



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 COCACHACRA

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú  
2014

# **ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE COCACHACRA**

**Provincia de Islay – 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 Cocachacra, distrito de Cocachacra, provincia de Islay, 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 Cocachacra han permitido identificar la existencia de dos tipos de suelo codificado como Tipo S1 y Tipo S2 y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) corresponde a las ZONAS I y II..*

*El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Cocachacra 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. Asimismo, como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.*

## ÍNDICE

### **RESÚMEN EJECUTIVO**

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.- Aspectos Climáticos

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 Geológicos y Geotécnicos

7.4.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Origen Deposicional

9.1.1.2.- Origen Marino

9.1.1.3.- Origen Fluvial

9.1.1.4.- Origen Erosivo

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 Fluviales

9.3.3.- Hidrografía

## 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 educación de la población y la calidad de las construcciones.

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](http://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 Cocachacra, ubicada en el distrito de Cocachacra, provincia de Islay, 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: Vista Panorámica de la Ciudad de Cocachacra*

### 3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Cocachacra es uno de los seis distritos que conforman la provincia de Islay en el Departamento de Arequipa, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa, en el sur del Perú. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia Católica forma parte de la Arquidiócesis de Arequipa.

Cocachacra fue creada políticamente por Ley dada en la sala de sesiones del Congreso de la República el 24 de diciembre de 1878 y promulgada por el Ejecutivo el 3 de enero de 1879, siendo presidente de la República Don Mariano Ignacio Prado. Según refieren los historiadores, la fundación de Cocachacra es más antigua que la fundación española de Arequipa, se menciona que en la época del incanato en 1250, Apu Mayta, general del Inca Yahuar Huaca, estableció su cuartel general de aprovisionamiento en el Valle de Tambo o Tampupalla o Yracuar – Tambo, es de suponer que Cocachacra ya existía como poblado.

La etimología de la palabra Cocachacra, proviene del quechua: Coca de Chacra. En cuanto a la época del Coloniaje, con fecha 22 de enero de 1540 el marqués de Francisco Pizarro, refiere a Don Diego de Hernández las encomiendas de entre otras las de Yumina y Puquina, hasta los linderos bañados con el mar entre los que se halla Cocachacra – Tampu – Palla. Actualmente, el distrito de Cocachacra cuenta con los siguientes centros poblados Valle Arriba: Caraquen, Pascana, Haciendita, Quelhua, Dique, Huaynalen, El Toro, Puerto Viejo y Ayanquera. En la Pampa Costera: San Camilo Asentamiento 7 y Base aérea de La Joya. En el Valle: Portal del Valle, Santa Rosa, San Pablo, El Fiscal, Chucarapi, Pampablanca, Veracruz, Santa María, P.J. Ramón Castilla y Los Rosales. Cocachacra tiene historial agrícola con las mejores variedades de arroz y la explotación minera a cargo de Southern Perú.

El distrito de Cocachacra tiene una superficie de 1536.96 km<sup>2</sup>, sobre una altura de 84 msnm y una población de aproximadamente 9342 habitantes. Limita por el norte con los distritos de La Joya, Yarabamba y Polobaya (provincia de Arequipa). Por el sur con el distrito de Punta de Bombón. Por el este con el distrito de La capilla (Provincia Gral. Sánchez Cerro) y distrito de Moquegua (provincia de Mariscal Nieto). Por el oeste con los distritos de Dean Valdivia, Mejía y Mollendo (Figura 2).



### 3.1.- Aspectos climáticos

Para conocer la condición climática en la ciudad de Cochachaca, se ha recolectado datos de la estación meteorológica Pampa Blanca ubicado a 6 km al NE de la ciudad. Los datos corresponden al año 2008 y ellos indican que la ciudad posee un clima desértico con temperaturas medias mensuales durante el verano entre 23.5 °C y 25.5 °C; mientras que, durante el invierno decrecen hasta 16.2 °C en promedio, Tabla 1 y Figura 3.

Tabla 1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensual durante el año 2008 en la estación meteorológica de Pampa Blanca (SENAMHI, 2008).

Estación: Pampa Blanca Tipo Convencional Meteorológica												
Departamento	Arequipa		Provincia	Islay		Distrito	Cochachaca					
Latitud	17° 4' 7''		Longitud	71° 43' 22''		Altitud	100 m.s.n.m					
Mes	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>T° Max. media mensual (°C)</b>	30.3	31.5	30.3	27.1	23.2	21.4	20.5	20.6	21.5	23.6	25.9	28.9
<b>T° Min. media mensual (°C)</b>	20.6	19.3	18.5	15.9	13.8	14.4	13.3	13.7	14.5	15.5	16.7	18.2
<b>Humedad Relativa media mensual (%)</b>	64.5	56.0	61.0	65.0	67.1	69.2	70.8	72.8	70.7	66.5	66.0	62.9
<b>Humedad Relativa Max. media mensual (%)</b>	79.6	74.2	79.6	82.2	79.1	77.5	78.0	82.1	81.4	79.3	75.8	75.2

Los datos de Humedad relativa media mensual registrados en la estación Pampa Blanca oscilan entre 56% en el mes de febrero y 72.8% en el mes de agosto. La máxima media mensual registrada en dicha estación fluctúa entre 74.2% en el mes de febrero y 82.2% en el mes de abril (Tabla 1 y Figura 4).

Las precipitaciones en la ciudad de Punta de Bombón son casi nulas, tal como muestran los registros de la estación Pampa Blanca (Tabla 2). Una excepción podrían ser los años 1997 y 1998 en que debido al fenómeno de El Niño, se llegó a registrar precipitaciones de 15.1 mm y 7.3 mm respectivamente.

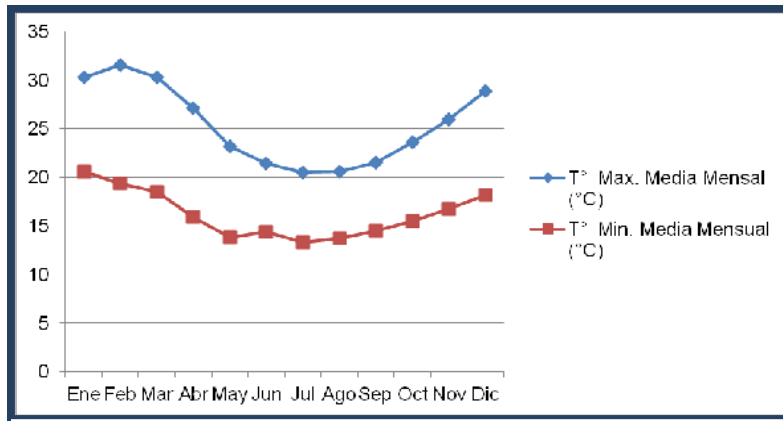


Figura 3: Índices de temperaturas registradas en la estación Pampa Blanca durante el año 2008.

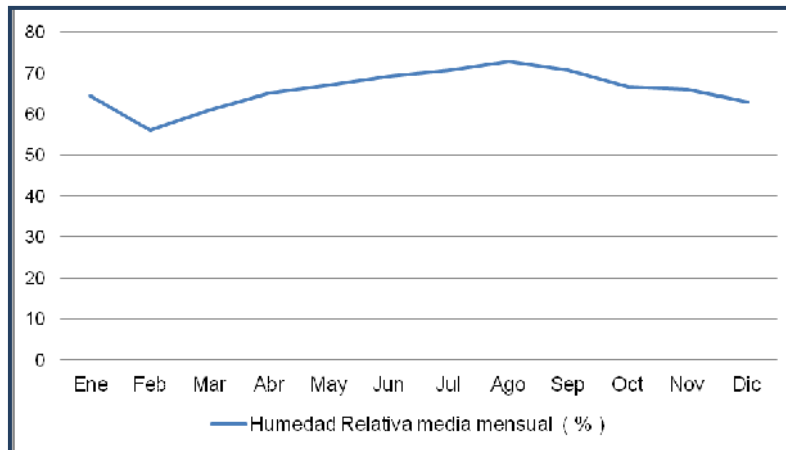


Figura 4: Humedad relativa media mensual en la estación Pampa Blanca durante el año 2008

Tabla 2: Precipitación acumulada anual en la estación Pampa Blanca, 1997 - 2007

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Precipitación (mm)</b>	15.1	7.3	0.0	3.5	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.3

#### 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.

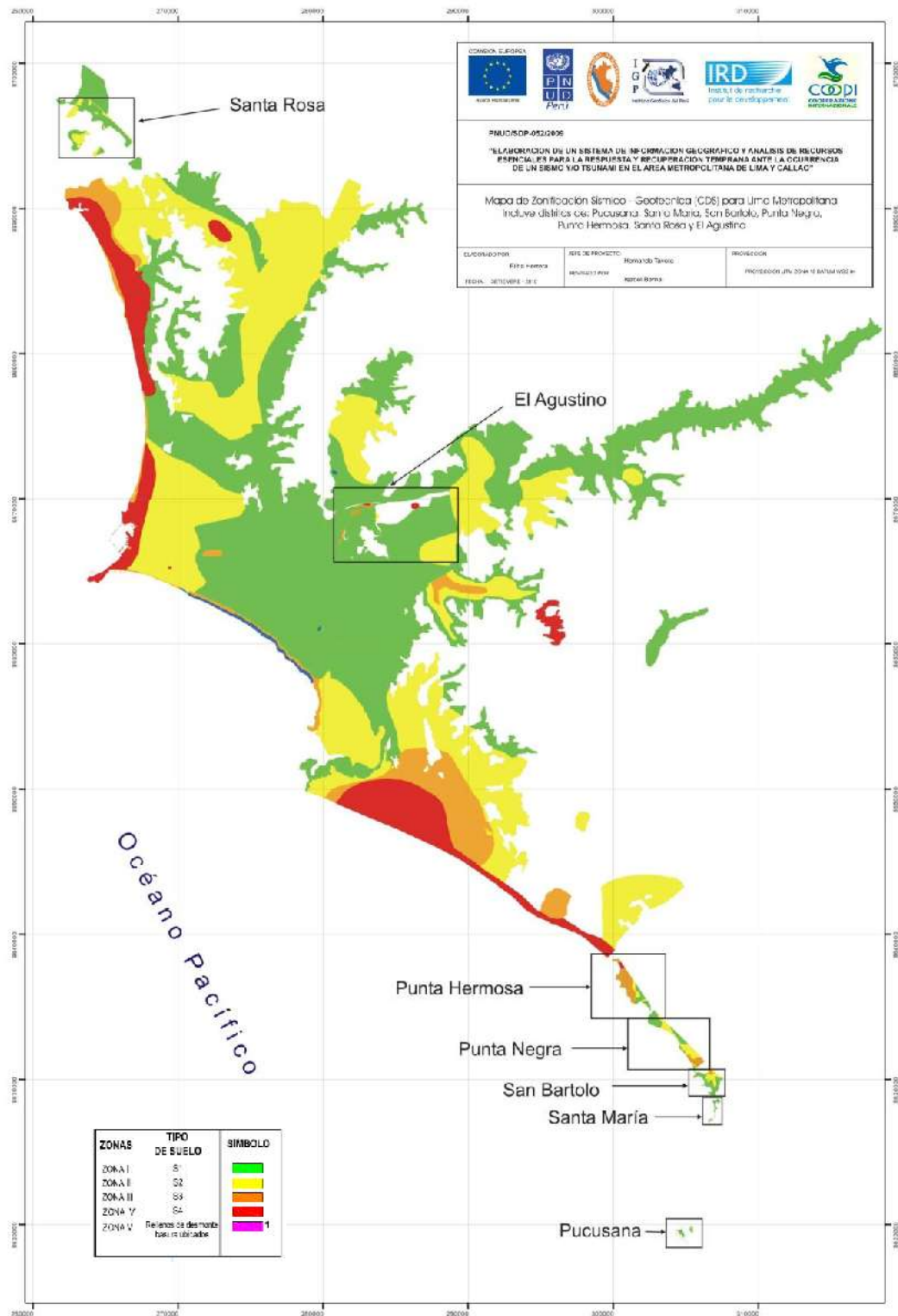


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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 Cochachaca son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Cochachaca”.**

## 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, inundación 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  $\lambda$ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de  $\lambda$  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 Punta de Bombón se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las 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 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 Punta de Bombón 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.

#### 7.4.- 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 6).



Figura 6: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 7, 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 CO-84 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CO-133, 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 8), 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.

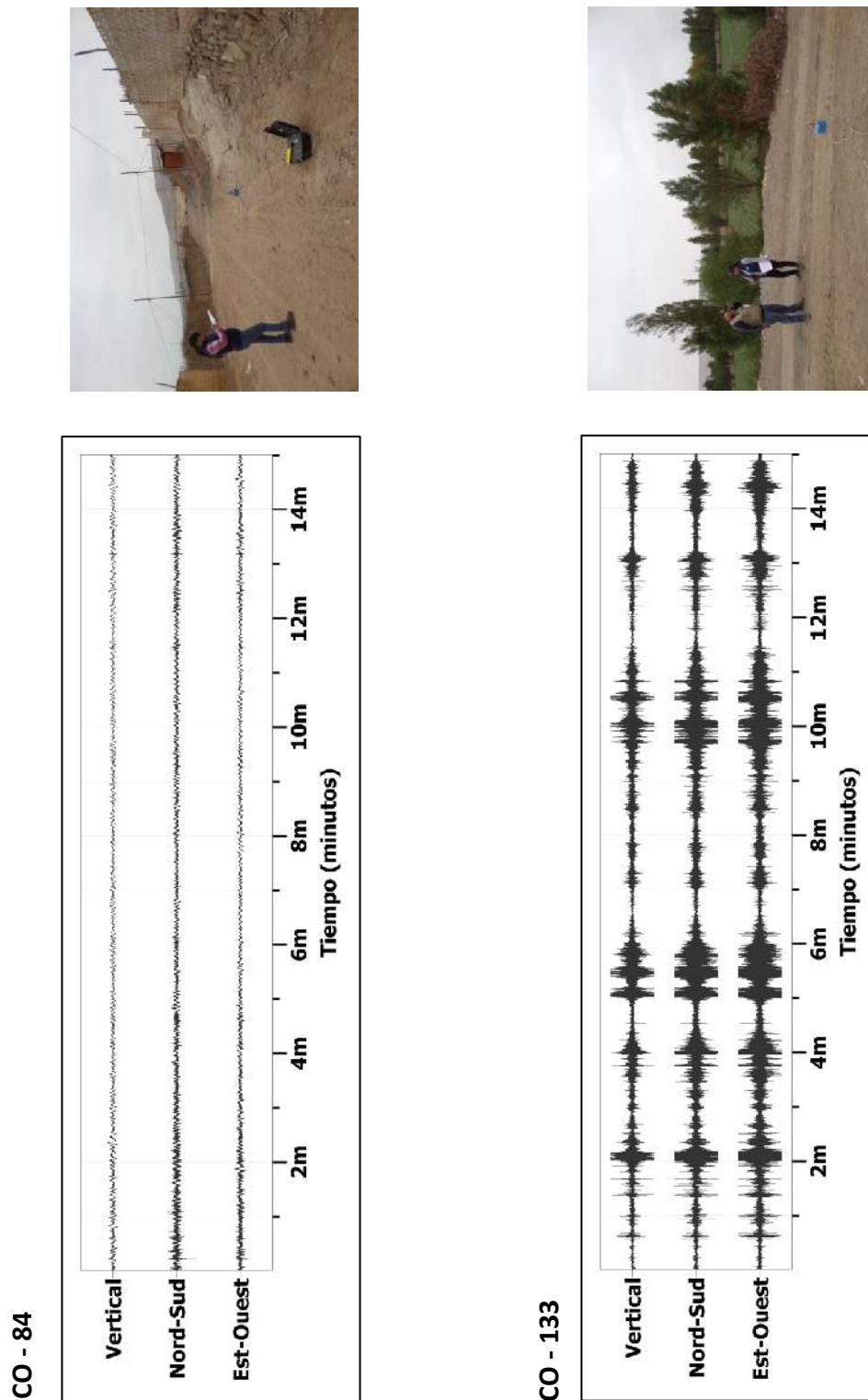
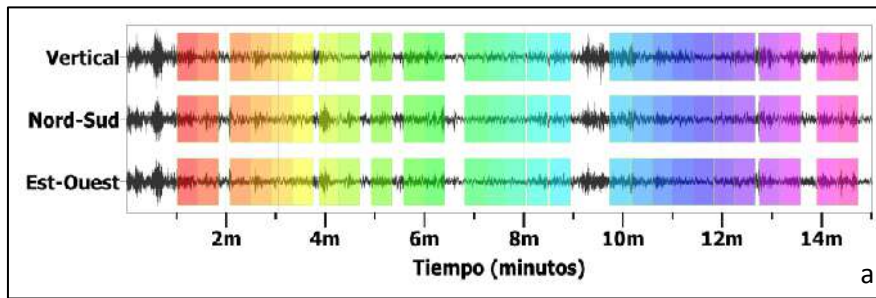


Figura 7: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (CO-84) y otro con ruido transitorio (CO-133). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

**CO - 39**



**CO - 48**

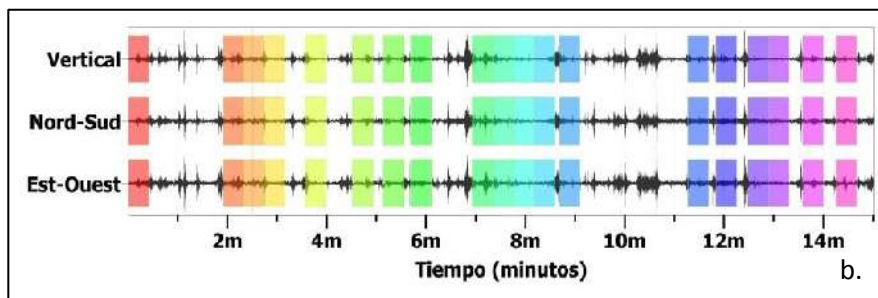


Figura 8: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. CO-39: Registros y razón H/V donde se identifica pulsos de frecuencias predominantes, siendo el segundo de mayor amplitud. CO-48: Registros y razón H/V en el cual la frecuencia predominante presenta hasta tres picos de baja amplitud. 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. 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 1 a 20 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 9). 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.

