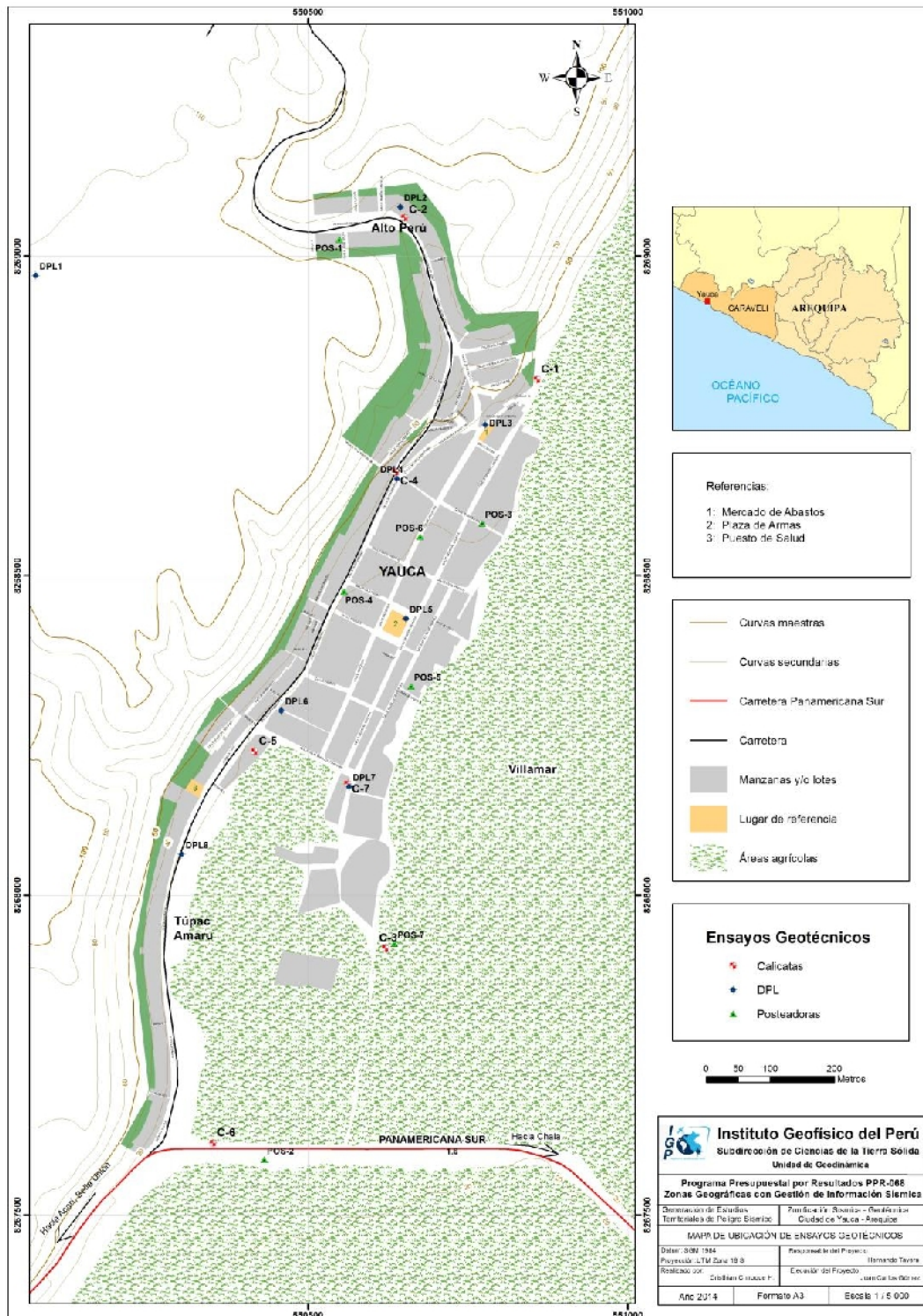


Figura 43: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Yauca

Tabla 3: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Bella Unión

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
AYA-01	2.10	1.98	1.95
AYA-02	2.70	2.12	1.96
AYA-03	1.50	1.65	1.95
AYA-04	2.80	1.60	1.84
AYA-05	2.60	1.50	1.95
AYA-06	2.60	1.71	1.95
AYA-07	2.00	1.69	1.95

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en la ciudad de Bella Unión

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
POS-01	550549	8269026	85	0.30
POS-02	550431	8267586	20	2.50
POS-03	550772	8268582	30	0.10
POS-04	550556	8268475	30	0.70
POS-05	550661	8268327	25	0.40
POS-06	550675	8268561	30	1.30
POS-07	550635	8267924	23	2.55

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 8 puntos dentro de la ciudad de Yauca (Tabla 5). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 3.38 metros y mínima de 0.07 metros debido a que los suelos están conformados por gravas intercaladas con arenas que presentan ángulos de fricción promedio de 29° a 37°, característico de suelos compactos (ver Anexos).

- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D3080): Para conocer la resistencia de los suelos al corte, las muestras de suelo recolectadas en campo se enviaron al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 6. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Yauca presentan cohesión por debajo de 0.30 km/cm²; mientras que, los ángulos de fricción interna superan los 37°, propios de suelos granulares como las arenas y las gravas.

Tabla 5: Coordenadas UTM para la ubicación y profundidad de los ensayos de dinámica ligera

DPL	UBICACIÓN			PROFUNDIDAD (m)
	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	
DPL-01	550074	8268970	109	0.07
DPL-02	550644	8269077	80	0.98
DPL-03	550777	8268736	39	3.38
DPL-04	550639	8268652	39	2.00
DPL-05	550653	8268433	29	0.50
DPL-06	550458	8268289	30	1.50
DPL-07	550564	8268170	25	0.17
DPL-08	550302	8268064	30	0.26

Tabla 6: Valores obtenidos para el ensayo de corte directo en la ciudad de Yauca

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Kg/cm ²)	Densidad húmeda (tn/m ³)	Densidad seca (tn/m ³)	Humedad %
AYA-01	37.10	0.00	1.91	-	4.80
AYA-02	29.30	0.10	-	1.70	3.10
AYA-03	29.20	0.10	-	1.69	14.50
AYA-04	29.50	0.10	-	1.71	2.80
AYA-05	27.50	0.10	-	1.70	4.50
AYA-06	25.60	0.30	-	1.66	7.20
AYA-07	36.99	0.00	1.94	-	2.80

10.1.- 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 Yauca, 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 (Tabla 7). La clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 8 y los resultados de muestran en la Figura 47.

Según estos resultados, gran parte de la ciudad de Yauca se asienta sobre suelos con capacidad portante baja (1 y 2 kg/cm²). En los puntos en donde se realizaron las calicatas 1 y 7, los suelos presentan capacidad de carga admisible alta y (4.4 kg/cm²).

Tabla 7: Capacidad de carga admisible en los suelos de la ciudad de Yauca.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
AYA-01	175.98	4.40
AYA-02	53.88	1.80
AYA-03	37.23	1.24
AYA-04	56.36	1.88
AYA-05	48.10	1.60
AYA-06	43.51	1.45
AYA-07	175.90	4.40

Tabla 8: Rangos establecidos para la capacidad portante en la ciudad de Yauca

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm ²)	DENOMINACION
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

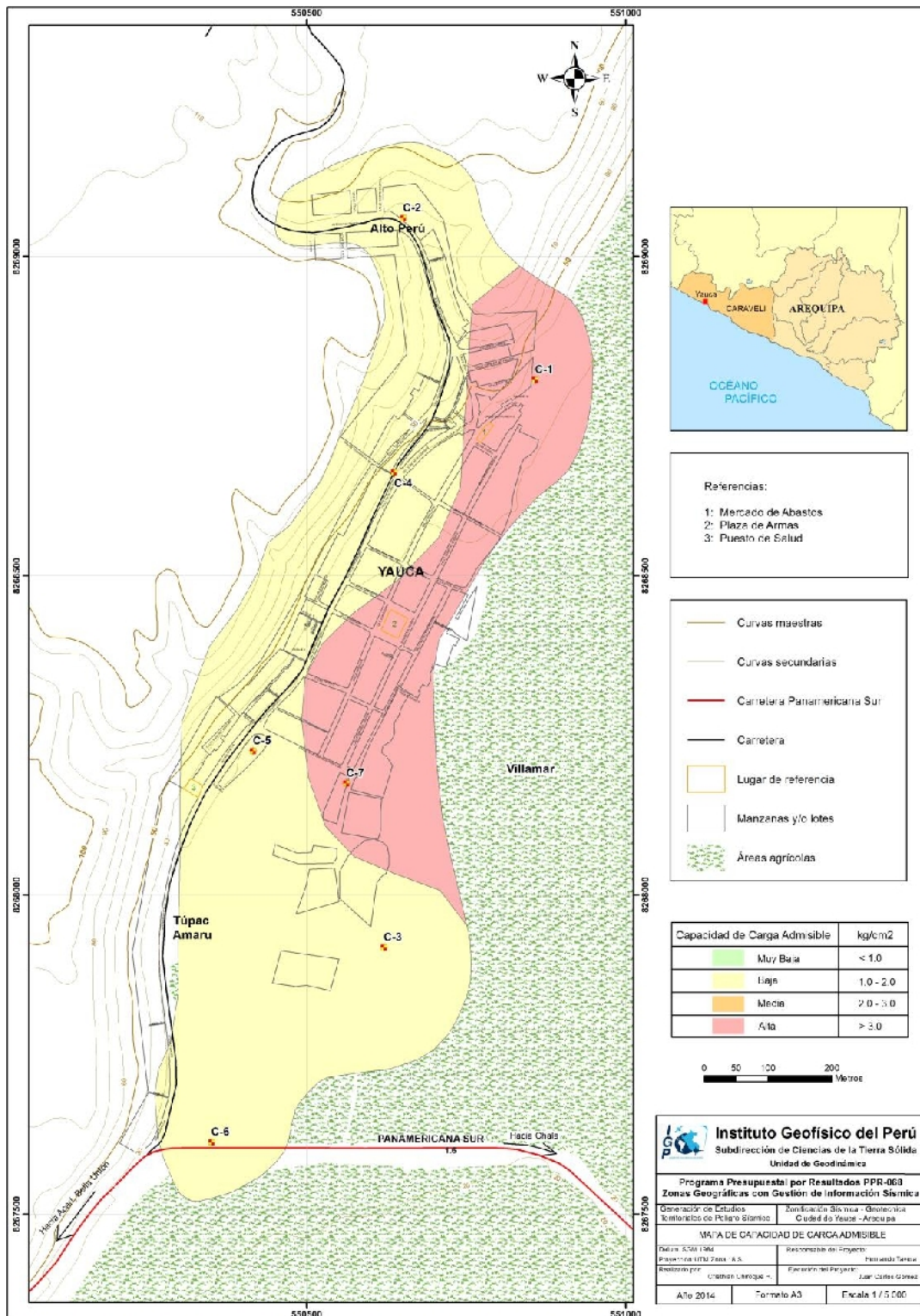


Figura 47: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Yauca

10.2.- 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 realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Yauca. Se ha identificado la existencia de 4 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 48):

***- Suelos tipo GW:** Este tipo de suelo está conformado por arenas finas con gravas y contenido de humedad entre 3 y 4.5 %, aunque en la calicata 3 se ha registrado el mayor porcentaje (14.50%). Debido a su permeabilidad media a baja, son suelos con escasa compacidad y baja o nula plasticidad. Su capacidad de carga es menor a 1.80 Kg/cm². Este tipo de suelos abarcan el 25% del área de estudio, fueron identificados en las calicatas 2, 3 y 5, o sea en los sectores Media Luna, Hda. Jemoro Preto y Plataforma deportiva respectivamente.*

***- Suelos tipo GP:** Estos suelos están conformados por gravas arenosas mal gradadas, siendo su contenido de humedad de 2.80 %, con una permeabilidad de media a alta; es decir, suelos compactos. No presentan plasticidad y su capacidad de carga admisible es alta 4.40 Kg/cm². Los materiales granulares sobrepasan el 60% de su contenido en promedio; mientras que, los finos no superan el 38%. Estas gravas ocupan el 25 % de los suelos de la ciudad y se encuentran mayormente en el área urbana centro de Yauca (calicata 7).*

***- Suelos tipo GW:** Estos suelos están conformados por gravas arenosas bien gradadas con bajo porcentaje de limos, siendo su contenido de humedad alto, 4.80%. Su permeabilidad es media y se les considera como suelos de compacidad media. No presentan plasticidad y su capacidad de carga admisible es alta (4.4 Kg/cm²). Los suelos tienen gravas en más del 50%, arenas un 35% y finos en un 6%. Estas gravas ocupan el 20% de los suelos de la ciudad y han sido identificados a la salida de la ciudad de Yauca, calicata 1.*

***- Suelos tipo SM:** Estos suelos están conformados por arenas limosas, con bajos porcentajes de gravas, siendo su contenido de humedad de 2.80 a 7.20 %. Su permeabilidad es baja y por ello, son suelos de compacidad baja. Presentan plasticidad media a baja y su capacidad de carga admisible es baja (<1.88 Kg/cm²).*

Los suelos presentan hasta un 8% de gravas, arenas más del 80%. Los limos están presentes en casi el 100% de los suelos.