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 ( $V_s$ ) para el punto medio de cada línea de estudio. La aplicación de un nuevo cálculo iterativo inverso, permite conocer el periodo predominante teórico correspondiente al perfil de velocidades, el cual es correlacionado con el obtenido con la técnica H/V a fin de validar ambos resultados.

.- **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 10).

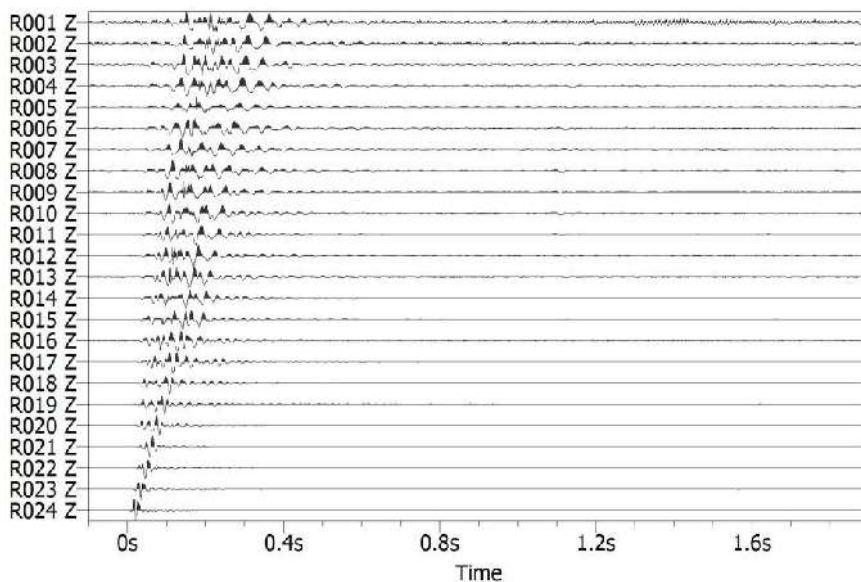


Figura 9: Disposición del equipo de refracción sísmica y trazas obtenidas en la ciudad de Cochachaca

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.



Figura 8: Disposición del equipo de prospección eléctrica en la ciudad de Cochachaca

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 la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos y geotécnicos.

## 8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

La ciudad de Cochachaca 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, ya que puede presentarse el escenario de un sismo de gran magnitud que produzca daños en las viviendas y en las personas. Del mismo modo, se debe estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud, como una herramienta útil para aproximar la construcción de viviendas y edificios menos vulnerables ante los sismos.

### 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 estructurales 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 11). Una de estas ciudades es Cochachaca y según información histórica contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1604 y 1868 los que causaron daños importantes en las viviendas de adobe y madera construidas por los primeros pobladores en estas ciudades emergentes. El tsunami de 1868 parece ser, después del sismo, el peligro adicional que causó mayor daño en la zona, en razón de estar sus playas prácticamente al nivel del mar. Estos sismos causaron en la región sur del Perú intensidades del orden de VIII-IX en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978); por lo tanto, debieron haberse producido daños importantes.

Posteriormente, los sismos de 1979 y 2001 fueron los que causaron mayor daño en la ciudad, principalmente este último debido a la elevada magnitud que alcanzó el evento (8.2 Mw). Según Tavera et al (2002), el sismo del 2001 produjo una área de ruptura del orden de 350x100 km<sup>2</sup>. Siendo el eje mayor paralelo a la línea de

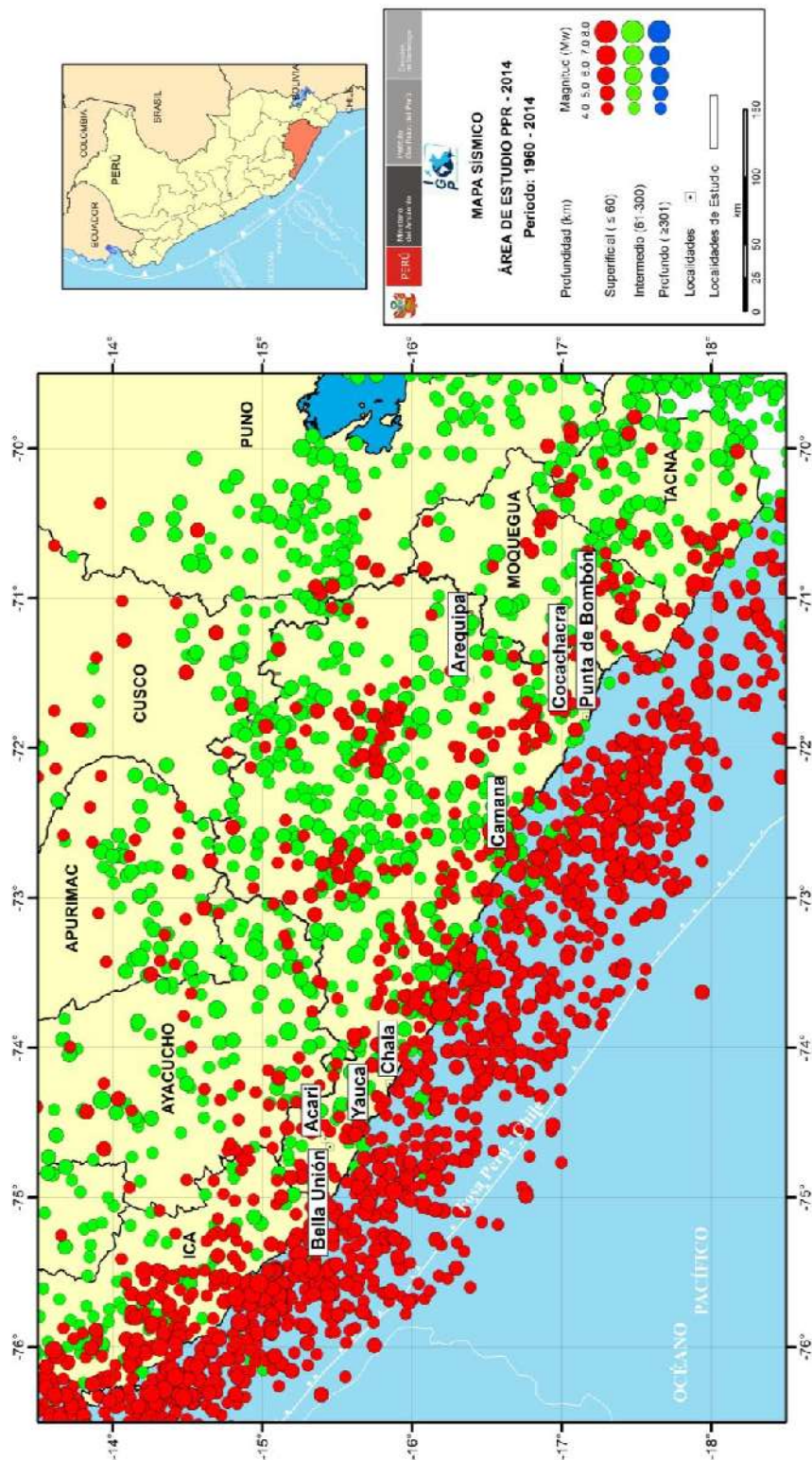


Figura 11: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

costa, con daños y efectos desde Ocoña hasta la península de Ilo en Moquegua. El proceso de ruptura de este evento concluyó con la ocurrencia de tres importantes réplicas y de ellas, dos presentaron sus epicentros frente a la ciudad de Cochachaca, produciendo intensidades de VII (MM) y daños en varias viviendas de la ciudad. En este caso el tsunami que siguió al sismo mayor, presentó mayor intensidad y daños en el área costera de la ciudad de Camaná; mientras que, el comportamiento anómalo del mar en las playas de Punta de Bombón, las más cercanas a Cochachaca, solo causo efectos menores.. Las estadísticas de daños por el sismo en la ciudad de Cochachaca indican el colapso de 471 viviendas y afectadas un total de 869; además, de 5433 damnificados, 2 desaparecidos, 15 heridos y 2 fallecidos (Figura 12).



*Figura 12: Sector de El Arenal en Cochachaca, donde se reportó los mayores daños y efectos producidos por el sismo del 2001.*

Finalmente, en la Figura 13 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo 1961 – 2014, llegándose a observar que la ciudad de Cochachaca, 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 y deslizamientos de tierra y piedras en zonas de alta pendiente y suelos inestables, tal es el caso de El Arenal..

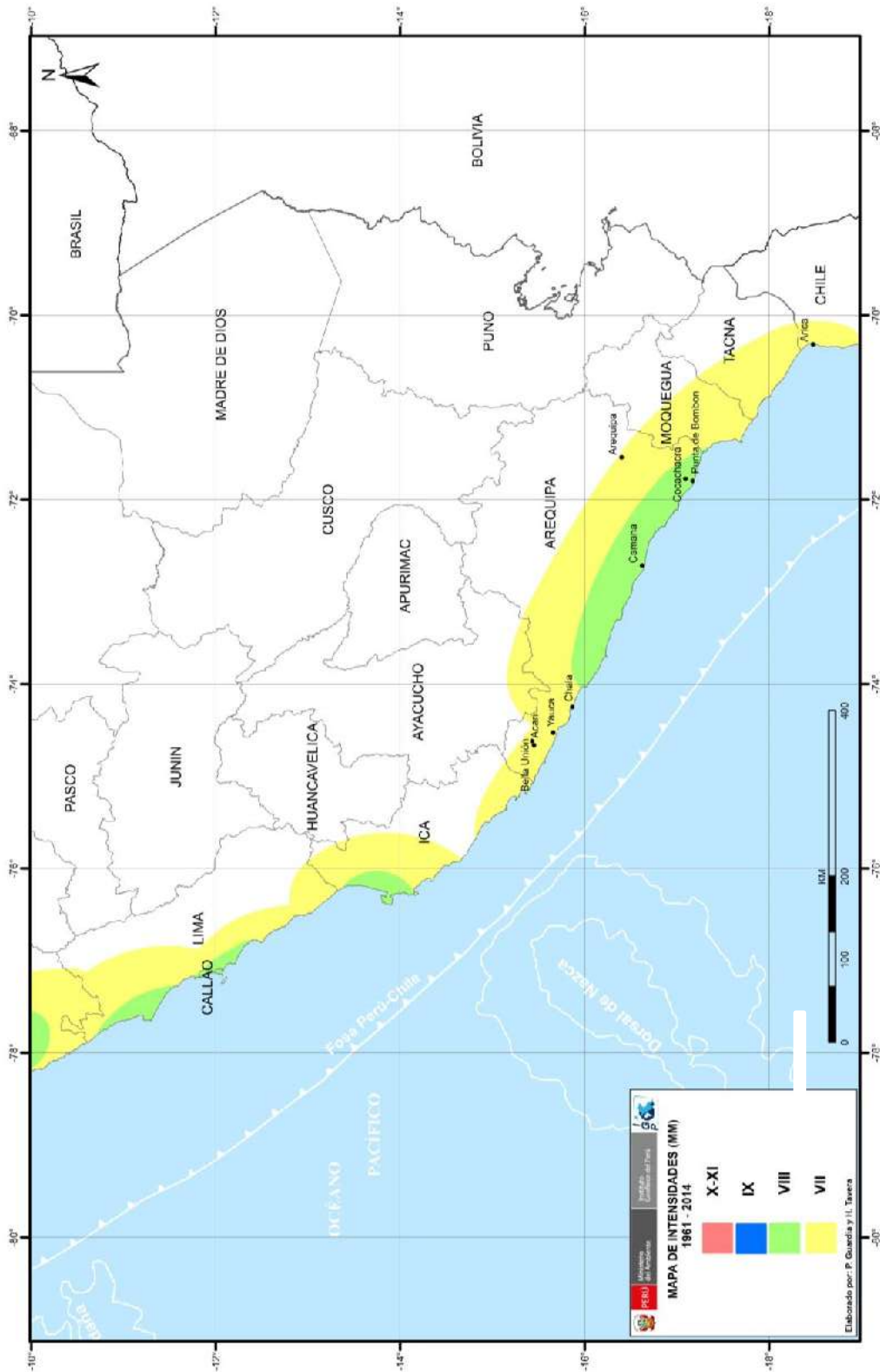


Figura 13: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

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 Cochachaca 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 14 se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-3 la que tiene una alta probabilidad de generar un evento sísmico de gran magnitud en la región. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

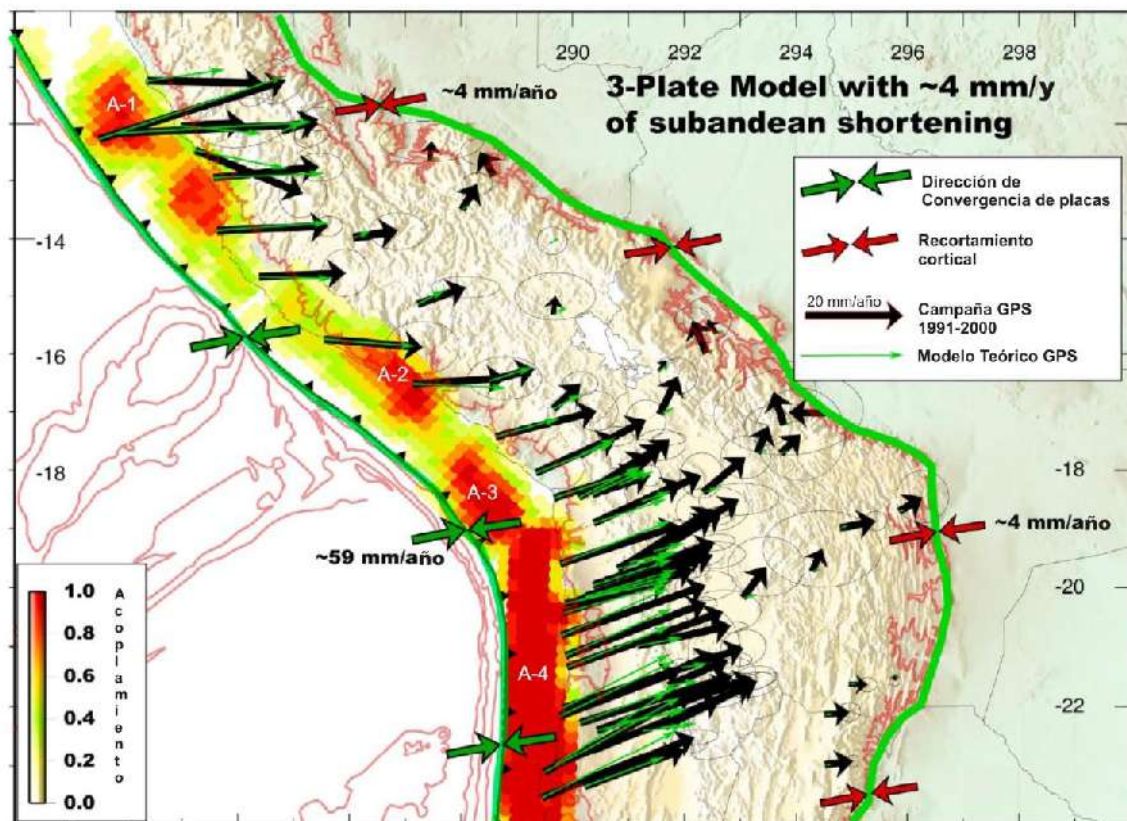


Figura 14: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

## 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 Cochachaca se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 460 a 480 gals (Figura 15), 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) y Pisco 2007 (Tavera, 2008).

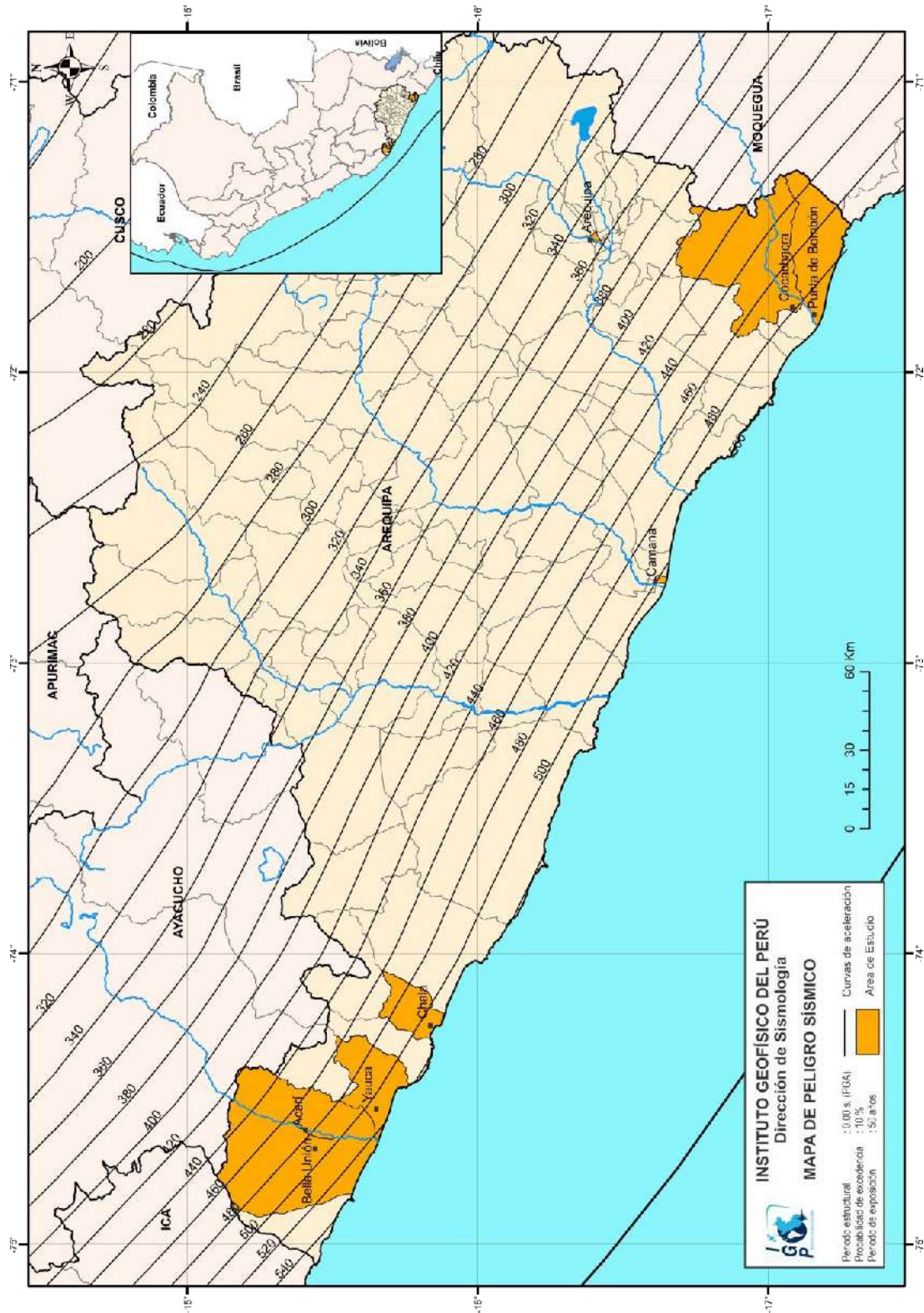


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

## **9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA**

### **9.1. Geomorfología**

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Cochachaca 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 a la topografía de terreno y al 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 verificados y validados durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Cochachaca. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:20000 para un área de 43 km<sup>2</sup>, y se concluye que la ciudad de Cochachaca se asienta sobre una terraza aluvial con cotas que varían entre 50 y 100 msnm (Figura 16).

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 Cochachaca se encuentra sobre una terraza aluvial con pendientes menores a 6°; es decir, una superficie casi plana (Figura 17).

#### **9.1.1. Unidades Geomorfológicas**

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Punta de Bombón se ha identificado la existencia de 6 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 18):

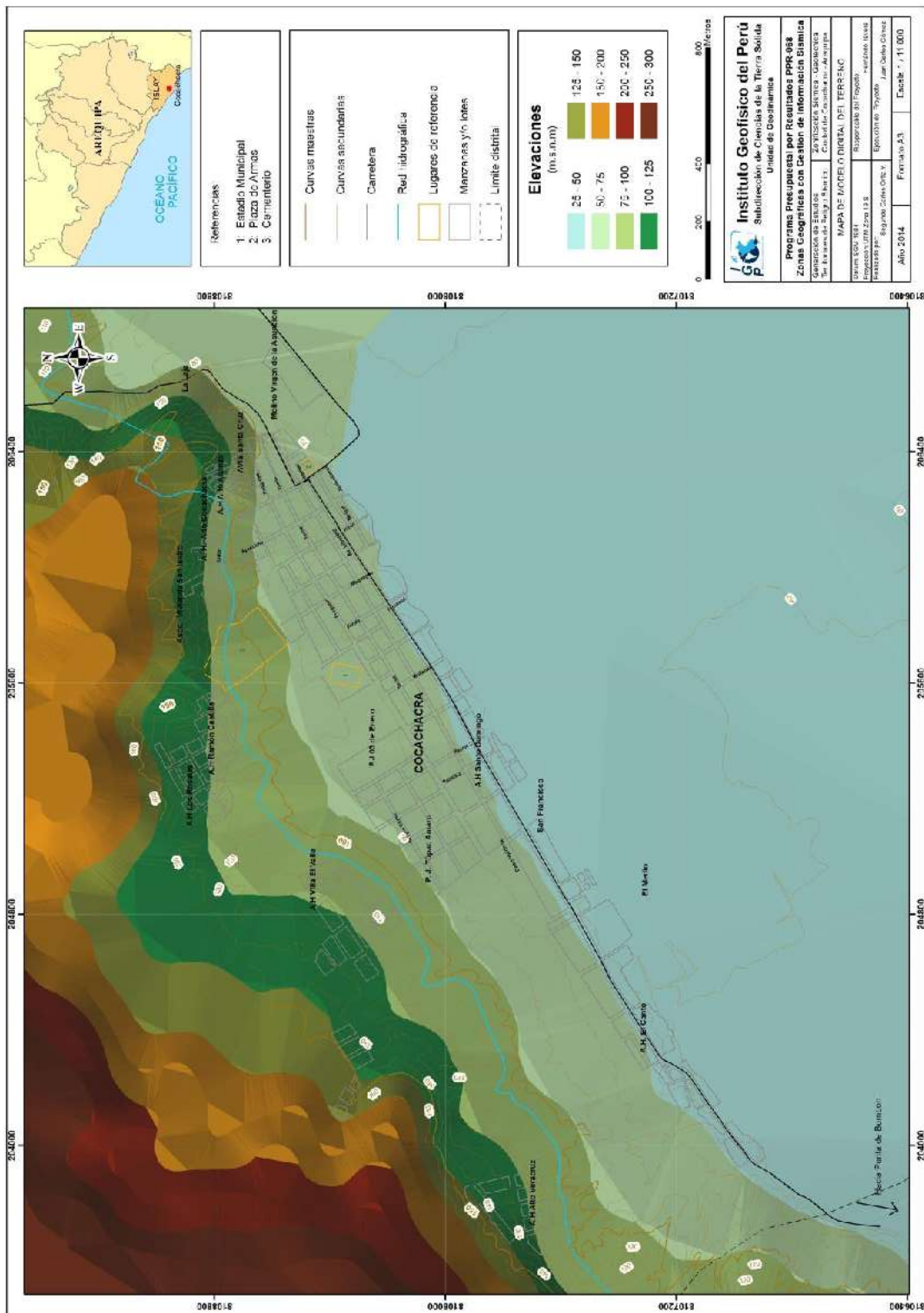


Figura 16: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Cochachaca y alrededores





### 9.1.1.1.- Origen depositacional

En el desarrollo de los valles modelados por la acción erosiva de las corrientes fluviales, uno de los episodios más importantes es la formación de las "Planicies aluviales". El río arrastra los materiales arrancados de la parte superior de la cuenca y los lleva consigo a sitios en donde, por una determinada circunstancia, pierde velocidad y se remansa, viéndose obligado a dejar su carga detrítica para luego esparcirse sobre una llanura de variada extensión. Este proceso, es casi siempre, un cambio en la constitución o disposición de las rocas que forman el valle; por lo general, de mayor resistencia a la erosión, pero que da forma a las aberturas que facilitan la posición y acumulación de aluviones. El tránsito de la corriente del río permite que estas superficies se ahonden, de tal manera que las planicies aluviales quedan colgadas a uno y otro lado del valle, dando lugar a la presencia de terrazas.



Figura 19: Localidades de Catas, Bombón y La Punta, todas asentadas sobre terrazas fluviales.

*.- **Terraza fluvial:** Las terrazas son el resultado de las acumulaciones de suelos debido a corrientes relativamente antiguas y que han quedado posicionados en la margen derecha del río Tambo. Su ancho es variable y va de 840 metros en la margen derecha del lecho actual (cerca al puente Pampa Blanca) hasta 2.54 km*

por la hacienda El Medio. La litología predominante de las terrazas son gravas estratificadas con clastos redondeados a subredondeados de hasta 10 cm de diámetro, dentro de una matriz arenosa. Sobreyacen a las gravas capas de 3 metros de arenas limosas de color gris claro a oscuro de grano medio con pendientes de 2° aproximadamente. La terraza fluvial se orienta en dirección NE-SO, debido a que el principal agente modelador es el río Tambo. Las terrazas se encuentran a 350 metros en dirección SE del área urbana de la ciudad de Cochachaca (Figuras 19 y 20). En general, las terrazas fluviales han sido destinadas a terrenos agrícolas y representan el 36.6% de la superficie del área de estudio.



Figura 20: obsérvese que el 100% de las terrazas fluviales han sido destinadas a las actividades agrícolas

.- **Terraza aluvial:** Es una superficie de terreno plano y de composición litológica variada. Por una parte, se tiene clastos subangulosos de origen sedimentario en una matriz limosa y por otra, gravas de buen comportamiento mecánico. La terraza aluvial tiene un desnivel variable con respecto a las terrazas fluviales, desde 1 metros hasta 12 metros en el sector Los Hacendados. Sobre esta unidad se encuentra asentada el área urbana de la ciudad de Cochachaca, PJ 3 de Enero, Túpac Amaru, AH. Ramón Castilla, Santo Domingo, San Francisco, El Canto y Santa María. Esta geoforma representa el 13.4% de la superficie de la ciudad de Cochachaca (Figuras 21 y 22).



Figura 21: Zona de contacto entre las terrazas aluviales que sobreyacen a las fluviales. Observe el corte de talud natural en el AH Santa María.



Figura 22: Sector Los Hacendados. Obsérvese que la terraza aluvial tiene un desnivel de 12 metros con respecto a la fluvial. El desnivel disminuye hacia el SO de la ciudad de Cochachaca

### 9.1.1.2.- Origen marino

Formadas por terrazas marinas (geoforma) que reflejan el efecto del mar en períodos geológicos largos, desde el Paleozoico Superior, donde la zona costera se hundió para luego quedar cubierta por el mar. Durante el Triásico Inferior se inicia un nuevo ciclo orogénico conocido como el ciclo andino, donde permanece levantada la zona costera. Durante el Jurásico se produce un nuevo hundimiento para quedar literalmente "Bañado" por el mar la zona costera, para luego llegar a depositar una importante secuencia de limolitas y areniscas. Posteriormente, durante el Cretácico Superior resurge la zona costera acompañado de intensa actividad volcánica. Esta secuencia da origen a terrazas marinas como testigos de las oscilaciones del mar en el pasado. Finalmente, durante el Cuaternario se desarrollaron en el planeta las glaciaciones separadas por épocas de derretimiento de los hielos que hacían subir el nivel de las aguas marinas.



Figura 23: Terraza marina ubicada a 2.7 km al SE de la ciudad de Cochachaca

**.- Terrazas marinas:** Esta unidad se encuentra en el extremo NO y SE de la ciudad de Cochachaca. Es una superficie plana ligeramente inclinada en dirección NE-SO. En su extremo NO se encuentra limitado por colinas y al SE por acantilados. En su composición predominan las gravas redondeadas a subredondeadas de color gris a gris azulado en matriz arenosa de grano medio a

grueso. Superficialmente están cubiertas por materiales aluviales de tipo arenas o arcillas. En algunos sectores, se observa la presencia de gravas de origen ígneo redondeadas y lentes de arenas bien estratificadas con restos de conchas marinas. Esta unidad se distribuye sobre una superficie que abarca el 26% del área total de la ciudad de Cochachaca, Figuras 23 y 24.



Figura 24: Composición litológica de la terraza marina. En Cochachaca predominan las gravas redondeadas a subredondeadas en matriz arenosa de grano grueso

#### **9.1.1.3.- Origen fluvial**

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968), es causante de gran parte del relieve, además de formar llanuras de inundación en las que se construyen muchas de las ciudades. Los ríos son esencialmente agentes de erosión y transporte que suministran a los océanos agua y sedimentos procedentes del continente.

*.- **Lecho fluvial:** Corresponde al lecho fluvial del río Tambo, lugar por donde circulan las aguas dentro del valle en diversos y reducidos canales. El espacio ocupado por las aguas puede ser: lecho mayor (máximo, cuando se inunda), lecho ordinario (el del cauce normal) y canal de estiaje (por debajo del nivel, sumergido). En el lecho se depositan materiales fluviales de origen ígneo de diferentes diámetros envueltos en una matriz arenosa. Son altamente dinámicos*

y cambiantes debido a la continua erosión, Figuras 25 y 26. El lecho fluvial representa el 2.7% de la superficie del área de la ciudad.



Figura 25: En la ciudad de Cochachaca, la margen izquierda del río Tambo está limitada por terrazas marinas.



Figura 26: En el lecho fluvial está compuesto por gravas subredondeadas en matriz arenosa de grano fino a medio

.- **Llanura de inundación:** Corresponde a la superficie adyacente a un curso fluvial y que frecuentemente suele inundarse. En Cochachaca está presente, desde el Puente Freyre hasta el puente Pampa Blanca, a 3 km al NE de la localidad. El ancho de la llanura de inundación está en función del cauce del río y va de 350 hasta 500 metros en la margen derecha del río Tambo. La litología predominante son limo-arcillosos, lentes de arenas y en menor proporción gravas con clastos de hasta 3" de diámetro, redondeados dentro de una matriz arenosa. Estas llanuras son usadas para actividades agrícolas.