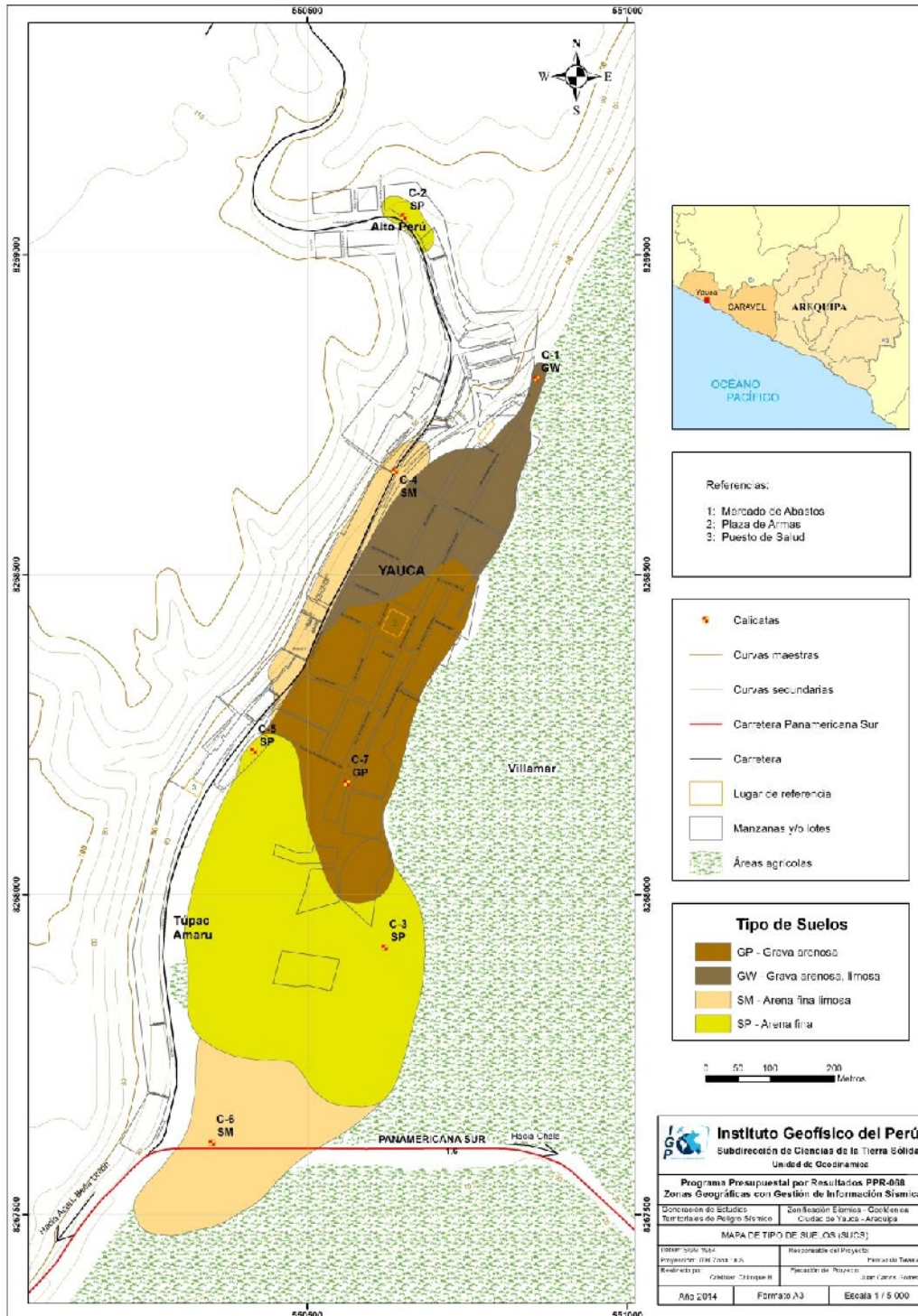


Figura 48: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Yauca

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos lineales (MASW) y tomografía eléctrica, todos tienen como principal 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 Yauca.

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Yauca, a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En la Figura 49 se muestra la distribución espacial de los 102 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

Esta información permite 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 50 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto YA-50. 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 a 1.8 Hz y 6.1 Hz con amplificaciones relativas de hasta 3.3 y 1.7 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 predominantemente en dirección norte-sur. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

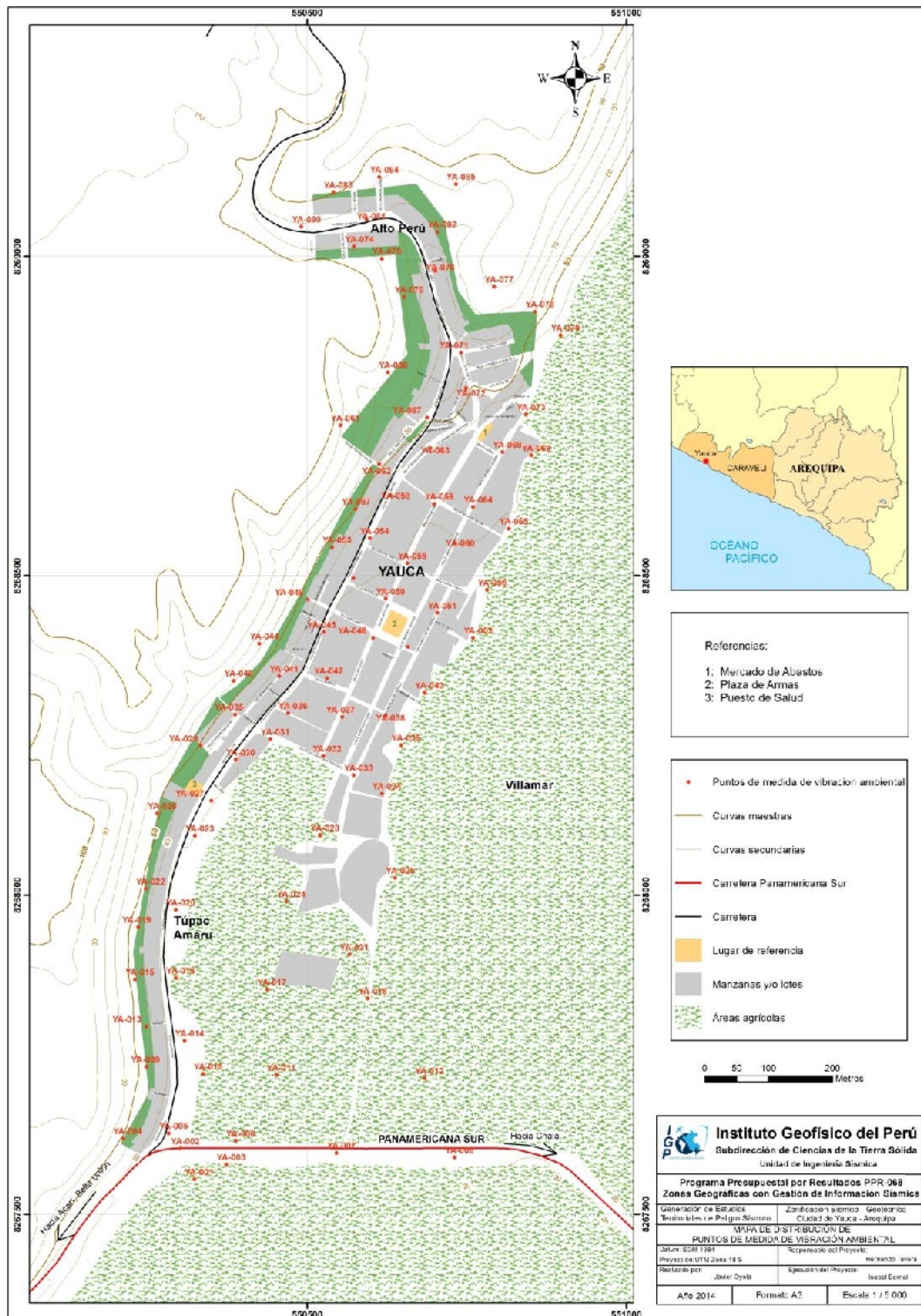


Figura 49: Mapa de la ciudad de Yauca y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

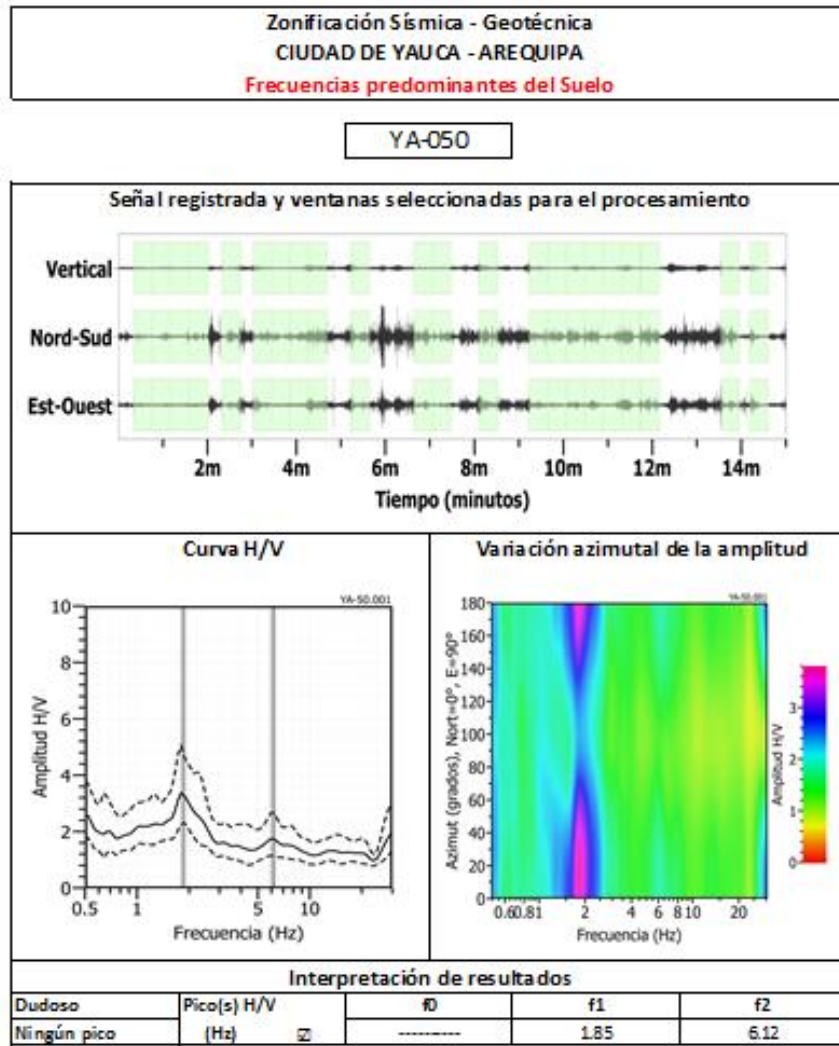


Figura 50: Ejemplo de la ficha H/V para el punto YA-50 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

- Distribución de frecuencias predominantes: A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados muestran zonas con valores similares para las frecuencias predominantes, evidenciando un comportamiento dinámico diferente entre dichas zonas.

En general, para el análisis de la información se debe considerar los siguientes aspectos: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de

depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (Bernal, 2006).

La información obtenida de las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis tres rangos de frecuencia: **F₀** ($F < 1.8$ Hz), **F₁** ($1.8 \text{ Hz} \geq F \leq 10.0$ Hz) y **F₂** ($F > 10.0$ Hz), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Yauca.