#### 9.1.1.4.- Origen Erosivo

La erosión es un término amplio aplicado a las diversas maneras como los agentes móviles como el agua, el viento y los glaciares que desprenden y transportan los productos de la meteorización y sedimentación, produciendo pérdida de materiales. En la ciudad de Cochachaca, el proceso erosivo se da en rocas del complejo Basal de la Costa y de la formación Moquegua, siendo los agentes erosivos el agua y el viento, ambos transforman las terrazas y estribaciones en sistemas formados por colinas.



Figura 27: Viviendas asentadas sobre colinas: P.J. San Isidro

*.- **Colinas:** Son elevaciones del terreno con pendientes suaves y alturas menores a 100 metros. En Cochachaca, las colinas se encuentran a 2.34 km en dirección NO de la ciudad, extendiéndose de NE a SO en todo el distrito. Ellas poseen un relieve ondulado y pendientes menores a 30°. El agente erosivo que afecta a estas geoformas es el viento (erosión eólica), llegando a modelar su relieve. Sobre estas unidades se encuentran asentados poblados como San Isidro, Alto Alianza, Los Rosales, Villa El Valle y Alto Veracruz (Figuras 27 y 28). Estas unidades representan el 10.7% de la superficie del área de estudio.*



*Figura 28: Colina ubicada a 900 metros al NO de la ciudad de Cochachaca*

## **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 “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, ingeniería sísmica, 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. Es de importancia reconocer a las distintas estructuras que se presentan alrededor de las ciudades, las geoformas existentes y los eventos geodinámicos internos y externos a los que están expuestos, ya que solo así es posible determinar el comportamiento del terreno ante la presencia de los distintos procesos geológicos que puedan suscitarse.

Para el estudio geológico de la ciudad de Cochachaca, se hace uso de la información contenida en el compendio de geología regional de INGEMMET (a escala regional 1:100000), complementado con información de 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**

Para describir las principales unidades geológicas, se tomó como base la información regional descrita por Guevara (1961) en el Cuadrángulo de Punta de Bombón, Hoja: 35s a escala 1/100000, actualizada por Sánchez (2000). Según la columna geológica, las principales unidades que afloran en las localidades de la Punta de Bombón y Cochachaca, vienen del Precámbrico hasta el Cuaternario,

conformando una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas. Algunas de estas unidades se encuentran atravesadas por numerosas masas de rocas intrusivas que se describirán más adelante.

En la zona de estudio, el complejo Basal de la Costa (Precámbrico) es la unidad más antigua y esta compuesta principalmente por gneis e instruida por granitos, granodioritas y dioritas. El gneis se presenta como una roca compacta, ligeramente intemperizada, de color gris verdoso con bandas y lentes de ortosa que le da un tono gris rojizo o rosado. Por lo general, muestran una estructura bandeada bastante definida pero de anchos irregulares, varían de finas a gruesas. Las bandas gris oscuras tienen espesores de 0.5 a 2 cm y se componen de pequeños cuarzos, feldespatos y ferro magnesianos. Las bandas rosadas contienen ortosa y cuarzo, son muy irregulares y fáciles de observar los agregados redondeados o lenticulares de ortosa de dimensiones diseminados en la roca. Los gneis afloran en el extremo N y NO de la zona de estudio, entre Mollendo y el Valle del Tambo formando el flanco de la Cadena Costanera presente en el borde occidental de la Cordillera Andina. También afloran al Norte de la Boca del río Ilo, en la misma orilla del mar y formando una faja angosta que se extiende desde la quebrada Pocomá hasta el límite del cuadrángulo.

Suprayaciendo a las rocas del Complejo Basal de la Costa, afloran pequeños remanentes a la Formación Moquegua (Paleógeno a Neógeno) con espesores de 510 metros. Esta formación ha sido dividida y mapeada en dos miembros (Inferior y Superior), teniendo en cuenta la diferencia de litología y una suave discordancia entre ambas. El Miembro Inferior se encuentra expuesto en ambas laderas del valle de Moquegua, cerca del fundo El Molle y está conformado por areniscas arcósicas a tufáceas, de color gris a marrón claro, que alternan en forma casi regular con areniscas arcillosas y arcillas, grises a rojizas. Las areniscas son de grano grueso a medio y se componen principalmente de feldespato y cuarzo en formas subangulares, con regular cohesión y a veces bastante compacta por una matriz arcillosa. En las áreas inferiores, las areniscas se presentan en bancos de 50 a 100 cm de grosor e intemperizan exfoliándose en láminas concéntricas. En las áreas superiores, las capas son más delgadas (20 a 50 cm) y tienen el predominio de horizontes arcillosos con capas y venillas de yeso. La estratificación tiene un rumbo promedio en dirección noroeste, con buzamiento de 4° a 5° hacia el sureste.

El Miembro Superior tiene una litología areno-conglomerádica que sobreyace con débil discordancia erosional a las capas del miembro inferior, tal como se observa en la parte alta del valle Moquegua y en los cortes a lo largo de las quebradas. Las formaciones Torán y el batolito, reposan directamente sobre el complejo basal. Este miembro es fácilmente distinguible por sus tonalidades claras que contrastan con las rojizas del Moquegua inferior y por lo general, sus capas tienen posición horizontal y en algunos casos con ligera inclinación en dirección suroeste.

Por encima de la formación Moquegua, se encuentra la formación Millo de edad Pliocena, ambas conformadas por conglomerados moderadamente consolidados y compuestos, en proporción variable, de clastos gruesos subredondeados a redondeados (espesores aproximados de 100 m) y areniscas tufáceas. Estudios recientes demuestran que estos conglomerados corresponderían a depósitos aluviales que conforman las evidencias del importante levantamiento que soportó la cordillera Occidental y que quedó registrado con la presencia de depósitos potentes de conglomerados nombrados regionalmente como Formación Millo. Esta unidad aflora únicamente en las planicies costaneras presentes en los valles y quebradas más jóvenes del cuadrángulo de Punta de Bombón.

Según la columna estratigráfica, las rocas más jóvenes pertenecen a los depósitos del Cuaternario y como los más antiguos, a los Aluviales compuestos por conglomerados y gravas inconsolidadas con intercalaciones de bancos y lentes de arena, arcilla y ocasionalmente de tufos volcánicos (Figura 29). Estos depósitos se encuentran sobre las pampas del desierto de Cemesí, en la extensa planicie del curso inferior del río Tambo y sobre el desierto de Pampa Tambo. Finalmente, se tiene depósitos fluviales que afloran en el valle del río Tambo.

***.- Rocas Ígneas Intrusivas:*** *En el área del cuadrángulo de Punta de Bombón, las rocas intrusivas afloran en la parte media septentrional, principalmente a lo largo del Flanco Andino, con desarrollo al NO-SE; es decir, diagonal a la hoja. Las rocas intrusivas que afloran regionalmente, forman parte del batolito Jurásico con la presencia de emplazamientos de dioritas y grano-dioritas.*

***Diorita:*** *La roca es de color gris oscuro a negro verdoso, holocristalina, con textura granular, de grano medio a grueso, dentro de las cuales se reconocen plagioclasas gris blanquecinas, hornablenda, escasa biotita y ocasionalmente*



**Granito-Granodiorita:** Se agrupan a estas, rocas intrusivas cuya composición varía entre granito y granodiorita, son de color gris, algo rosada hasta rojiza, holocristalina y de grano grueso a medio. Estas rocas afloran en diferentes localidades del área de Punta de Bombón y Clemesí.

### 9.2.2- Geología Local

Para reconocer la geología local se ha recopilado la información existente en formato impreso y digital, y después de su análisis se procedió a realizar trabajos de campo a fin de delimitar las unidades aflorantes en la ciudad de Cochachaca y alrededores. Como resultado del trabajo de campo se ha construido la cronolitoestratigráfica local con mayor detalle que el propuesto por el INGEMMET a la escala 1:100000 (Figura 30). El plano geológico local ha sido construido a la escala 1:25000 y es presentado en la Figura 31.

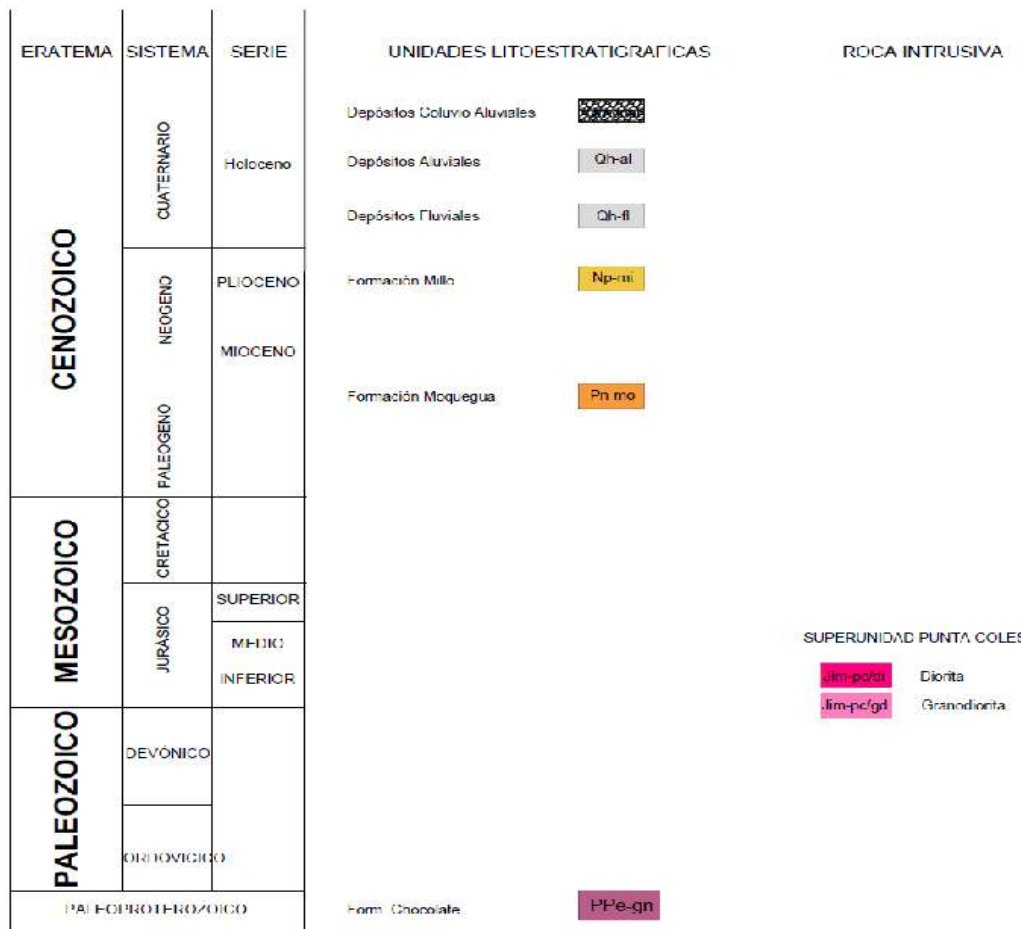


Figura 30: Columna cronolitoestratigráfica de la ciudad de Cochachaca

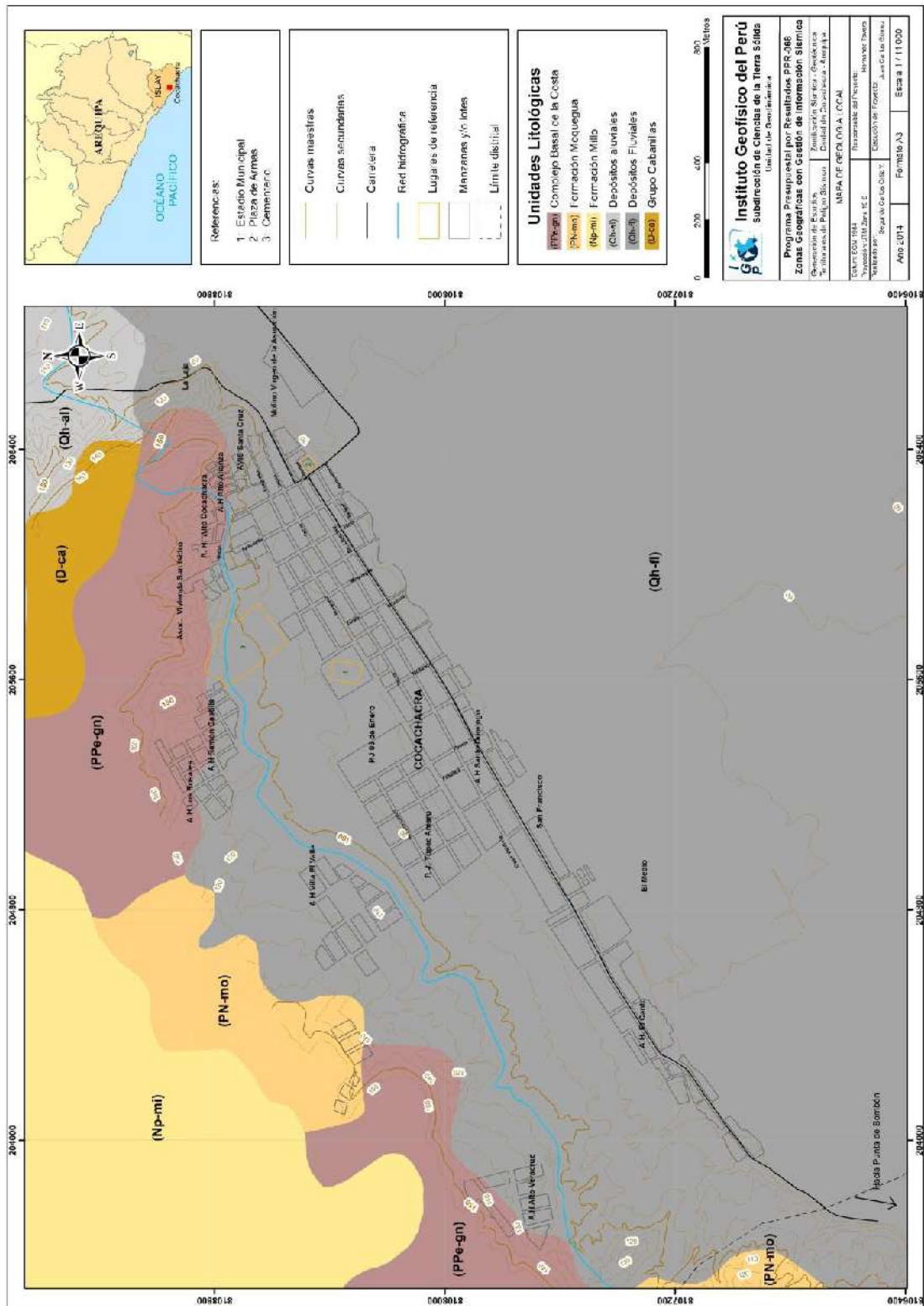


Figura 31: Mapa geológico local de la ciudad de Cochachaca y alrededores

En la Figura 31 se muestra el plano geológico local para Cochachaca y alrededores, llegándose a identificar la presencia de 2 unidades del Cuaternario que no fueron consideradas en la cartográfica del INGEMMET (Guevara; 1961). Se trata de unidades cronoestratigráficas correspondientes al Holoceno (11500 años): Depósitos Fluviales y Coluvio-Aluviales. Finalmente, en la ciudad de Cochachaca se ha reconocido la existencia de 4 unidades litológicas cuyas características se detallan a continuación.

**Complejo Basal de la Costa:** *Substrato rocoso regional constituido litológicamente por gneis bandeados de color rosado hasta gris verdoso, con una composición variada de granos de cuarzo y matriz de cuarzo feldespática de grano fino con algunas oxidaciones. Los esquistos ocupan áreas anexas y constituyen la fase más joven del metamorfismo regional. El Complejo Basal aflora a 700 metros al norte y a 3 km al Noroeste de la ciudad de Cochachaca. Sobre esta unidad se sitúan los AAHH: Los Rosales, Alto Veracruz y un 10% de las viviendas del sector AVIS (Asociación de Vivienda de Interés Social) Santa Cruz. Al Noroeste, el complejo aflora a 160 metros del AH Alto Veracruz (Figuras 32 y 33).*



Figura 32: Gneis bandeado que afloran a una distancia de 700 metros al norte de la ciudad de Cochachaca. Este material es usado para cimentaciones de viviendas.

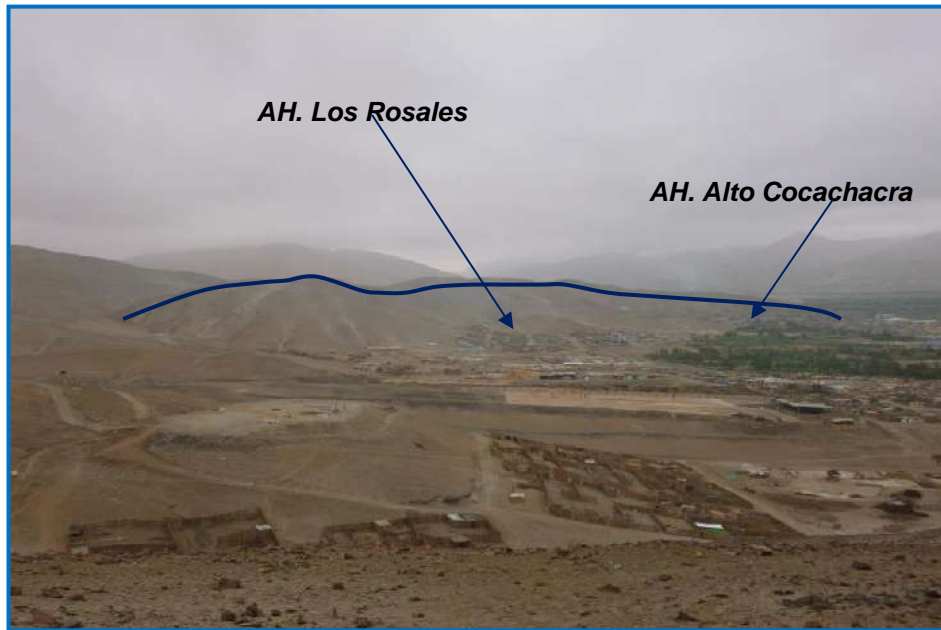


Figura 33: Los AAHH como Los Rosales y Alto Cochachaca se asientan sobre el Complejo Basal.

*.- **Superunidad Punta de Coles:** Forma parte del Batolito Jurásico con abundancia de emplazamientos grano-dioritas de esta unidad, son de grano grueso y color rosado. El intrusivo se encuentra diaclasado y moderadamente fracturado, por ello existen desprendimientos de rocas que pueden caer en el canal de irrigación, ubicado en la base de la ladera del cerro Yamayo. La estribación rocosa aflora a 2.3 km al Noreste de la ciudad de Cochachaca (Figuras 34 y 35).*

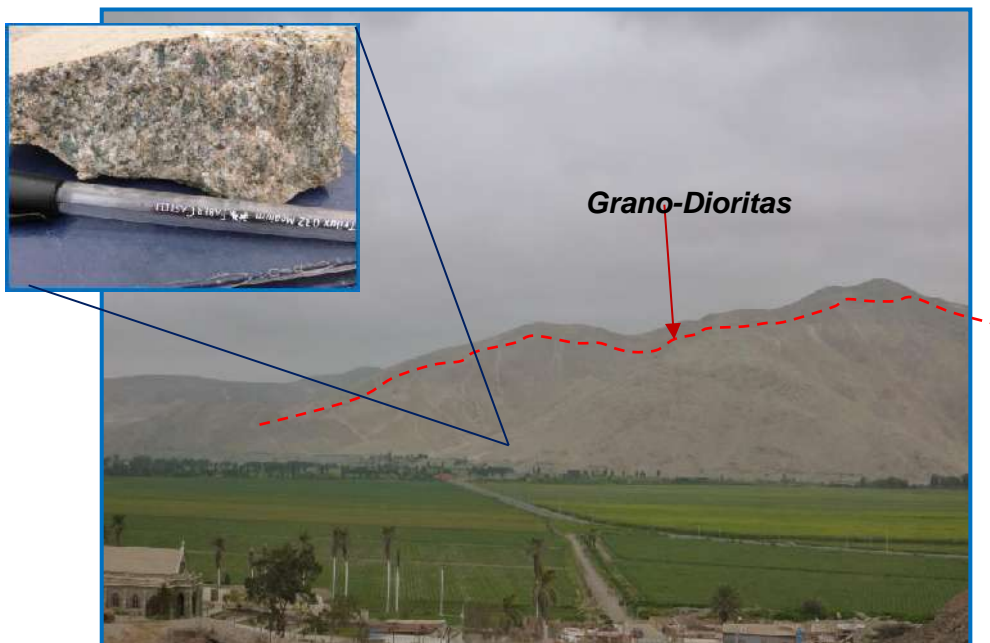


Figura 34: Afloramientos de rocas intrusivas en la ciudad de Cochachaca



Figura 35: Canal de agua afectado continuamente por caída de rocas

.- **Formación Moquegua:** Constituida por sedimentos de origen continental que afloran en el valle del río Tambo, suprayaciendo al Complejo Basal de la Costa y algunos depósitos del Cuaternario presentes en Cochachaca. Esta unidad se originó a fines del Paleógeno e inicios del Neógeno y está conformada principalmente por conglomerados con diámetros predominantes de 1 a 12 cm, color gris, redondeados a subredondeados, en una matriz areno-limosa de color beige, grano fino a medio. Sobre estos conglomerados se tiene areniscas grises de grano medio conformando forman terrazas que afloran a 2.1 km al Noroeste de la ciudad de Cochachaca, delimitando las terrazas marinas de las aluviales. Esta formación también está presente a distancias de 2.32 km al SE de la ciudad y limitando al río Tambo (Figura 36).

.- **Formación Millo:** Consiste en conglomerados moderadamente consolidados y compuestos, en proporción variable, por clastos gruesos redondeados a subredondeados de origen intrusivo en una matriz de arena gruesa. Esta formación es parte de las terrazas marinas que afloran en el extremo Noroeste y Sureste de la ciudad de Cochachaca (Figura 37).

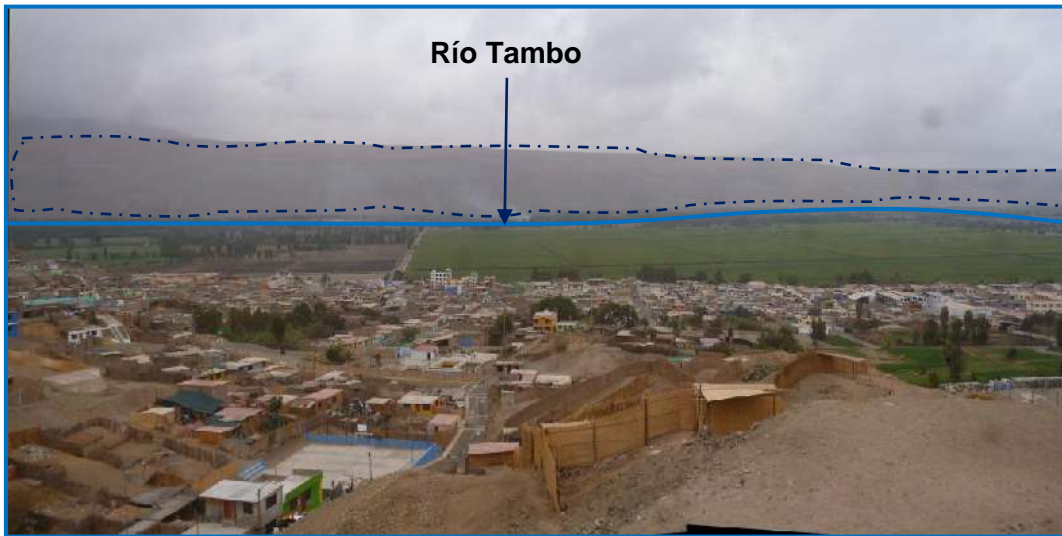


Figura 36: las líneas azules delimita a la formación Moquegua. Obsérvese que el río Tambo desarrolla un importante proceso de erosión para luego formar terrazas.



Figura 37: Las terrazas marinas de Cochachaca están constituidas por rocas de la Formación Millo.

**.- Depósitos Cuaternarios:** Los depósitos cuaternarios más importantes en Cochachaca son de origen coluvio-aluvial, aluvial y fluvial, los mismos que presentan las siguientes características:

**Depósitos fluviales (Qh-fl):** Estos depósitos se encuentran suprayaciendo concordante a la Formación Millo. El grosor de este manto fluvial varía desde pocos metros hasta un máximo 28 metros. En el área de estudio, los depósitos están constituidos por clastos de origen ígneo con formas redondeadas a subredondeadas como parte de la acumulación reciente en el

río Tambo. Sus materiales tiene tamaños variables que van desde arena arcillosa hasta las gravas gruesas y algunos cantos envueltos en una matriz areno-limosa. La dirección del transporte es de NE a SO a través del río para ocupar el lecho fluvial, la llanura de inundación y las terrazas fluviales. Estos depósitos, superficialmente y sobre ambos márgenes del río, están cubiertos por una capa fina de 0.5 a 3 metros de arena limosa que son usados como tierras de cultivo. Estos materiales abarcan el 33% de la superficie del área de estudio (Figuras 38 y 39).

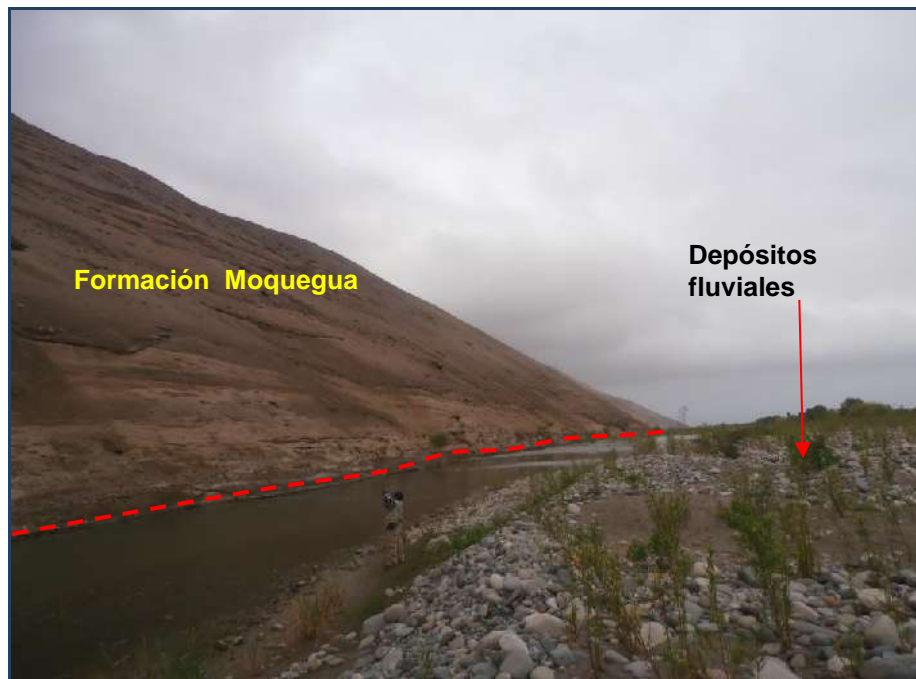


Figura 38: Depósitos fluviales compuestos por gravas redondeadas a subredondeadas con matriz arenosa, presentes en el cauce del río Tambo.

**Depósitos aluviales (Qh-al):** Estos depósitos se encuentran suprayaciendo concordante a los depósitos fluviales. El grosor de este manto aluvial varía desde pocos metros hasta un máximo 108 metros. Están constituidos por gravas redondeadas a subredondeadas con dimensiones que varían entre 1 a 17 cm. Los depósitos son de origen ígneo en una matriz arenosa bien cementada y lentes de hasta 30 cm de espesor de arenas de grano medio a grueso. Estos afloramientos se evidencian en los cortes de talud, a lo largo del trayecto de la carretera Cochachaca-La Curva. Los depósitos se encuentran limitados al Sureste por los depósitos fluviales, al Noreste con la Formación Moquegua y al Norte con el Complejo Basal de la Costa. Sobre estos mantos se encuentra

asentada el área urbana de la ciudad de Cochachaca y sus anexos, abarcando el 11% de toda la superficie de estudio (Figuras 40 y 41).



Figura 39: El 85% de los depósitos fluviales son usados como terrenos de cultivo



Figura 40: La ciudad de Cochachaca está asentada sobre depósitos aluviales limitados por el Complejo Basal de la Costa y por depósitos fluviales.



Figura 41: AAHH El Canto y corte de talud en el cual se observa la secuencia estratigráfica de los depósitos aluviales.

**Depósitos coluvo-aluviales (Qr-coal):** En la ciudad de Cochachaca, estos depósitos están suprayaciendo a los mantos aluviales con espesores de 65 metros. Su composición radica en clastos angulosos con matriz de areno-limosa, bien estratificados. Se encuentran aflorando a 700 m al Noreste de la ciudad de Cochachaca, en la zona La Laja. Estos materiales son extraídos de manera desproporcionada como materia prima para la construcción de viviendas, dejando cavidades de hasta 20 metros de profundidad, llegando a generarse inestabilidad en la zona. Estos depósitos abarcan el 5% de toda la superficie del área de estudio (Figura 42 y 43).

### 9.2.3- Geología Estructural

Regionalmente, la zona costera de la región sur del Perú se caracteriza por presentar los siguientes rasgos estructurales:

**.-Depresión tectónica longitudinal;** esta unidad estructural intermontañosa se distingue en el área de estudio desde el río Tambo en dirección sur. Los depósitos de la formación Moquegua que rellenan la depresión, no llegan a exceder la muralla frontal de la Cadena costanera. La depresión se ha formado debido a la presencia de la cadena costanera y al desarrollo de fallamientos longitudinales paralelos, todos distribuidos a lo largo de las estribaciones andinas. Este escenario permitió que el bloque occidental

descienda con respecto al oriental, originando una depresión alargado entre la cadena costanera y el frente de los Andes.



Figura 42: Depósitos coluvio-aluviales en la zona de La Laja (delimitado por líneas blancas), sobre los cuales se han asentado viviendas.



Figura 43: Corte de talud ubicado a 700 metros en dirección NE de la ciudad de Cochachaca. Obsérvese los desniveles en la superficie producidos por la extracción de materiales para construcción.

*.- **Fallamientos de tipo normal:** en el cuadrángulo geológico de Punta de Bombón y Clemesí, se evidencia la presencia de fallas longitudinales y otras perpendiculares a lo largo de la zona de costera siendo las causantes de los fracturamientos en bloques. La mayor parte de estas fallas son consideradas como probables, pues se han anotado en base a evidencias fisiográficas como escarpas bien delineadas. Por su orientación, éstas se agrupan en dos sistemas:*

- Fallas de rumbo NE-SW o sistema de fallas transversales: fallas Salinas, Clemesí e Infiernillos.*
- Fallas de rumbo NW-SE o sistema de fallas longitudinales: fallas Yamayo, ubicada al Oeste del río Tambo y otra, en la parte frontal de los cerros Huachirondo.*

### **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 (ver Anexos), 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 Cochachaca.

### **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 Cochachaca, 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 Cochachaca y alrededores, ha permitido identificar procesos de derrumbes de rocas (tipo de movimiento) y procesos fluviales, siendo sus características las siguientes:

***.- Derrumbes:** Estos eventos están presentes en el extremo norte de la ciudad de Cochachaca afectando la seguridad física de los siguientes Asentamientos Humanos y Asociaciones: Alto Cochachaca, Alto Alianza, Santa Cruz y San Isidro. Los derrumbes también se encuentran presentes a 3.2 km al Noreste de Cochachaca y de construirse alguna obra civil deben ser controlados. Por ejemplo, el canal ubicado al pie del cerro Yamayo, es afectado frecuentemente por derrumbes de diferente intensidad. Estos procesos tienen como detonantes a*

los factores litológicos, la meteorización o alteración de las rocas, el fracturamiento y la saturación de agua en los suelos (Figura 44 y 45).