***- Frecuencias predominantes F₀:** Según la Figura 51, las frecuencias fluctúan entre 0.5 a 1.8 Hz y se encuentran presentes hacia el extremo Oeste de la ciudad de Yauca, concentrándose los valores más altos en los extremo NO y SO, sobre las áreas de mayor pendiente. En la Figura 52, se muestran ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos YA-19, YA-57 y YA-72, todos con dos picos de frecuencias, el primero a 1.4, 1.0 y 1.2 Hz correspondiente a **F₀** y un segundo pico alrededor de los 5.0 Hz (**F₁**), ambos con amplificaciones de hasta 2 veces. En este estudio, no se detallara la respuesta a la frecuencia **F₀** por considerar de mayor interés las frecuencias mayores de 2.0 Hz (menores a 0.5 segundos); principalmente por el efecto que pudieran causar a las actuales estructuras de la ciudad de Yauca.*

***- Frecuencias predominantes F₁:** La Figura 53 muestra que este rango de frecuencias se encuentran concentrados en dos áreas con valores similares, la primera, ubicada en el sector central de la ciudad de Yauca y hacia el extremo SE de la zona de estudio (campos de cultivo) con valores de 2.0 a 2.5 Hz y la segunda, ubicada en los extremos Norte y SO del área urbana de la ciudad de Yauca, con valores mayores a 4.0 Hz.*

En la Figura 54, se muestran ejemplos de razones espectrales característicos. Para la primera área se considera las razones espectrales obtenidas para los puntos YA-03, YA-14, YA-25, YA-48, YA-50 y YA-65, ubicados los tres primeros hacia el extremo Sur del área de estudio, sobre terrenos de cultivo y los tres últimos, hacia el centro de la ciudad, sobresaliendo frecuencias que fluctúan entre 1.9 a 2.2 Hz, con amplificaciones máximas relativas de hasta 3.5 veces. Para la segunda área se considera las razones espectrales obtenidas para los puntos YA-19, YA-57 y YA-72 con frecuencias a 5.9, 5.5 y 5.3 Hz, y amplificaciones de hasta 2 veces. En general, se observa que sobre el área

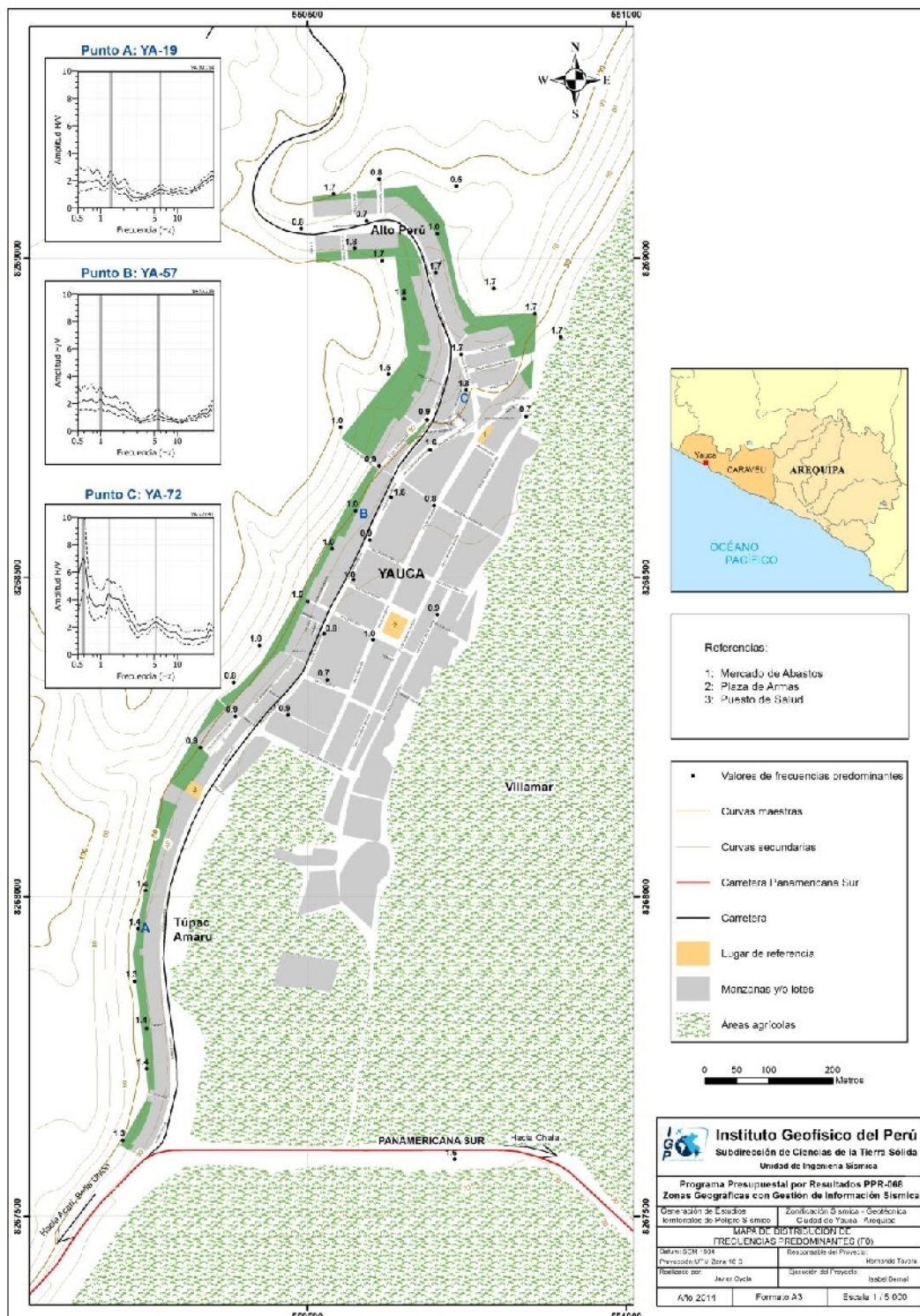
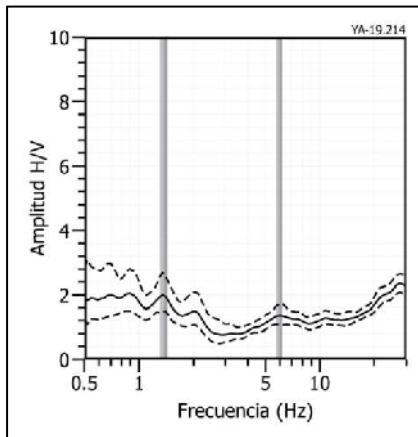
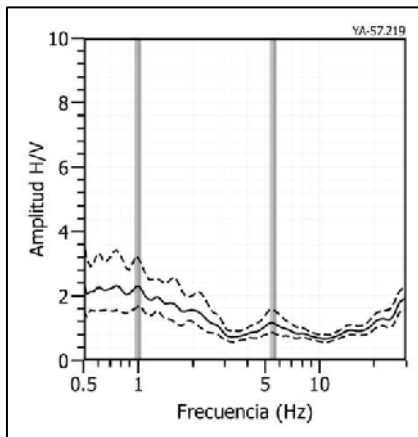


Figura 51: Mapa de la ciudad de Yauca y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_p ($F_p < 1.8.0$ Hz). Las letras corresponden a los puntos considerados como representativos para este rango de frecuencias.

YA - 19



YA - 57



YA - 72

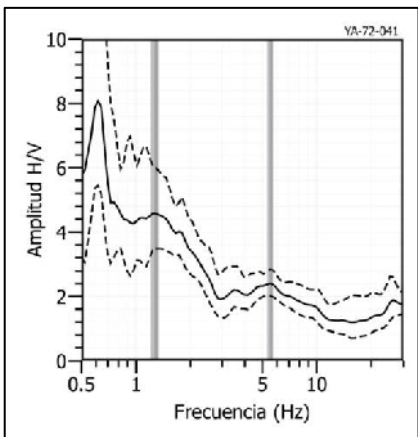


Figura 52: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 1.8$ Hz): puntos YA19, YA57 y YA-72, todos ubicados en el extremo NE de la ciudad de Yauca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

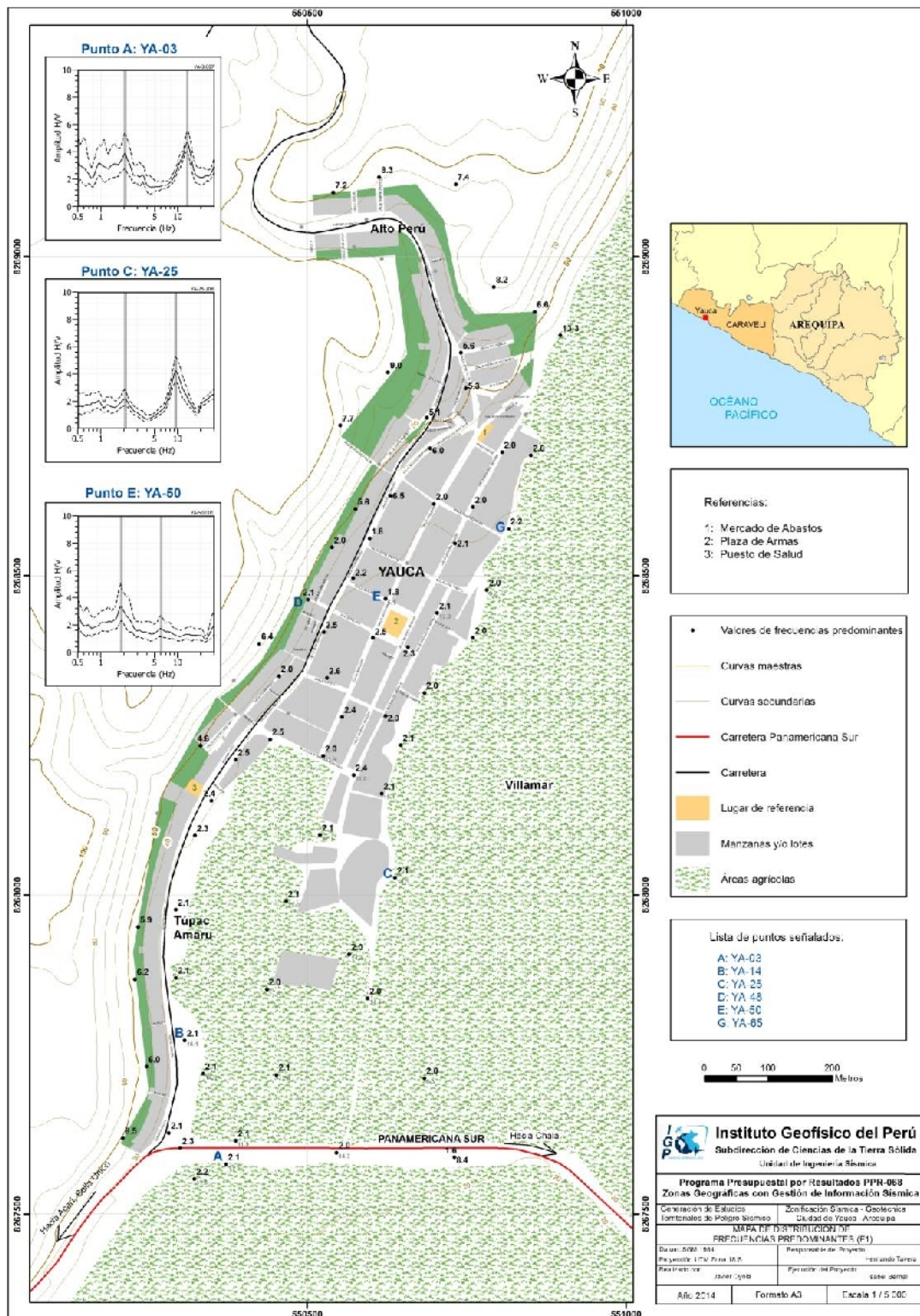
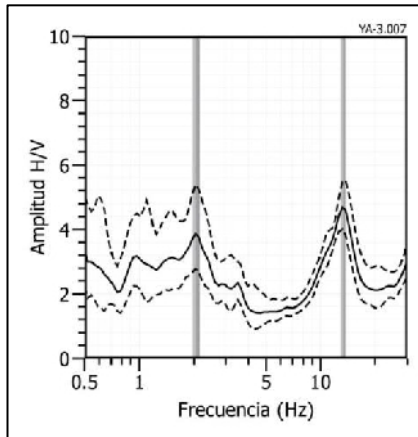
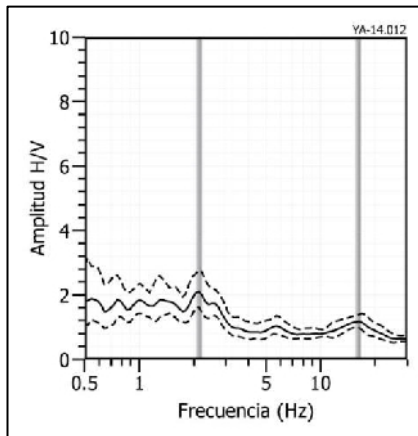


Figura 53: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 (1.8Hz≤F≤10Hz) y F2 (F>10 Hz), ambos diferenciados por el tamaño de los números. Las letras corresponden a puntos considerados como representativos para las diversas zonas y cuyos gráficos se presentan en la Figura 54.

YA - 03



YA - 14



YA - 25

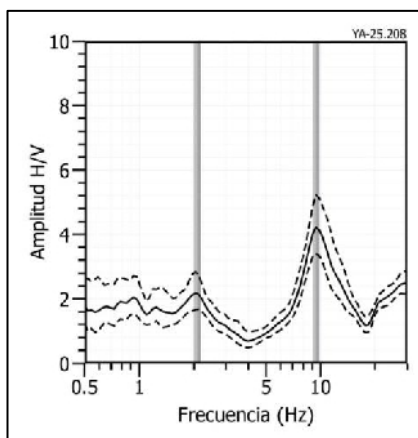
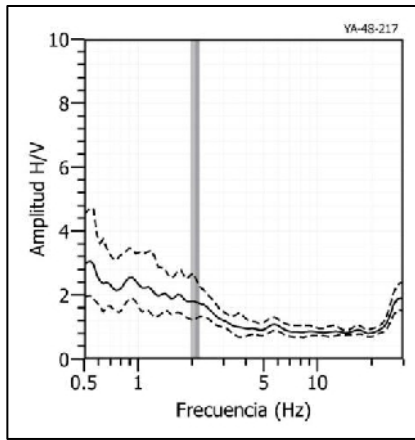
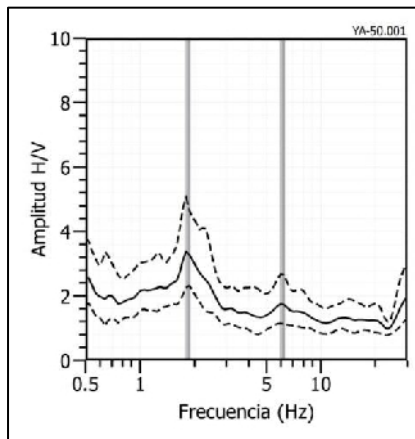


Figura 54: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango ($1.8\text{Hz} \geq F \leq 10\text{Hz}$) para los puntos YA-03, YA-14 y YA-25 ubicados en el extremo SE de la zona de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

YA - 48



YA - 50



YA - 65

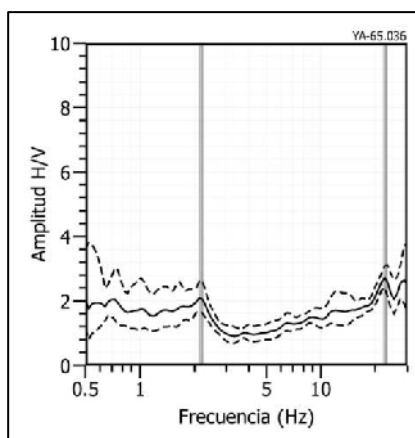


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango ($1.8\text{Hz} \leq F \leq 10\text{Hz}$) para los puntos YA-48, YA-50 y YA-65, todos ubicados en el sector central de la ciudad de Yauca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

céntrica y extremo norte de la ciudad, se presentan amplificaciones mínimas a diferencia de lo observado hacia los extremos Este y Sur, en donde las amplificaciones llegan hasta 4 veces en algunos puntos.

.- Frecuencias predominantes F2: Este rango de frecuencias se presenta principalmente en puntos ubicados hacia el extremo SE del área de estudio con valores que fluctúan entre 10 y 15 Hz, y amplificaciones de hasta 5 veces (Figura 53). Estos valores evidencian la presencia de suelos poco compactos.

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

La técnica MASW (Multichannel Analysis 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 (V_s) en el punto central de cada arreglo.

Para el registro de información se ha utilizado 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 110dB. 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 la Figura 55, se presenta el mapa de la ciudad de Yauca con la distribución espacial de 6 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-YA, ..., LR06-YA. 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 considera 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)

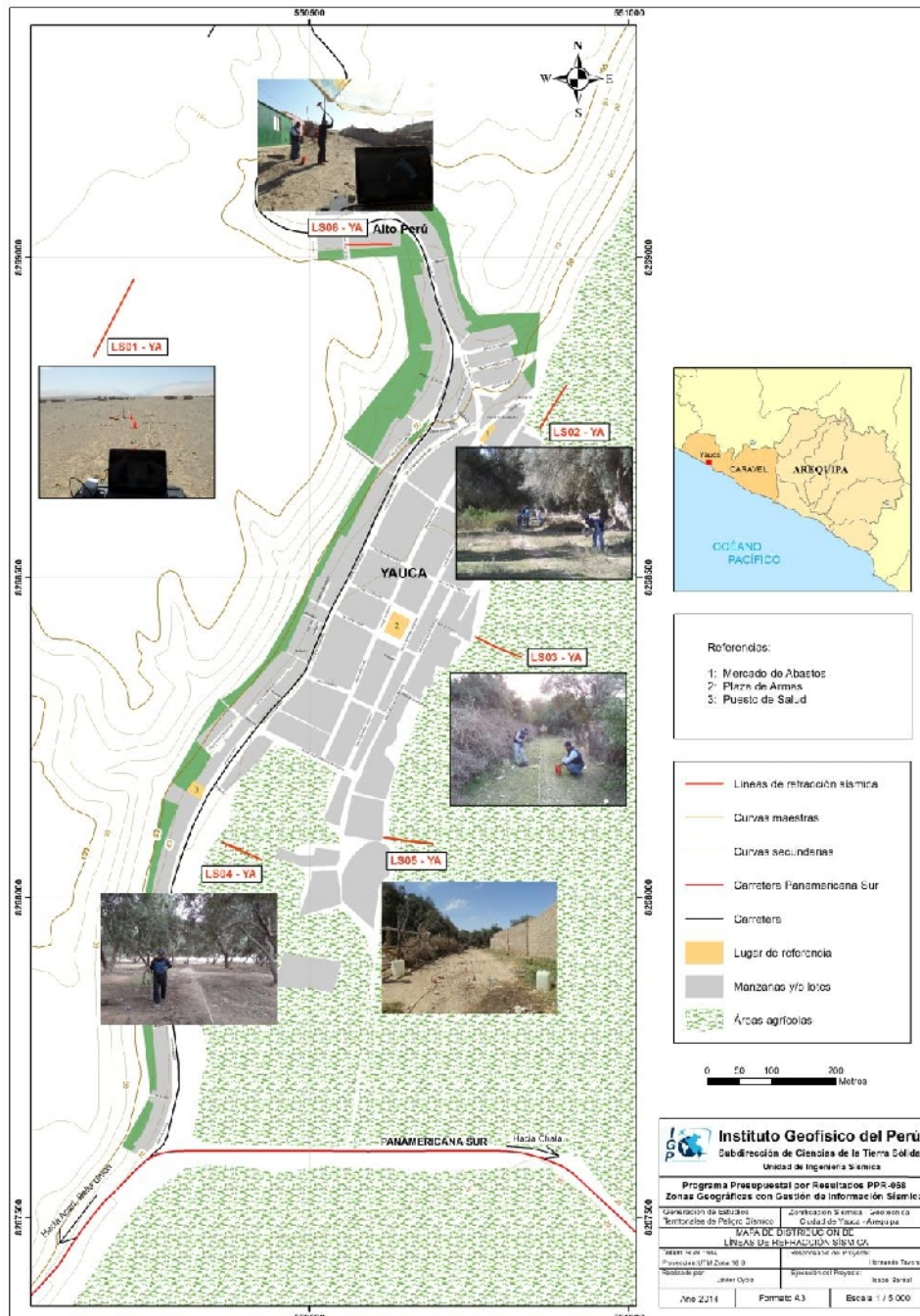


Figura 55: Mapa de la ciudad de Yauca y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-YA, ..., LR06-YA.

A continuación, se describe las características de cada uno de los perfiles sísmicos construidos para conocer la velocidad de las ondas de corte (V_s) en la ciudad de Yauca (Figura 56).

Arreglo Lineal LR01- YA: Este arreglo se realizó en el extremo NO del área de estudio, sobre la urbanización Villa el Sol a unos 400 metros de la estación satelital. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 3 metros y velocidades V_s de 490 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 43 metros y velocidades V_s de 520 m/s correspondientes a suelos muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 800 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 56a).

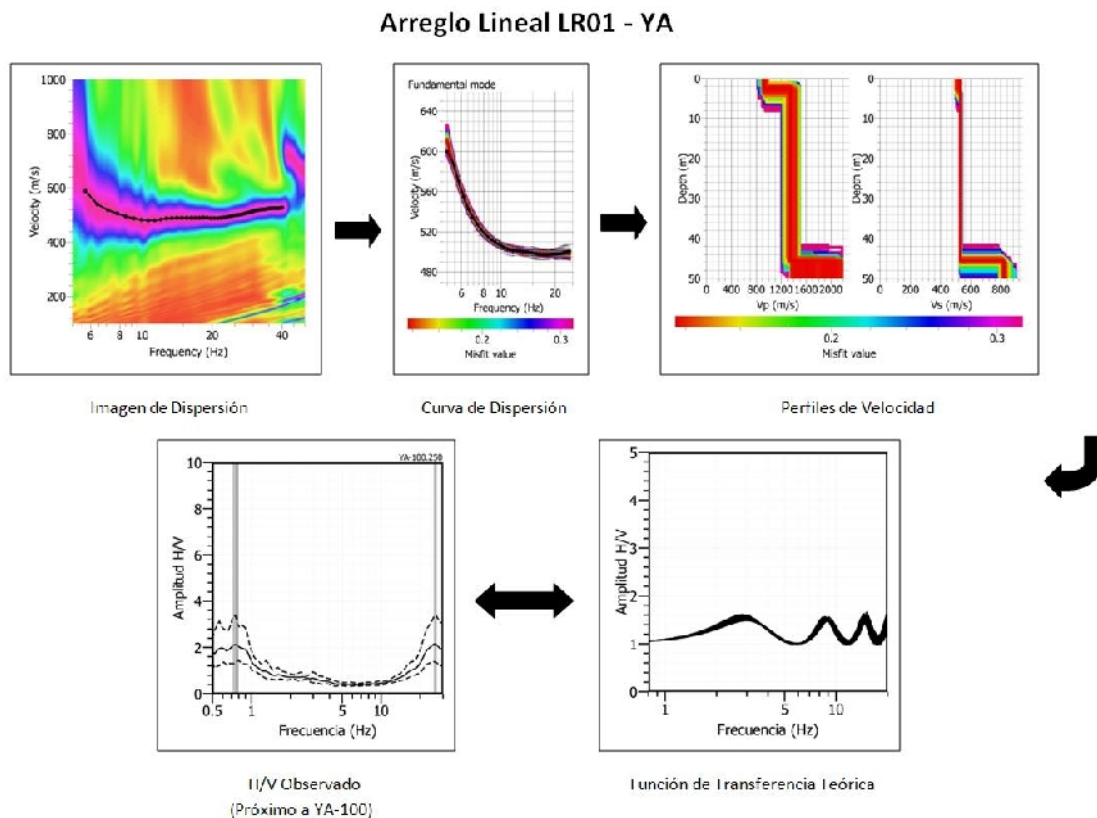


Figura 56a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR01 - YA.

Arreglo Lineal LR02- YA: El arreglo se realizó en el extremo NE de la zona de estudio, en medio de cultivos de olivo. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 2 metros y velocidades V_s de 130 m/s correspondiendo a suelos blandos. La segunda capa presenta un espesor de 8 metros con velocidades V_s de 220 m/s

correspondientes a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa presenta velocidades V_s de 800 m/s (Figura 56b).