Figura 44: Cerro Yamayo y desprendimiento de rocas fracturadas dentro del canal de regadío



Figura 45: Las líneas indican la dirección de los derrumbes que ponen en riesgo a la Asoc. San Isidro.

### 9.3.2.- Procesos fluviales

Los principales procesos erosivos presentes en la ciudad de Cochachaca son:

**.- Erosión fluvial:** Se produce por la acción del desgaste de las aguas del río Tambo y la intervención de factores como la morfología de la terraza fluvial, la pendiente, el ancho del cauce, la naturaleza de los suelos o rocas en sus márgenes; además, de los factores hidrogeológicos que afectan a los regímenes de descarga o avenidas del río Tambo en periodos cortos de tiempo. Según observaciones de campo, en la margen izquierda del río Tambo se desarrolla el desgaste de sus terrazas a lo largo de 5.5 km en dirección SO, siendo necesario reforzar sus riberas (Figuras 46 y 47).



Figura 47: Margen izquierda del río Tambo en continuo proceso e rosión.

**.- Inundaciones:** Se producen por la saturación y desborde del cauce principal del río en un determinado lugar y en épocas de lluvias intensas y prolongadas, lo cual genera que el río supere su límite. Los daños son en viviendas y zonas agrícolas. El río Tambo nace de la unión de los ríos Paltuture en la margen derecha e Ichuña en la margen izquierda, en las cercanías de la localidad de Arata. El afluente más importante es el río Coralaque, que se encuentra aguas abajo del río Tambo. El caudal promedio del río es de  $39.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , sobre una

longitud de 276 km y una pendiente promedio de 1.4%, siendo más acentuada en los sectores altos.



Figura 47: En la margen derecha del río no existe revestimientos, por lo tanto, el desborde del río afectaría a viviendas y campos de sembrío.

En Cochachaca, las inundaciones se originan en la margen derecha del río, debido a que las defensas ribereñas no se encuentran reforzadas, principalmente en un tramo de 4 km ubicada en el extremo SO de la ciudad, Figura 48.



Figura 48: Margen derecha del río Tambo con defensas ribereñas que no alcanzan más de 2.5 metros de altura; por tanto, son proclives al desborde.

## 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 Cochachaca se recolectó información según las siguientes técnicas:

**- Exploraciones a cielo abierto** (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Cochachaca se construyeron 5 calicatas (Tabla 3 y Figura 49), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.2 metros y la mínima de 1.1 metros (ver Anexos). La profundidad varía porque en algunos suelos se encontró materiales muy compactos y difíciles de excavar como los caliches.

Tabla 3: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
C - 01	206634	8108706	86	2.70
C - 02	205.246	8108505	82	3.20
C - 03	203761	8107744	91	3.30
C - 04	203231	8106048	15	1.10
C - 05	203380	8106140	49	3.20

**- Densidad de suelo in situ** (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó ensayos de campo aplicando el método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales (ver Anexo). Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 4 se presenta 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 4 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 5), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 3.20 metros y la mínima en el resto del orden de 0.30 cm (ver Anexos), debido principalmente a que los suelos están constituidos por

gravas arenosas. 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 Cochachaca.

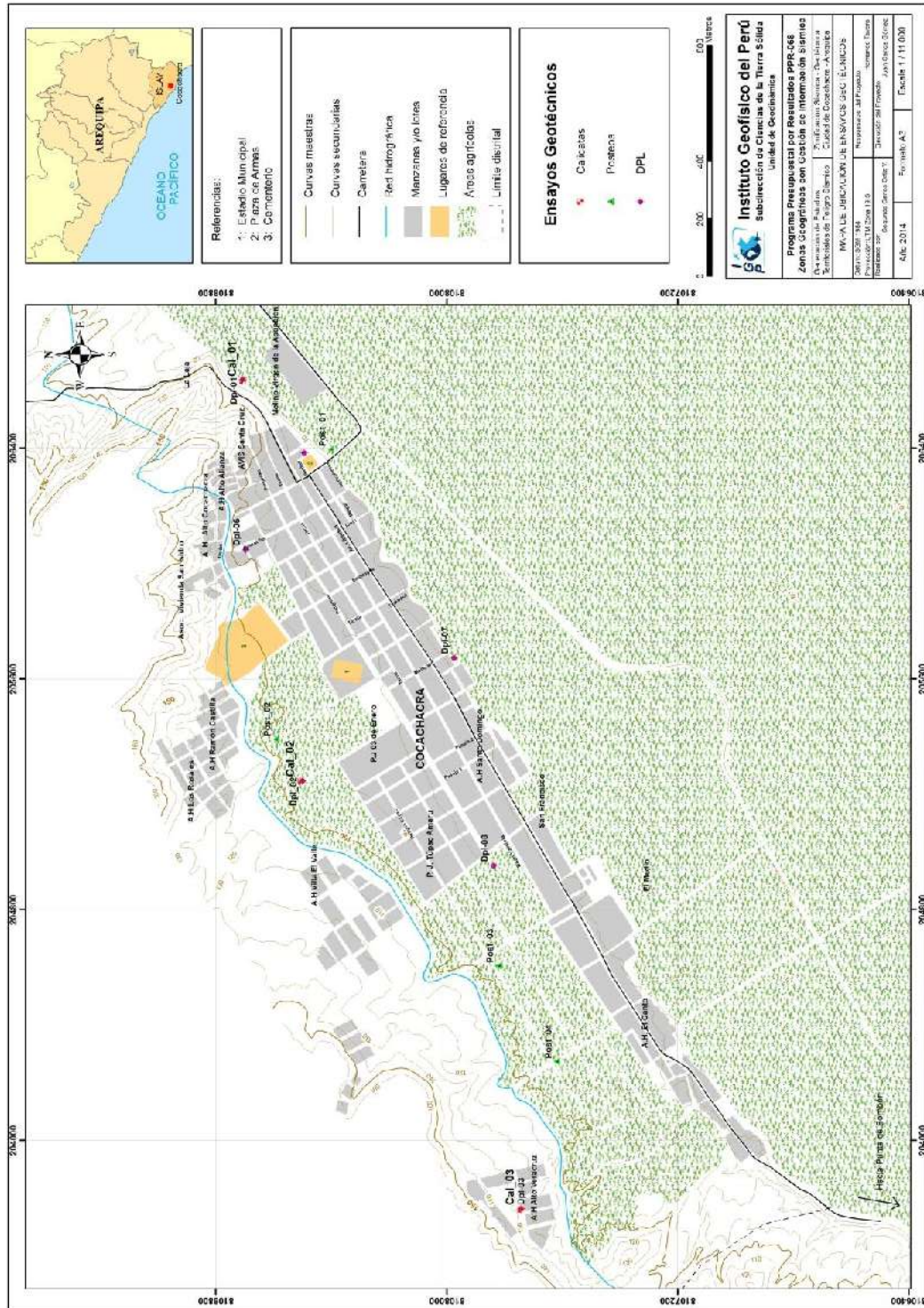


Figura 49: Mapa de ubicación de calicatas y posteos de suelos en la ciudad de Cochachaca

Tabla 4: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Cochachaca

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
C - 01	DC-C - 01	2.70	1.35	1.27
C - 02	DC-C - 02	3.20	1.86	1.82
C - 03	DC-C - 03	3.30	1.46	1.43
C - 04	DC-C - 04	0.40	1.34	1.25
C - 05	DC-C - 05	3.00	1.43	1.04

Tabla 5: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en la ciudad de Cochachaca

POSTEOS	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
Post - 01	206397	8108400	70	3.20
Post - 02	205391	8108591	98	0.30
Post - 03	204605	8107820	91	0.50
Post - 04	204273	8107618	87	0.80

**- 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 Cochachaca (Tabla 6). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 2.55 metros y mínima de 0.16 metros debido a que los suelos son de origen aluvial y están conformados por gravas y arenas bien gradadas con ángulos de fricción promedio de 26.8° a 39.7°, característico de suelos semicompactos a compactos que indican presentar resistencia al corte, siendo favorable para las cimentaciones. Solo en el punto DPL-01, se llegó a profundidades de 2.55 metros debido a que el suelo está conformado por gravas limosas (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 7. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Cochachaca presentan cohesión baja; es decir, que tiene consistencia muy blanda a blanda; mientras que, los ángulos de fricción interna superan los 28°, propios de suelos compuestos por arenas sueltas bien gradadas con contenido de gravas.

Tabla 6: Coordenadas UTM para la ubicación y profundidad de los ensayos de penetración ligera

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
DPL-01	206639	8108706	53	2.55
DPL-02	205247	8108500	103	0.27
DPL-03	203763	8107742	124	0.88
DPL-04	203236	8106046	60	0.16
DPL-05	206383	8108493	68	1.30
DPL-06	206049	8108696	97	2.16
DPL-07	205673	8107975	63	0.18
DPL-08	204952	8107837	79	0.28

Tabla 7: Valores obtenidos para el ensayo de corte directo en la ciudad de Cochachaca

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m <sup>2</sup> )	Densidad natural (gr/cm <sup>3</sup> )
C - 1	37.28	0.10	1.95
C - 2	37.77	0.00	1.95
C - 3	31.71	0.10	1.88
C - 4	29.80	0.10	--
C - 5	28.20	0.20	--

### 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 de los datos del ángulo de fricción y de 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 Cochachaca 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 8). La clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 9 y los resultados de muestran en la Figura 50.

Tabla 8: Capacidad de carga admisible en los suelos de la ciudad de Cochachaca.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
C - 1	177.21	4.43
C - 2	191.65	4.79
C - 3	80.08	2.67
C - 4	57.74	1.92
C - 5	54.95	1.83

Tabla 9: Rangos establecidos para la capacidad portante en la ciudad de Cochachaca

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Denominación	Características
< 1.0	MUY BAJA	
1.0 - 2.0	BAJA	Suelos sueltos
2.0 - 3.0	MEDIA	Suelos moderadamente compactos
> 3.0	ALTA	Suelos compactos

Según estos resultados, la capacidad portante de los suelos es:

.- **Capacidad portante baja:** corresponde al 9% de la superficie del área de estudio y considera a los AAHH Veracruz Chica y el Instituto Valle del Tambo.

.- **Capacidad portante media:** corresponde al 6% de la superficie del área de estudio y considera al AAHH Alto Veracruz.

.- **Capacidad portante alta:** corresponde al 85% de la superficie del área de estudio y considera a los PPJJ Molino Virgen de la Asunción y Túpac Amaru.



## 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 Cochachaca. Se ha identificado la existencia de 6 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 51 y Tabla 10):

*.- **Suelos tipo GP:** Están conformados por gravas arenosas mal gradadas. Su contenido de humedad es de 4.00 %; por lo tanto, se les considera como suelos semicompactos que no presenta plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Su capacidad de carga admisible es de 4.79 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos ocupan el 5 % de la superficie del área de estudio y básicamente se les encuentra en el PJ Túpac Amaru.*

*.- **Suelos tipo GM:** Están conformados por gravas arenosas limosas con contenido de humedad de 4.10%. Se les considera como suelos semicompactos a compactos y no presentan plasticidad (debido a la poca presencia de material fino). Su capacidad de carga admisible es de 4.43 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos ocupan el 2% de la superficie total del área de estudio y han sido identificados en el Molino Virgen de la Asunción.*

*.- **Suelos tipo SW:** Están conformados por arenas gravosas limosas con contenido de humedad de 2.5%; por lo tanto, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos a medianamente compactos y no presentan plasticidad. Su capacidad de carga admisible es de 2.67 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos representan el 1 % de la superficie de estudio y han sido identificados en el AAHH Alto Veracruz.*

*.- **Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal gradadas con contenido de humedad de 3.5%; por lo tanto, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos a medianamente compactos y no presentan plasticidad. Su capacidad de carga admisible de 1.92 Kg/cm<sup>2</sup> y representan el 1 % del área de estudio y han sido identificados en el AAHH Veracruz Chica.*

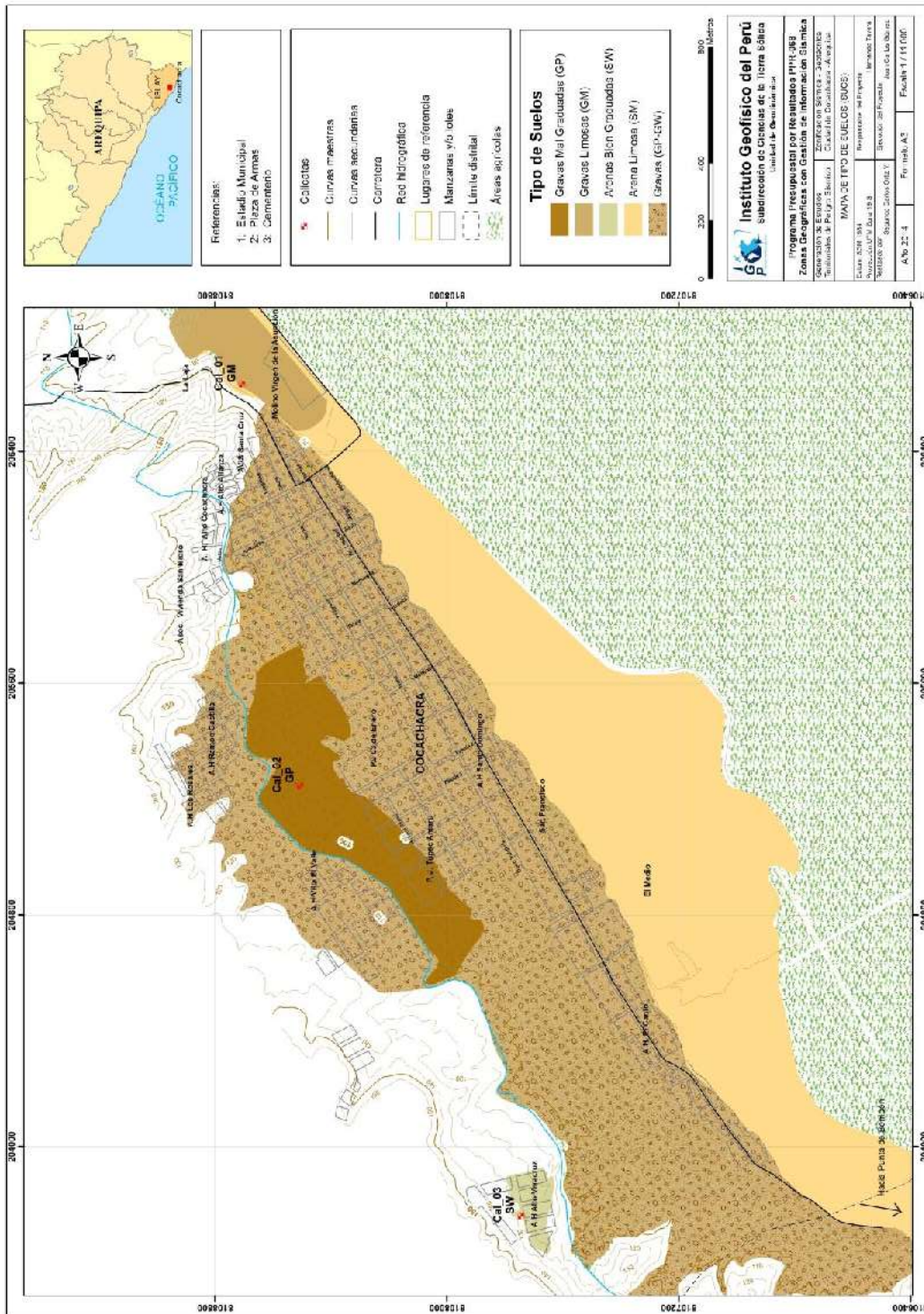


Figura 51: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Cochachaca

**.- Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas, siendo su contenido de humedad de 4.20% a 14.70%; por lo tanto, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es alta. Sus suelos son inconsolidados o sueltos y no presentan plasticidad. Su capacidad de carga admisible es de 1.83 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos suelos representan el 39% de la superficie de estudio y se encuentran en el Instituto Valle del Tambo. Además, el 90% estos suelos son utilizados para áreas agrícola.