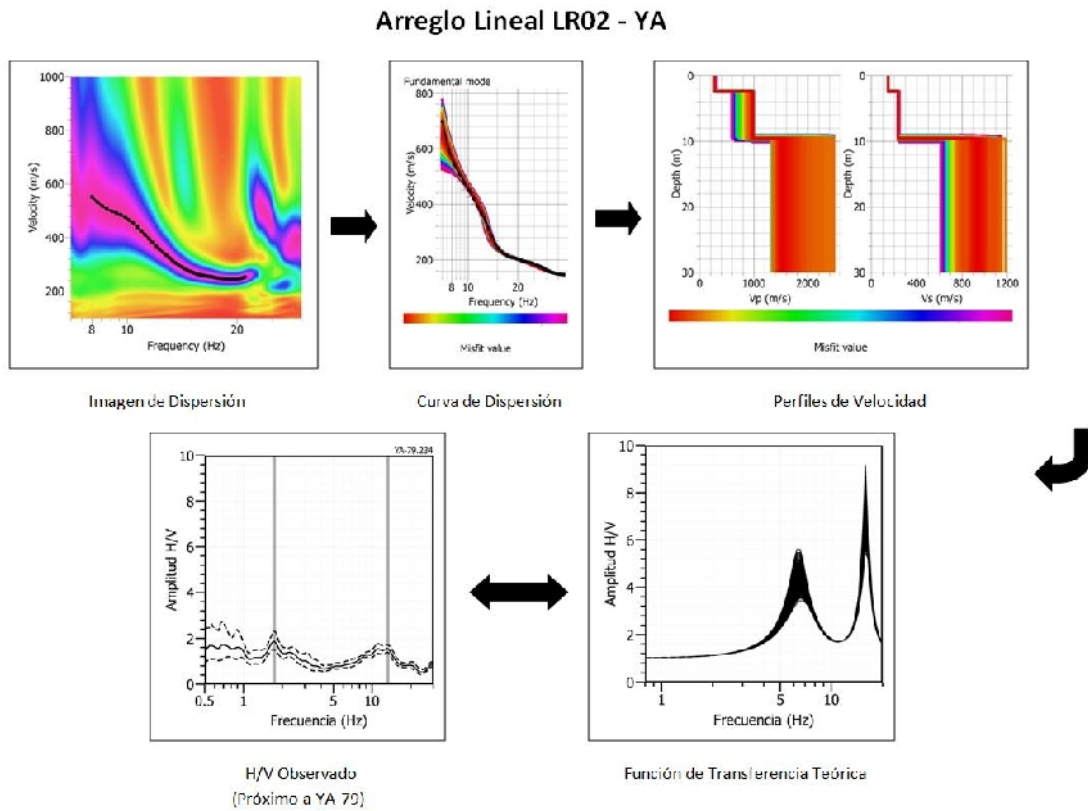


Figura 56b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR02 - YA.

Arreglo Lineal LR03- YA: El arreglo se realizó en el extremo Este de la zona de estudio, en medio de cultivos de olivo (próximo al coliseo de gallos de Yauca). Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 3 metros y velocidades V_s de 130 m/s correspondiendo a suelos blandos. La segunda capa presenta un espesor de 4 metros con velocidades V_s de 200 m/s correspondiente a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa presenta velocidades V_s de 600 m/s y corresponde a suelos muy duros (Figura 56c).

Arreglo Lineal LR04-YA: Este arreglo se realizó en el extremo SE de la zona de estudio, a unos 50 metros de la Posta de Yauca y en el medio de cultivos de olivo. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 6 metros y velocidades V_s de 260 m/s, y la segunda con un espesor de 18 metros y velocidades V_s de 380 m/s. Ambas velocidades de V_s sugieren la presencia de suelos duros. La interface con la

siguiente capa presenta velocidades V_s de 660 m/s correspondiendo a suelos muy duros (Figura 56d).

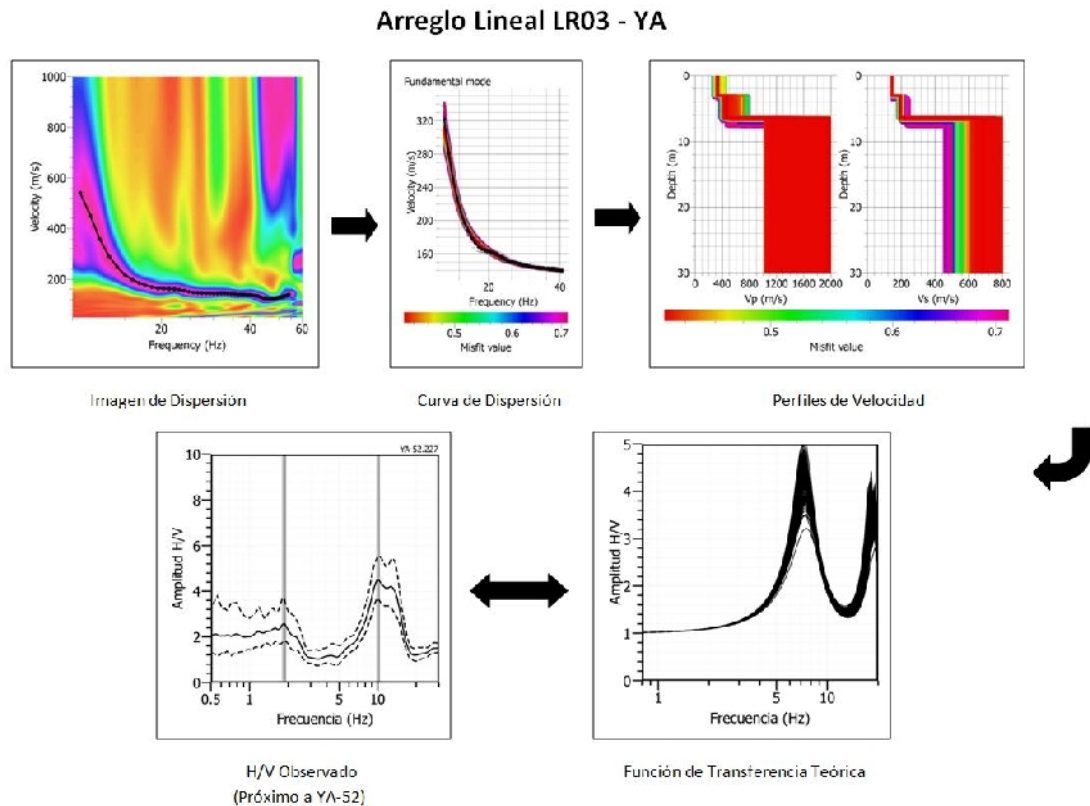


Figura 56c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR03 - YA.

Arreglos Lineales LR05- YA: El arreglo se realizó próximo al colegio San Pedro de Yauca en medio de cultivos de olivo. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 3 metros y velocidades V_s de 120 m/s correspondiendo a suelos blandos. La segunda capa presenta un espesor de 4 metros y velocidades V_s de 200 m/s correspondientes a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 810 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 56e).

Arreglos Lineales LR06- YA: El arreglo se realizó en el extremo NE de la zona de estudio, cerca al desvío de la carretera con destino a Bella Unión. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades V_s de 270 m/s, y la segunda capa presenta un espesor de 13 metros y velocidades V_s de 390 m/s; ambas velocidades de V_s sugieren la presencia de suelos duros. La interface con la

siguiente capa presenta velocidades V_s de 600 m/s que corresponde a suelos muy duros (Figura 56f).

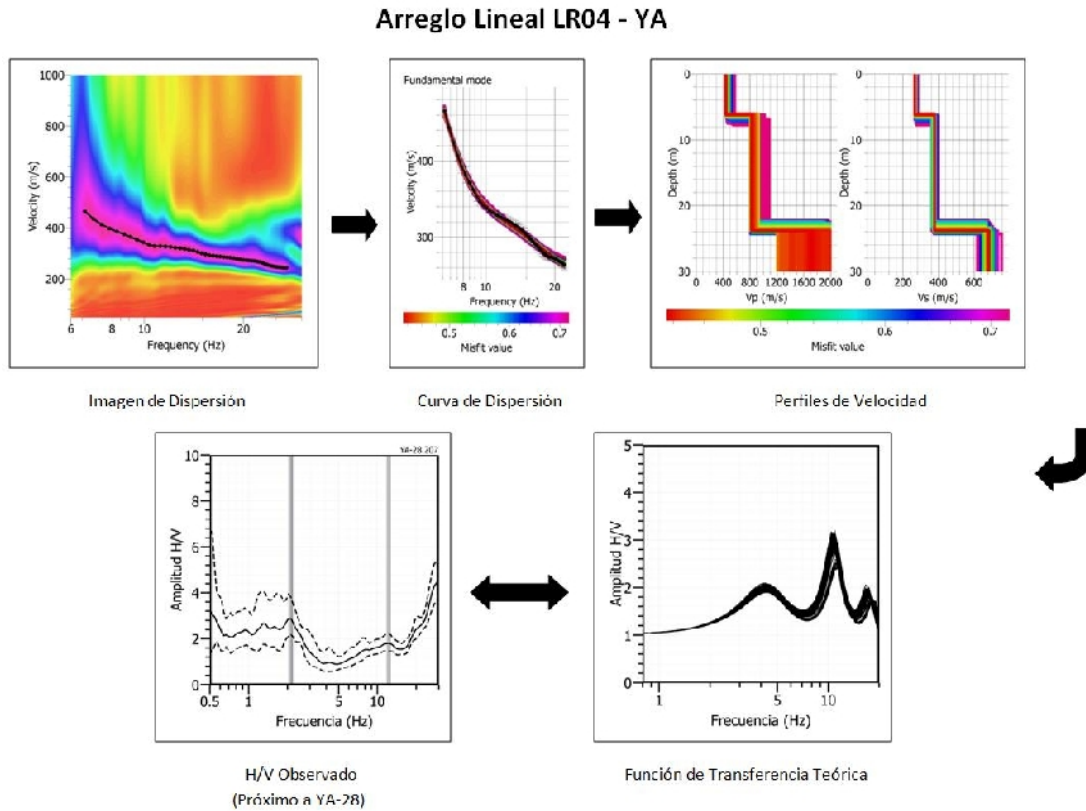


Figura 56d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR04 - YA.

En resumen, los perfiles LR02-YA, LR3-YA y LR05-YA ubicados hacia el extremo Este de la zona de estudio, sobre zonas de cultivo de olivo, presentan para la primera capa, velocidades de 130 m/s y espesores de hasta 3 metros. La segunda capa presenta velocidades V_s de 200 m/s y espesores entre 4 y 8 metros, mayor en dirección de SE a NE, lo cual evidencia la presencia de una interface inclinada. En general, los 6 perfiles realizados en la ciudad de Yauca indican la presencia de dos capas, la primera se caracteriza por mostrar incrementos de V_s de 130 m/s a 260 m/s y 490 m/s en dirección de SE a NO, lo cual indica que los suelos en dicha dirección son más compactos. Situación similar se observa para la segunda capa, con valores de V_s que se incrementan de 200 m/s (espesor 4 metros) a 380 m/s (espesor 18 metros) y 520 m/s (espesor 43 metros) en dirección NO del área de estudio, de manera similar indican la mayor consistencia de los suelos en dicha dirección.

Arreglo Lineal LR05 - YA

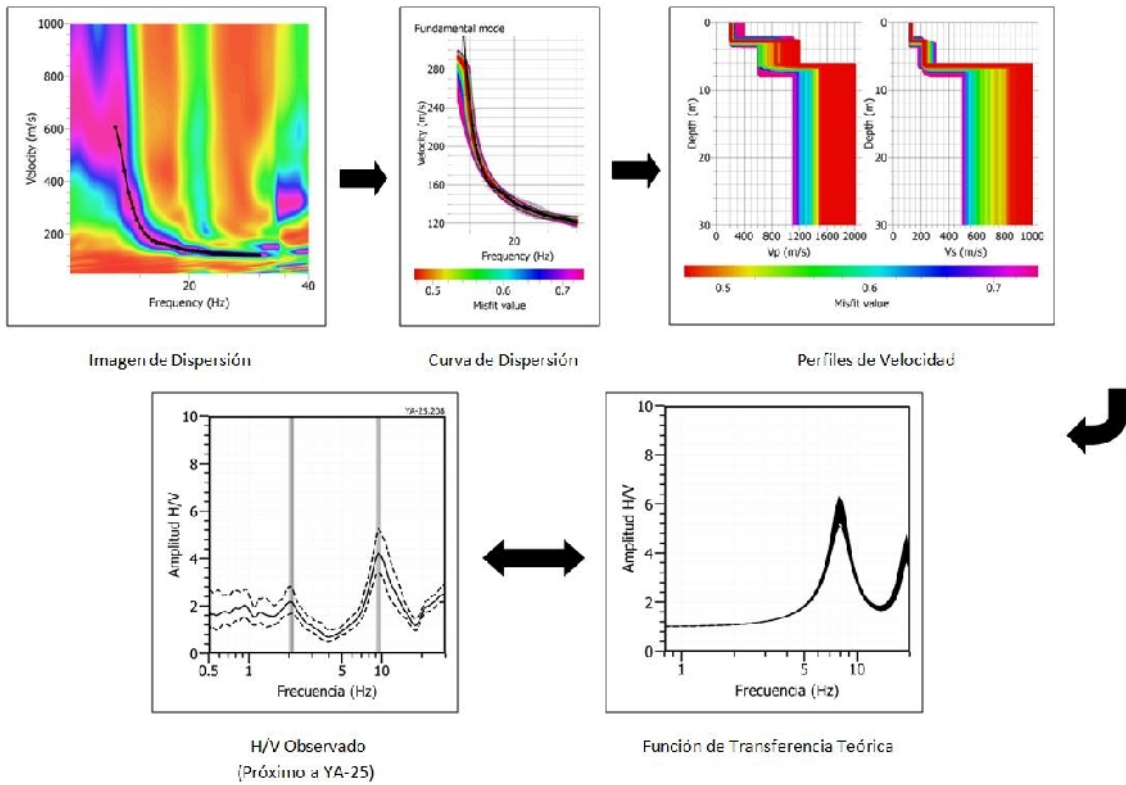


Figura 56e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR05-YA

Arreglo Lineal LR06 - YA

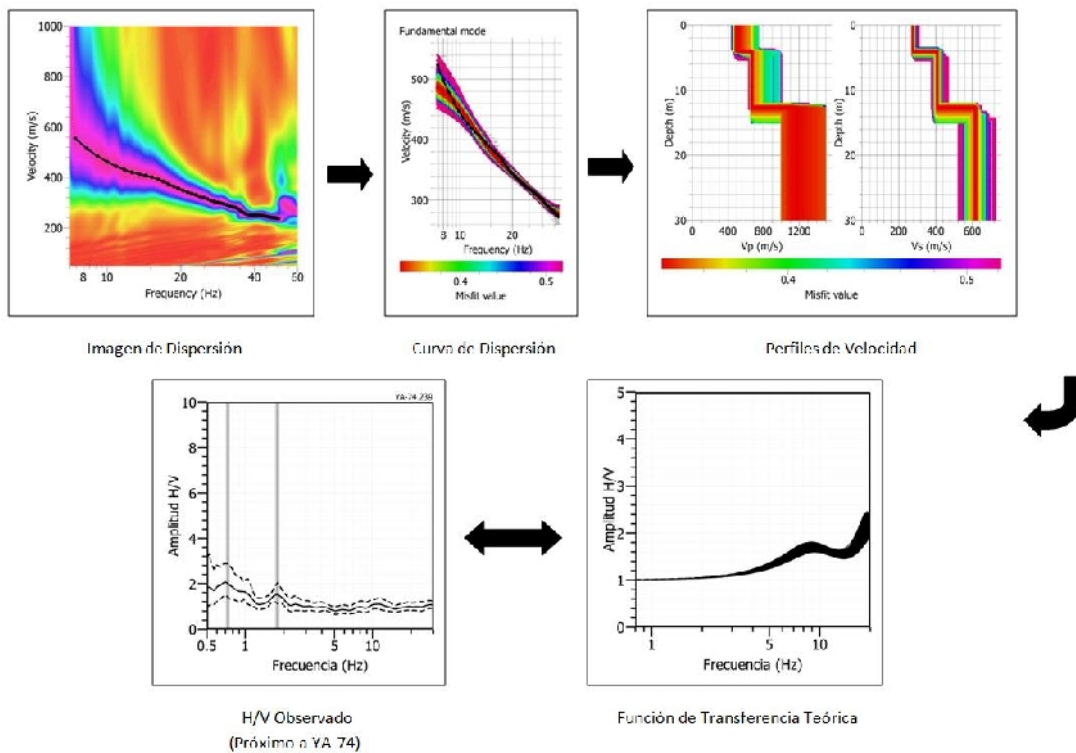


Figura 56f: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR06-YA.

11.3.- 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 la Figura 57 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la localidad de Yauca y los resultados obtenidos permiten observar que periodos de 0.5 segundos se concentran en el extremo NE del centro de la ciudad con tendencia hacia el extremo SE y sobre el 50% de la superficie de la zona de estudio. Sobre el extremo SO se concentran periodos de 0.4 segundos. Los periodos de 0.1 y 0.2 segundos se distribuyen sobre el extremo oeste de la zona de estudio, tanto en el sector sur y centro, para luego abarcar mayor área hacia su extremo NO. Estos valores se encuentran principalmente en zonas de mayor pendiente y sugieren la presencia de suelos de poco espesor depositados sobre suelo duro o roca.

Del mismo modo, en la ciudad de Yauca se ha identificado la presencia de periodos con valores entre 0.6 a 2.0 segundos, los mismos que pueden ser considerados como secundarios en razón a su menor amplitud y porque deben su presencia a efectos de topografía y/o cercanía al mar. Por lo tanto, se requiere de mayor información para su análisis e interpretación.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Yauca 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, velocidades de 200 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 de 10 a 25 metros. Al considerar velocidades V_s de 380 m/s y periodos de 0.2 segundos, se tendría espesores de 19 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

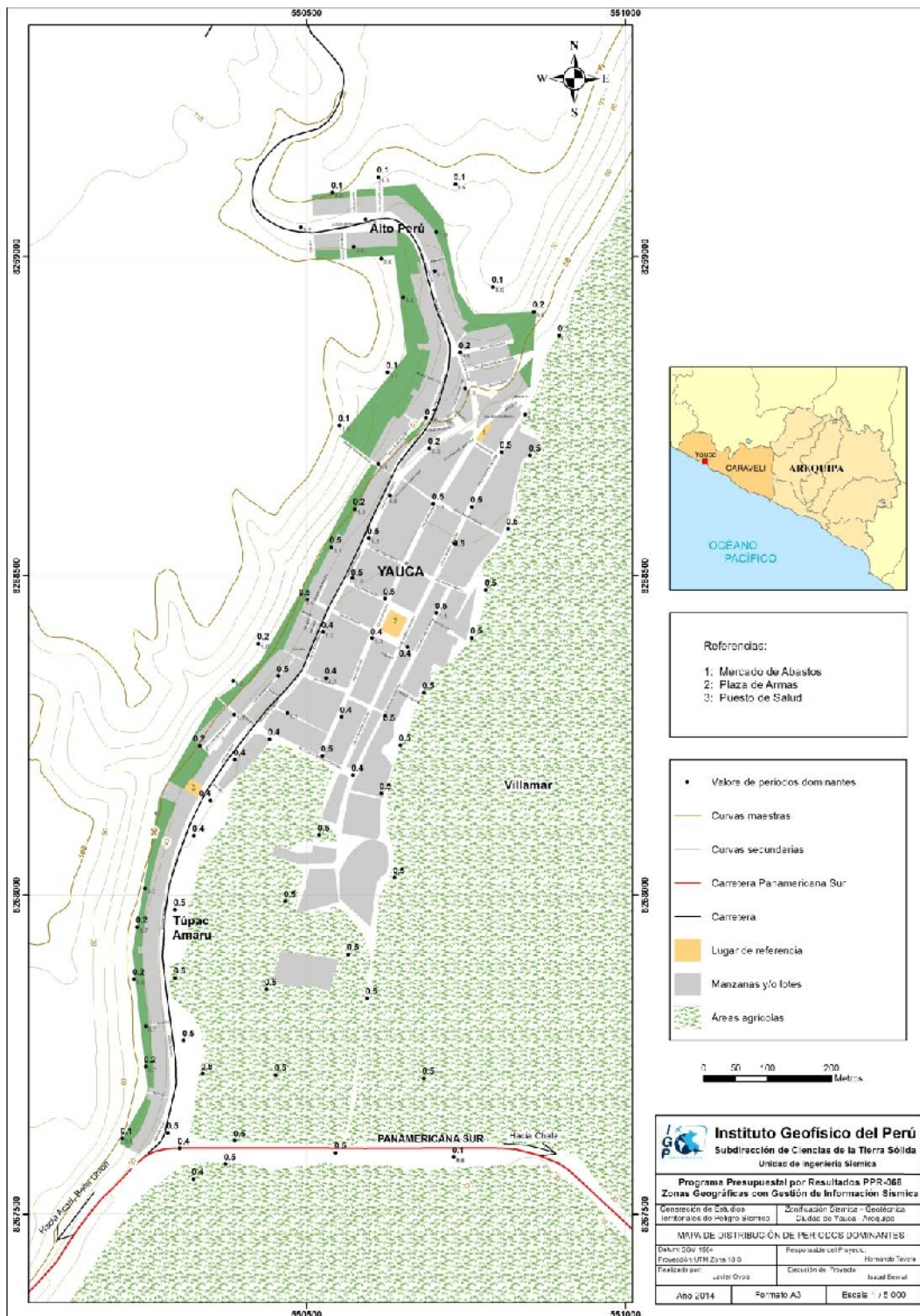


Figura 57: Mapa de la ciudad de Yauca y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes fundamentales y en gris, los secundarios.

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra la presencia de tres áreas con suelos dinámicamente similares. Abarcando una mayor extensión la correspondiente a periodos de 0.5 segundos, parte de la zona céntrica y extremo SE de la ciudad sobre los cultivos de olivo. Los periodos de 0.4 segundos se encuentran en el extremo SO con respecto al centro de la ciudad. Finalmente, hacia el extremo NO de la zona de estudio se identifica la presencia de periodos de 0.1 y 0.2 segundos, los cuales se correlacionan correctamente con la topografía propia de la zona de estudio.

11.4.- 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 Yauca se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 28-30 electrodos con un espaciamiento de 3 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 87 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 20 metros (Figura 58).

A continuación, se describe las características de cada uno de las secciones geo-eléctricas obtenidas a fin de conocer el valor real de la resistividad del subsuelo, en la ciudad de Yauca (Figura 59).

Sección geo-eléctrica L01-YA: Sección realizada en el extremo NE de la ciudad de Yauca, próximo a la carretera San Francisco y sobre un terreno de cultivo. En esta sección predominan valores resistivos y bajos resistivos. A lo largo de la sección, se distribuyen valores de 5 a 40 ohm.m, hasta una profundidad promedio de 3 metros, para luego incrementarse hasta los 200 ohm.m, entre los 3 y 8 metros de profundidad. A niveles mayores de profundidad, aparentemente estos valores disminuyen. La presencia de grava en la zona de estudio correspondería a valores resistivos y los suelos arenosos, limosos, arcillosos, con alto nivel freático a valores bajo resistivos (Figura 59a).

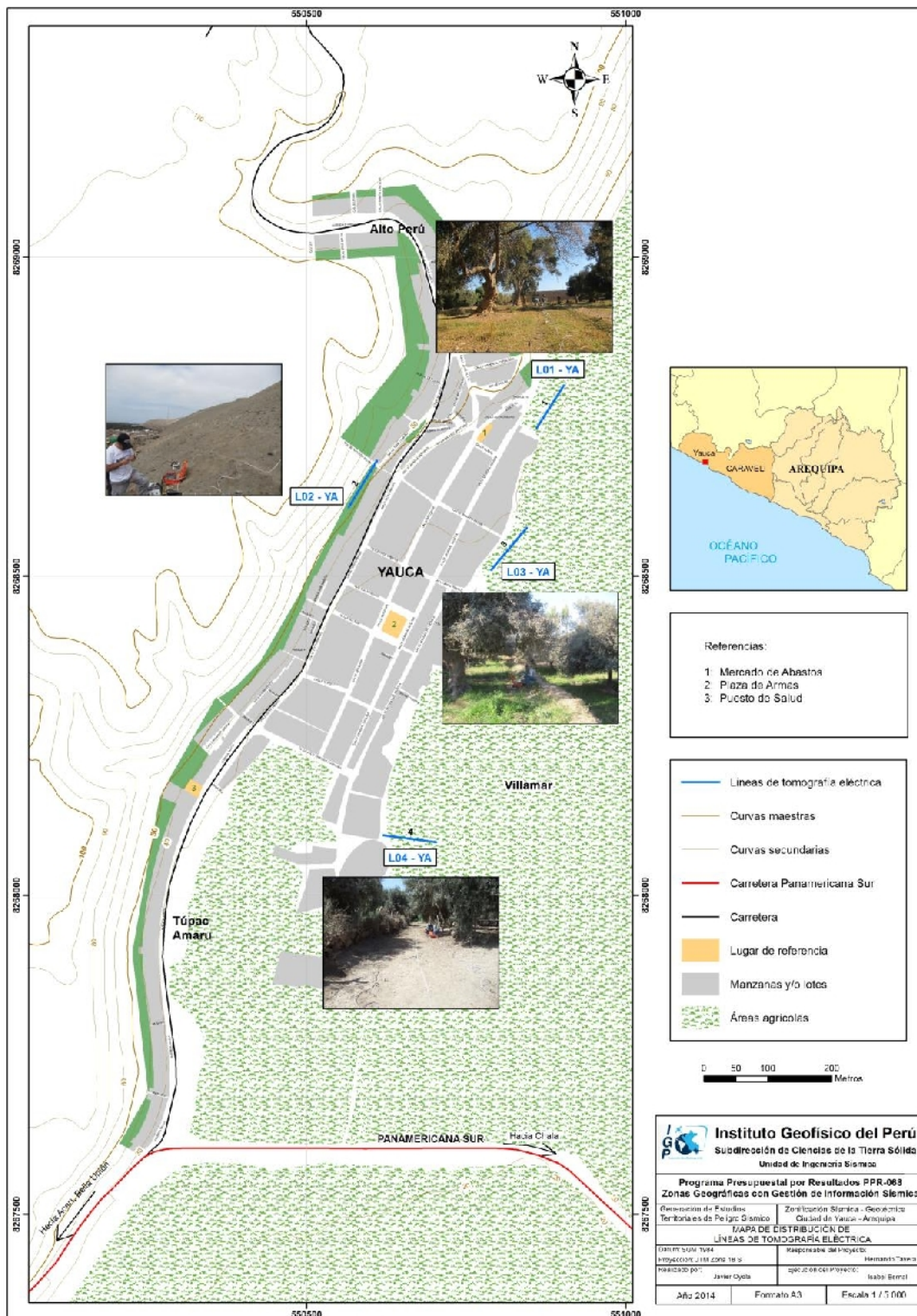


Figura 58: Mapa de la ciudad de Yauca y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica.