**.- Suelos tipo GP-GW:** Conformados por gravas arenosas bien gradada a mal gradadas con poco contenido de material fino (34.1%) y humedad de 1.86 %. Los suelos son semí-compactos y no presentan plasticidad (debido al poco contenido de material fino). Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 52 % del terreno de Cochacra y han sido identificados en los AAHH Ramón Castilla, 3 de Enero, Villa el Valle, Santo Domingo, San Francisco, El Canto y Santa María.

Tabla 10: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Punta de Bombón.

CALICATA	PROF (m)	NF (m)	GRAVAS (>4.76)	ARENAS (>0.074mm, <4.76mm)	FINOS % (<0.074)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	SUCS	DENOMINACION
C - 01	2.70	NP	55	39	6	NT	NP	4.10	GM	Grava arenosa limosa
C - 02	3.20	NP	72	27	1	NT	NP	4.00	GP	Grava arenosa
C - 03	3.30	NP	35	50	15	NT	NP	2.50	SW	Arena gravosa, limosa
C - 04	1.10	NP	5	94	1	NT	NP	3.50	SP	Arena mal gradada
C - 05	3.15	NP	5	60	35	NT	NP	4.20	SM	Arena fina, limosa

## 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 objetivo principal 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 Cochachaca.

### 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 Cochachaca, 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 52 se muestra la distribución espacial de los 134 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 53 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto CO-71. 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, la frecuencia predominante de 6.0 Hz con amplificaciones relativas de hasta 3 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 a la frecuencia de 6 Hz, la energía se irradia principalmente en dirección N-S. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

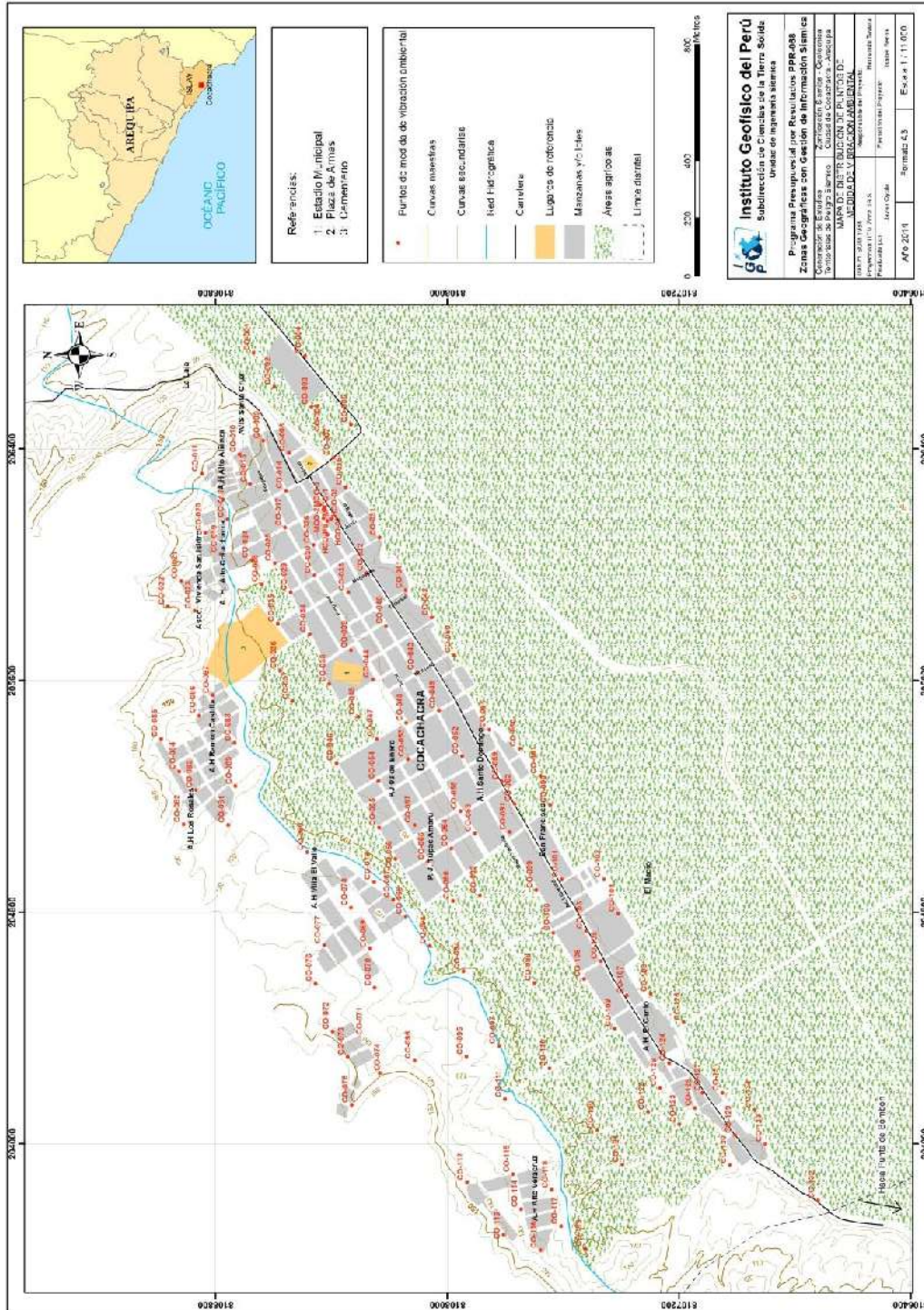


Figura 52: Mapa de la ciudad de Cochachaca y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

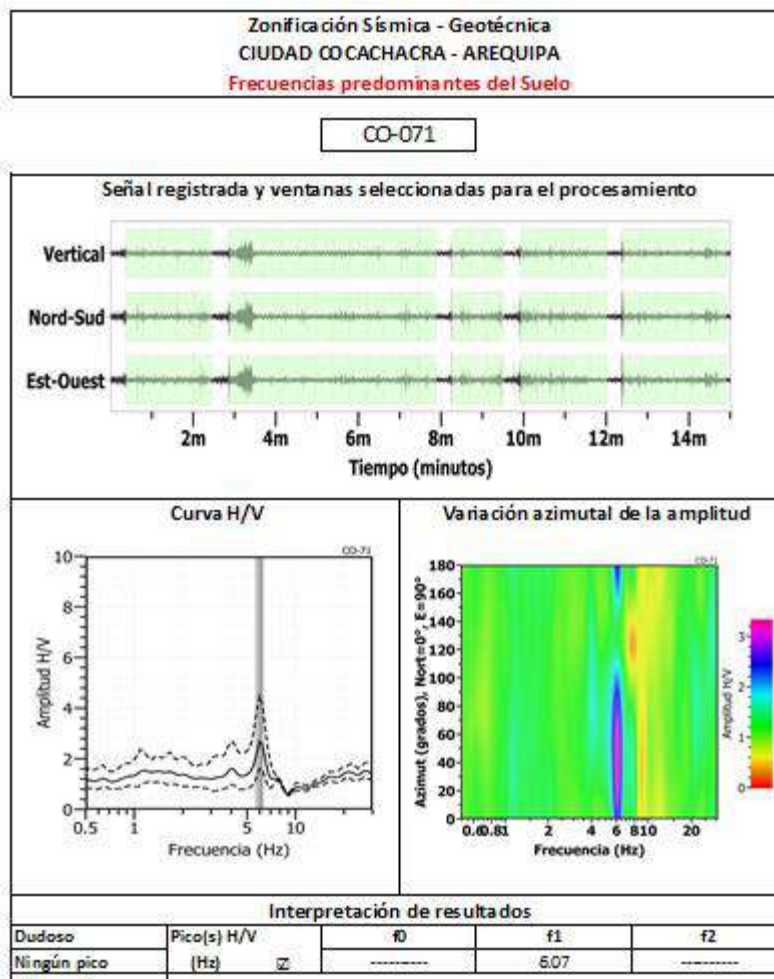


Figura 53: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CO-71 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

**- 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 dos rangos de frecuencia: **F<sub>0</sub>** ( $1.0 > F \leq 10.0$  Hz) y **F<sub>1</sub>** ( $F > 10$  Hz), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Cochachaca.

***.- Frecuencias predominantes F<sub>0</sub>:** Según la Figura 54, este rango de frecuencias se distribuyen de manera uniforme sobre el área de estudio, concentrándose en el sector central de la ciudad valores entre 2.0 a 3.0 Hz, todos rodeados por frecuencias de 4.0 Hz, con tendencia hacia el extremo NO del sector centro. Hacia los extremos NE y SO del área urbana de la ciudad de Cochachaca, los valores se incrementan.*

*En la Figura 55, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos CO-54, CO-58, CO-61, CO-62, CO-63 y CO-64, todos ubicados en el sector central de la ciudad, siendo los valores de 2.0 Hz los que sobresalen con amplificaciones máximas relativas de hasta 3 veces. En los puntos CO-41, CO-46 y CO-56 ubicados en los extremos NO y Este del sector central de la ciudad, sobresalen las frecuencias de 3.6, 3.1 y 2.9 Hz, con amplificaciones entre 2 y 4 veces. Hacia los extremos NE, NO y SO del área urbana, se tiene los puntos CO-39, CO-93 y CO-106, donde sobresalen las frecuencias a 4.1 y 4.5 Hz con amplificaciones de hasta 3 veces. Estos resultados evidencian la existencia de dos zonas con características dinámicas diferentes, cuyas frecuencias predominantes son menores y mayores a 4.0 Hz.*

***.- Frecuencias predominantes F<sub>1</sub>:** según la Figura 54, estas frecuencias se distribuyen de manera dispersa sobre el extremo Este y SO del área de estudio y define la presencia de suelos con espesores mínimos.*

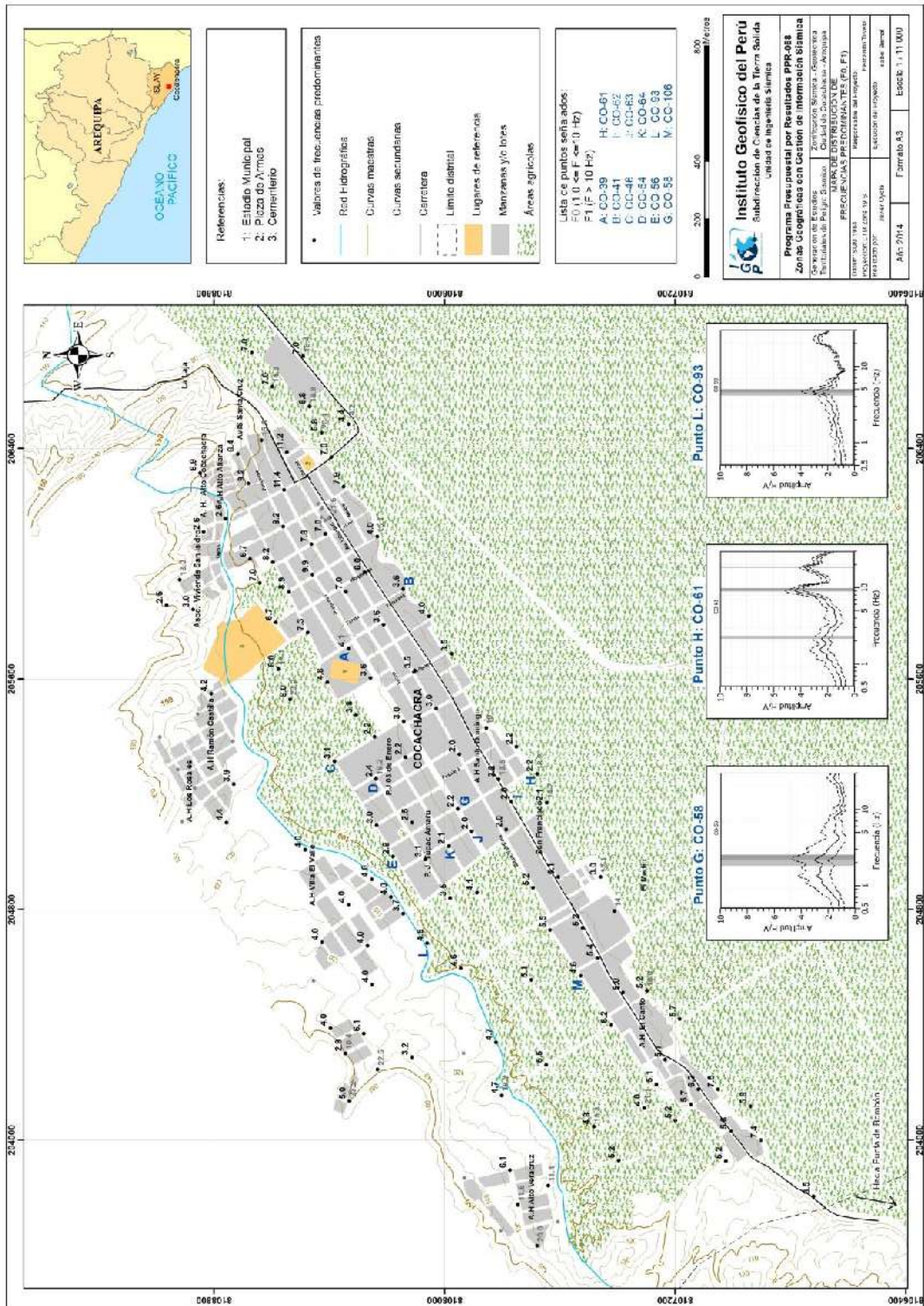
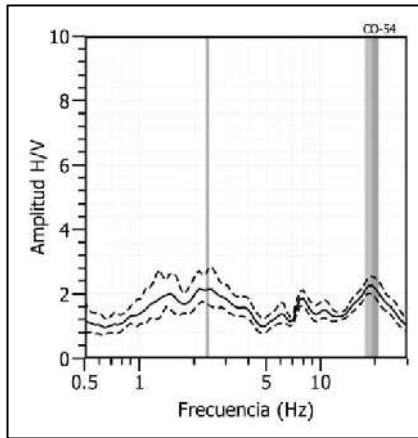
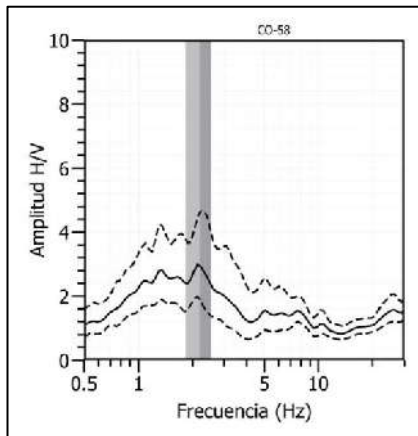


Figura 54: Mapa de la ciudad de Cochachaca y distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_0$  y  $F_1$ . Los gráficos de razones espectrales corresponden a puntos representativos.