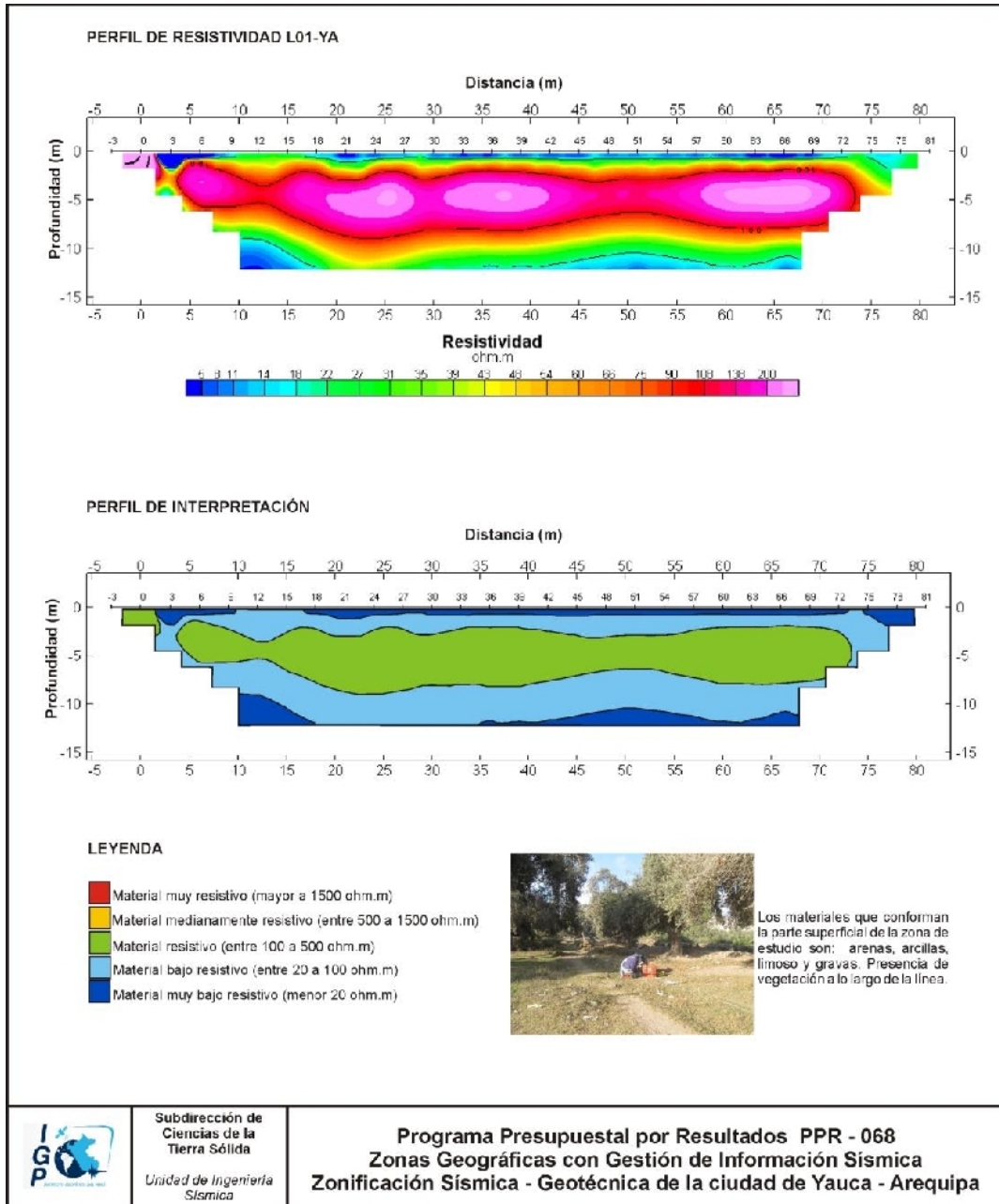


Figura 59a: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-YA.

Sección geo-eléctrica L02-YA: Sección rrealizada en el extremo Oeste del sector central del área urbana de la ciudad de Yauca, próximo a la calle Duturburu. En esta sección, predominan valores resistivos y bajos resistivos. Los valores que predominan están alrededor de los 16 ohm.m, aunque a niveles superficiales (menos de los 3 metros), próximos al tramo central de la sección, se observan valores entre 80 y 200 ohm.m. Estos resultados no muestran correspondencia con los aspectos geomorfológicos del área de estudio; sin embargo, los valores resistivos se pueden asociar a la presencia

de minerales como la Halita, que al estar expuesta al sol forma costras duras (Figura 59b).

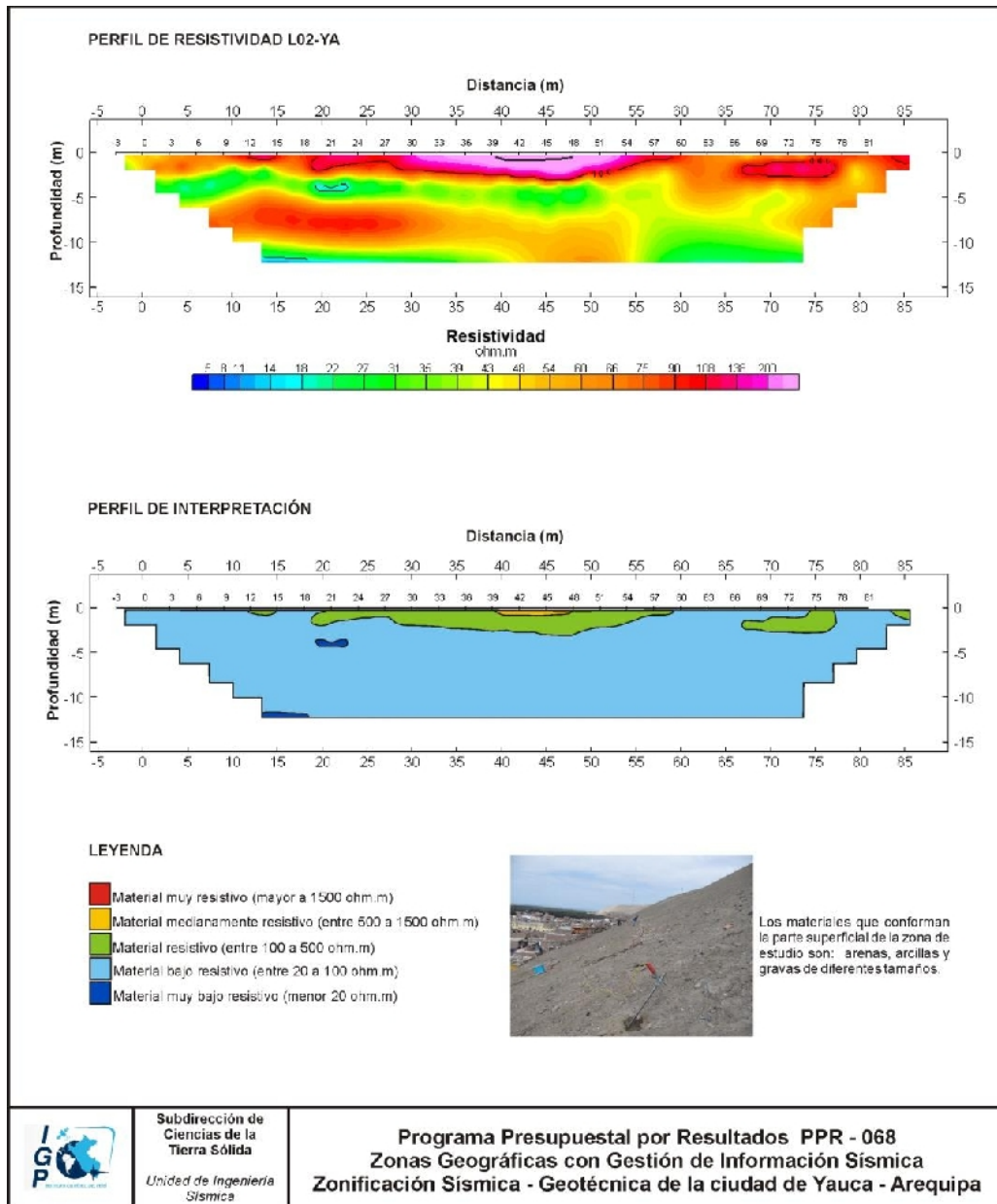


Figura 59b: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-YA.

Sección geo-eléctrica L03-YA: Sección realizada en el extremo Este del sector central del área urbana de la ciudad de Yauca, próximo a la calle General Segura y al coliseo de gallos, sobre terrenos de cultivo. En esta sección se ha identificado el predominio de valores resistivos a muy bajos resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 5 y 18 ohm.m hasta profundidades que varían de 2 a 5 metros conforme se tiende

hacia el extremo derecho de la sección. A mayor profundidad, los valores fluctúan entre 18 y 200 ohm.m., concentrándose los valores más altos a distancias de 45 y 50 metros y hasta una profundidad de 10 metros. La forma de dique que adquiere esta anomalía, probablemente sea debida a un elemento externo y no a la resistividad natural del suelo. Por otro lado, la saturación en el terreno es debido a la presencia de cultivos de olivo (Figura 59c).

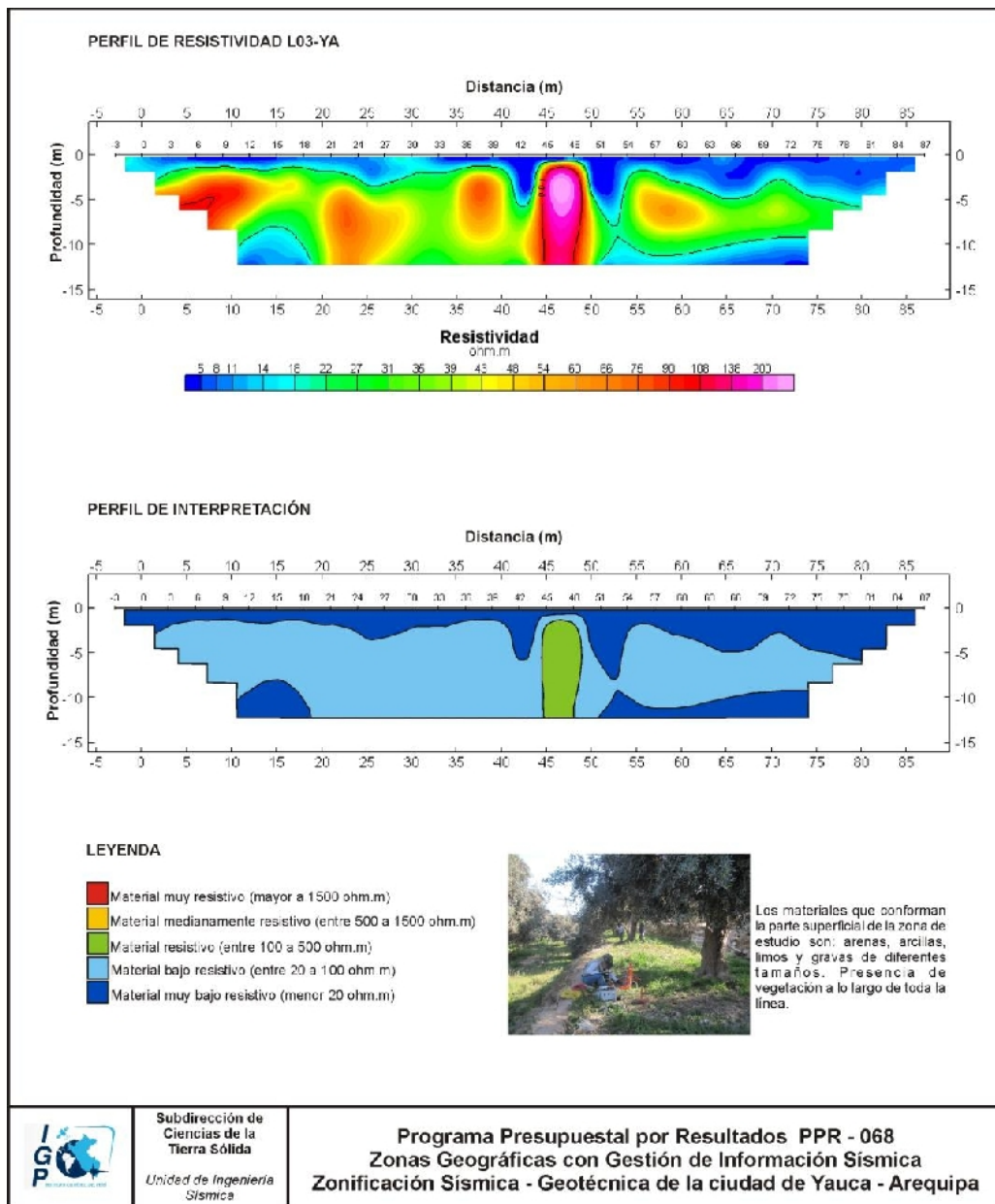


Figura 59c: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-YA.

Sección geo-eléctrica L04-YA: Sección realizada en el extremo SE de la zona urbana, próximo al colegio San Pedro y sobre terrenos de cultivo. En esta sección predominan valores bajos resistivos a muy bajos resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores de entre 6 y 18 ohm.m, hasta una profundidad de 4 metros. A mayor profundidad los valores fluctúan entre 18 y 100 ohm.m, ocupando el 70% de la sección. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso, arenoso y gravas de diferentes tamaños. Se observa vegetación a lo largo de toda la línea, lo que indica que los suelos están saturados y habría un predominio de suelos arcillosos y limosos (Figura 59d).

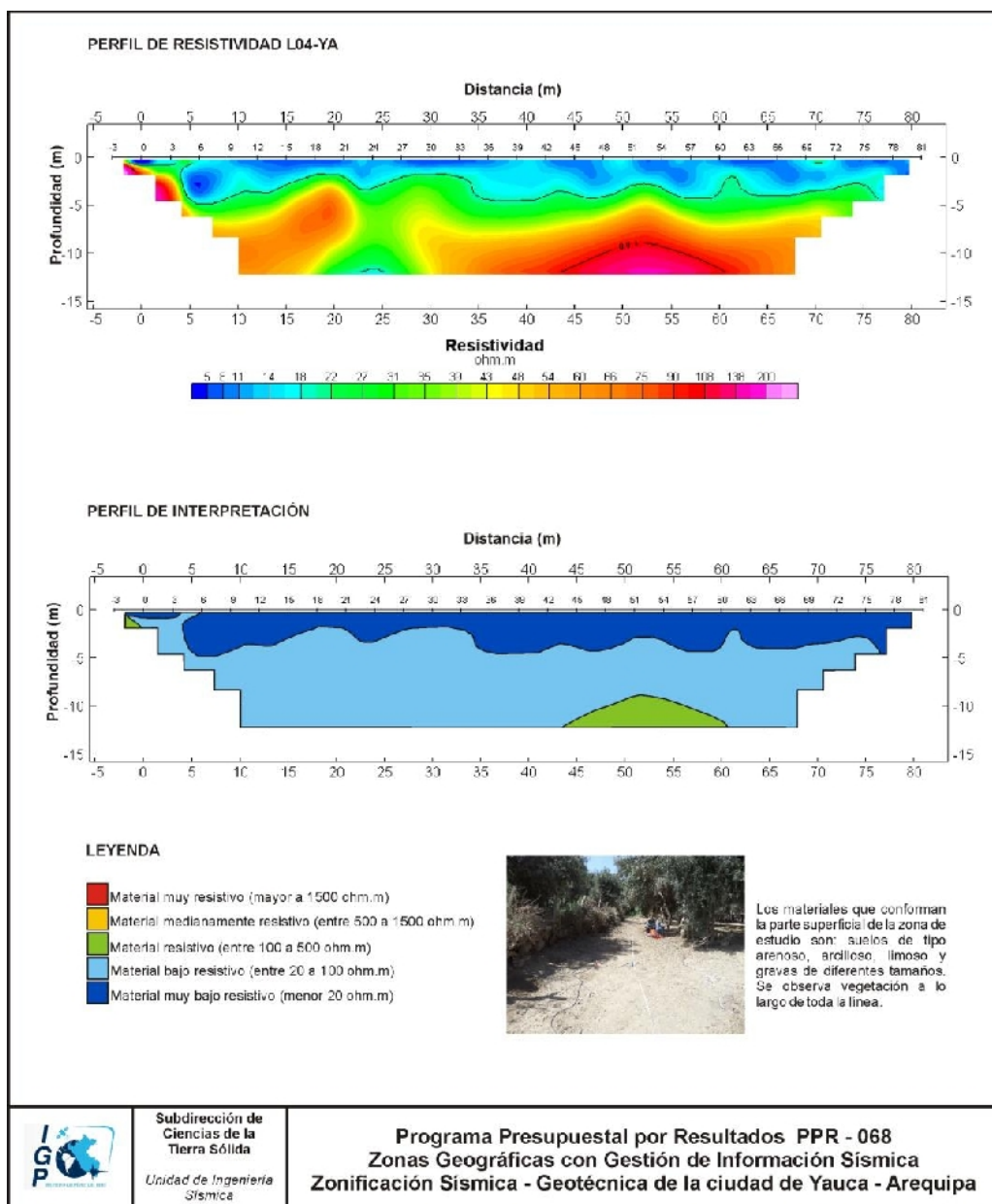


Figura 59d: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-YA.

En la ciudad de Yauca, la distribución de los valores de resistividad, evidencian la presencia de valores bajos resistivos a muy bajos resistivos en el extremo Este del área urbana de Yauca, asociados a la presencia de zonas de cultivo con alto nivel freático. Hacia su extremo Oeste, predominan valores resistivos y bajos resistivos, a pesar de encontrarse ubicados en una zona de mayor pendiente, y se deberían a la presencia de halita, que al estar expuesta al sol forma costras duras de sales en el suelo.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Yauca considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Yauca, 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: S1 y S2.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Yauca se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 60):

ZONA I: Conformada por estratos de origen ígneo cubiertos por un manto de origen coluvial poco consolidado y de poco espesor (3 a 4 metros). A profundidad, el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Las velocidades de corte pueden variar de 270 a 450 m/s para la capa superficial de poco espesor (aproximadamente varía de 3 a 4 metros) y de 520 m/s la capa más profunda (de 10 a 40 metros de potencia). Los suelos presentan una capacidad portante baja de 1.8 kg/cm². Por otro lado, debido a que la ciudad de Yauca presenta una morfología ligeramente inclinada por la presencia de cerros, ha favorecido a la acumulación de arenas poco compactas, las mismas que responden a periodos de 0,6 segundos. Estos valores evidencian el aporte topográfico en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Yauca.

ZONA II: Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos a medios y suelos aluviales con espesores de hasta 6 m., subyaciendo a estos estratos se tiene material de origen ígneo y sedimentario. Esta zona considera el extremo SE del sector central de la zona de estudio, donde los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.3 y 0.5 segundos; por lo que, su comportamiento dinámico es tipificado como un suelo Tipo S3 según la Norma sismorresistente

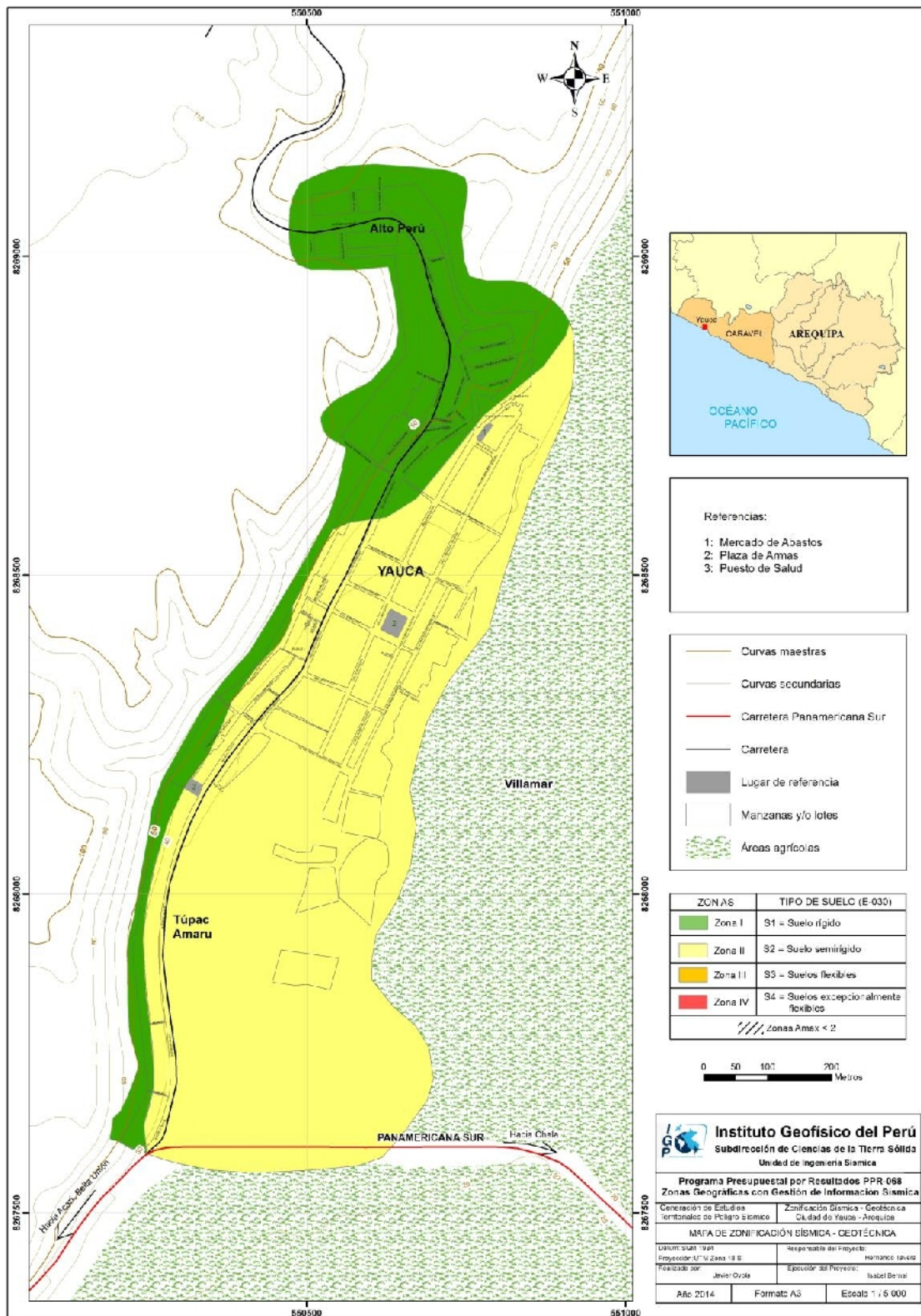


Figura 60: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Yauca.

peruana. Las velocidades de corte pueden variar de 130 a 220 m/s para la capa superficial, cuyo espesor es de 8 a 10 metros. Los suelos presentan capacidad portante alta de 4.4 kg/cm² hacia el extremo Este del sector central de la ciudad de Yauca, y baja hacia su extremo SE (1.2 kg/cm²).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para la ciudad de Yauca, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES

La ciudad de Yauca se encuentra asentada sobre una terraza fluvial formada como productos de procesos erosionales y deposicionales. El pavimento desértico sobre el cual se desarrollan la formación de dunas evidencia la acción eólica de los vientos Paracas sobre la zona de estudio.

El Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que la ciudad de Yauca se encuentra sobre suelos Tipo S1 y S2; es decir, los correspondientes a las zonas: Zona I y Zona II definidas en la Norma Sismorresistente Peruana.

RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales y regionales de la ciudad de Yauca para una mejor Gestión del Riesgo ante la ocurrencia de sismos y efectos secundarios. Del mismo modo, para aportar con las normativas necesarias para el desarrollo y expansión urbana de la ciudad de Yauca.

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): Gestion 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 microtemors. 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 1995a, “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
- 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., Cistermas, A., Dorabath, 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.
- HartzeU, 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.
- 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.
- 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 río 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. (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.
- 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.

MAPAS