**CO - 54**



**CO - 58**



**CO - 64**

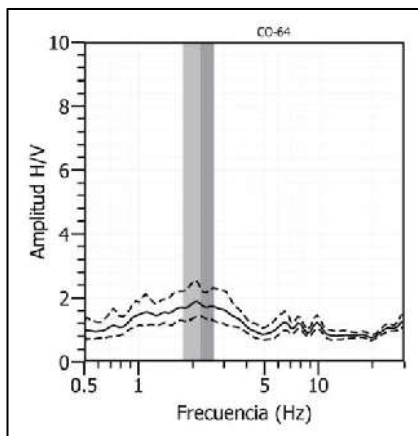
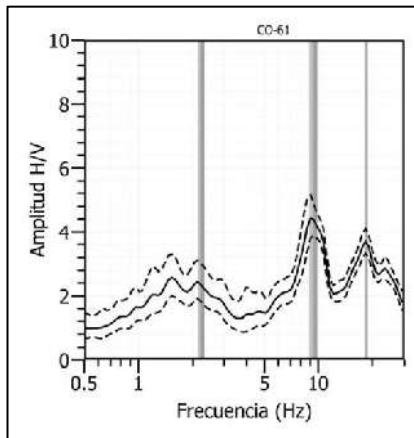
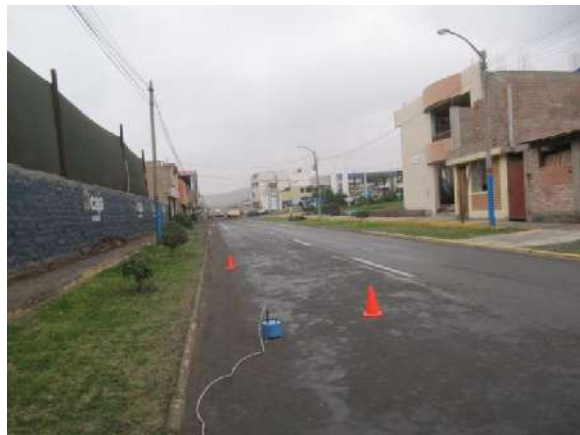
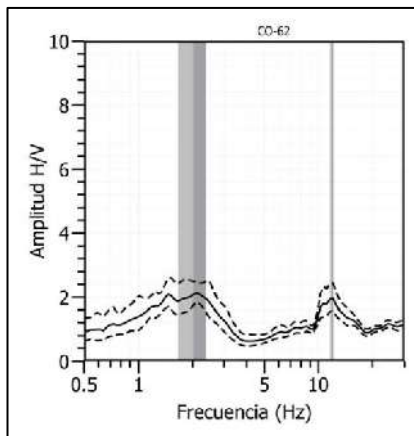


Figura 55: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $1.0 > F \leq 10.0$  Hz): puntos CO-54, CO-58 y CO-64, ubicados el primero, en el área céntrica de la ciudad de Cochachaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

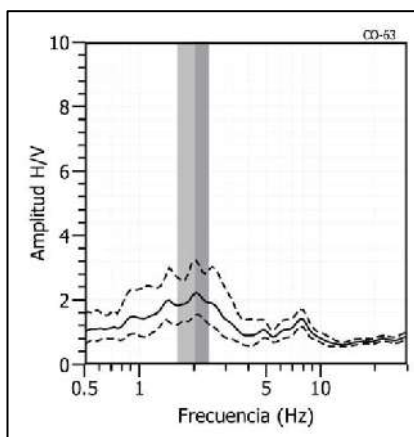
**CO - 61**



**CO - 62**

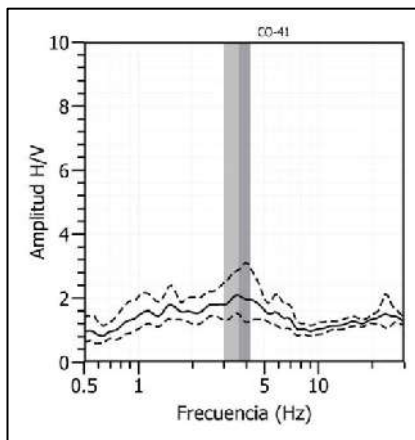


**CO - 63**

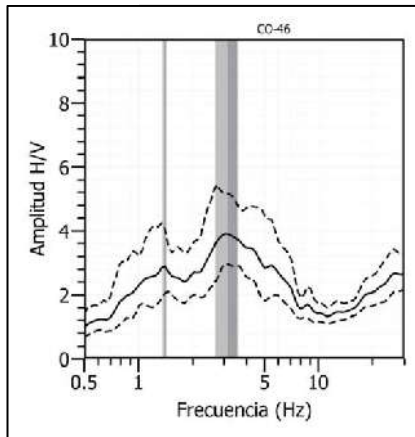


*Figura 55: Continuación...// Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $1.0 > F \leq 10.0$  Hz): puntos CO-61, CO-62 y CO-63, ubicados el primero, en el área céntrica de la ciudad de Cochachaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.*

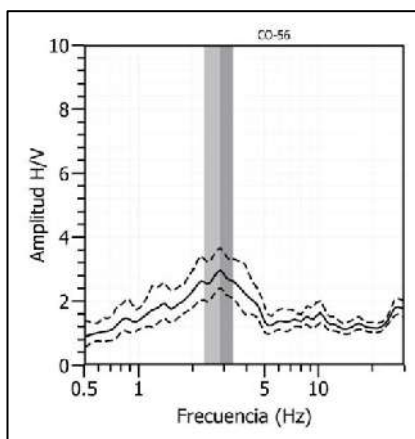
**CO - 41**



**CO - 46**

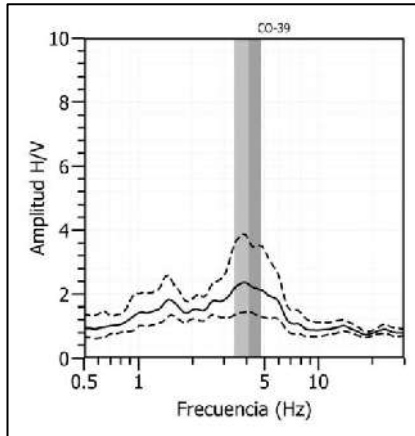


**CO - 56**

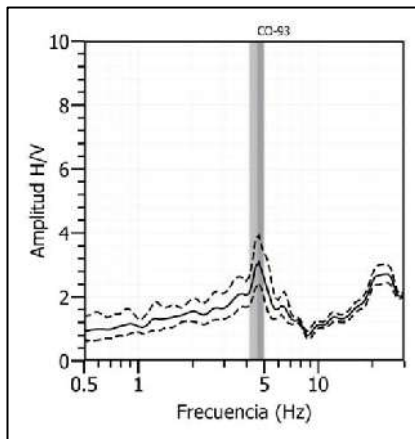


*Figura 55: Continuación...// Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $1.0 > F \leq 10.0$  Hz): puntos CO-41, CO-46 y CO-56, ubicados en los extremos NO y Este de la ciudad de Cochachaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.*

predc **CO - 39**



**CO - 93**



**CO - 106**

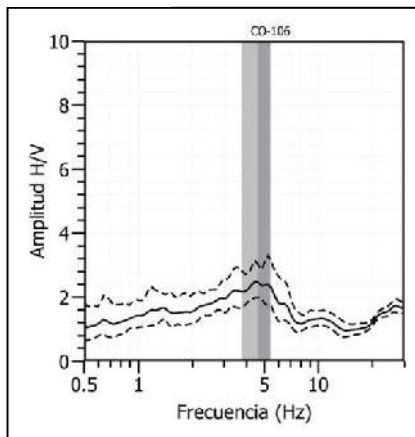


Figura 55: Continuación... // Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $1.0 > F \leq 10.0$  Hz): puntos CO-39, CO-93 y CO-106, ubicados en los extremos NE, NO y SO de la ciudad de Cochachaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### 11.3.- 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 110 dB. Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos (entre 3 y 6 metros) y el punto de impacto del martillo, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos. Para eliminar el registro de ruido de fondo se realizaron entre 6 y 12 golpes en cada punto de disparo, permitiendo el estaqueo temporal de los datos y así, aumentar la coherencia en los resultados.

En la Figura 56, se presenta el mapa de la ciudad de Cochachaca con la distribución espacial de 7 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-CO, ..., LS07-CO, las mismas que consideran un espaciamiento entre geófonos de 4 metros y longitud total de 92 metros. 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)*



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 Cochachaca (Figura 57).

**Línea LS01- CO:** Sondaje realizado en el AA.HH. El Canto, en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se identifica una capa bien definida con un espesor de 16 m y velocidades  $V_s$  de 554 m/s, que estratigráficamente corresponden a suelos muy duros. El semi-espacio, presenta velocidades  $V_s$  mayores a 714 m/s y corresponden a rocas blandas.

**Línea LS02- CO:** Sondaje realizado en el extremo SO del AA.HH. Santo Domingo, en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 26 metros. Se identifica la presencia de dos capas; la primera presenta un espesor de 9 metros con velocidades  $V_s$  de 494 m/s y la segunda de 15 metros con velocidades  $V_s$  de 679 m/s, ambas corresponden a suelos muy duros a roca blanda. El semi-espacio presenta velocidades  $V_s$  mayores a 900 m/s y corresponden a rocas moderadamente duras.

**Línea LS03-CO:** Sondaje realizado en el AA.HH. Alto Veracruz, en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 24 metros. Se ha identificado la presencia de una capa con espesor de 11 metros y velocidades  $V_s$  de 614 m/s, que estratigráficamente corresponden a suelos muy duros. El contacto con el semi-espacio, presenta velocidades  $V_s$  mayores a 785 m/s y corresponden a rocas blandas.

**Línea LS04-CO:** Sondaje realizado al NO del AA.HH. Santo Domingo, en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 16 metros. Se ha identificado la presencia de una capa de 5 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 430 m/s que estratigráficamente corresponden a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, presenta velocidades  $V_s$  mayores a 593 m/s y corresponden a suelos muy duros.

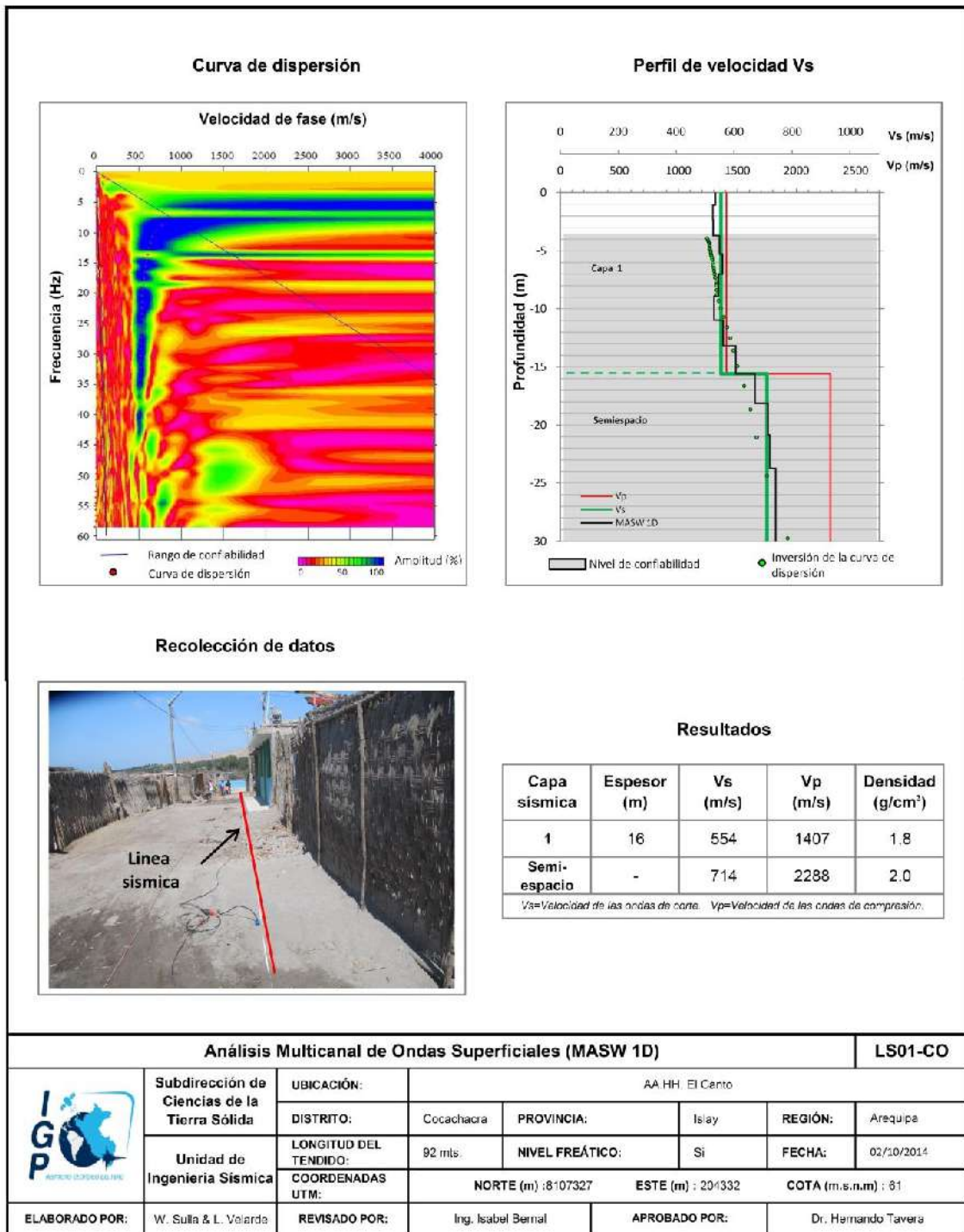


Figura 57: Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS01-CO

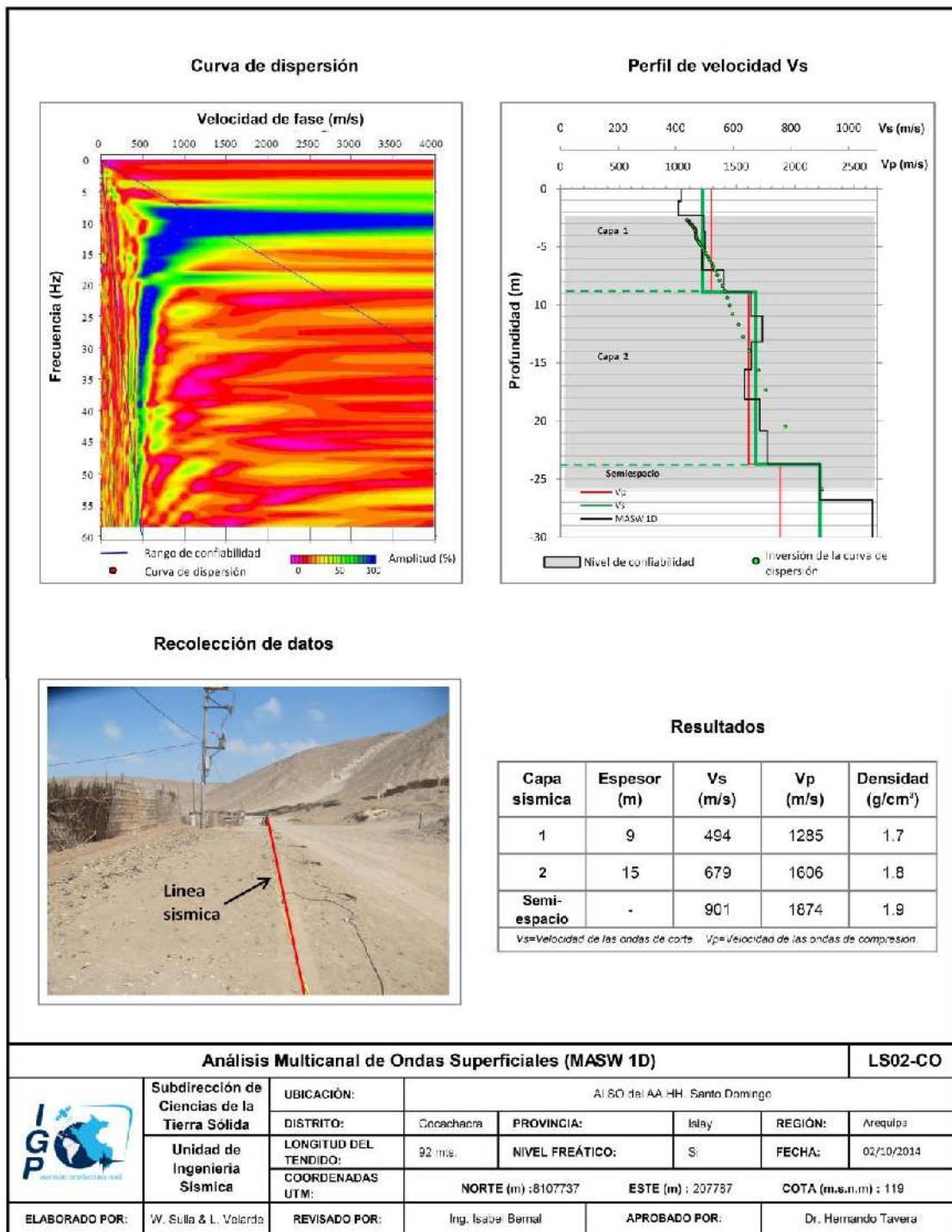


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS02-CO

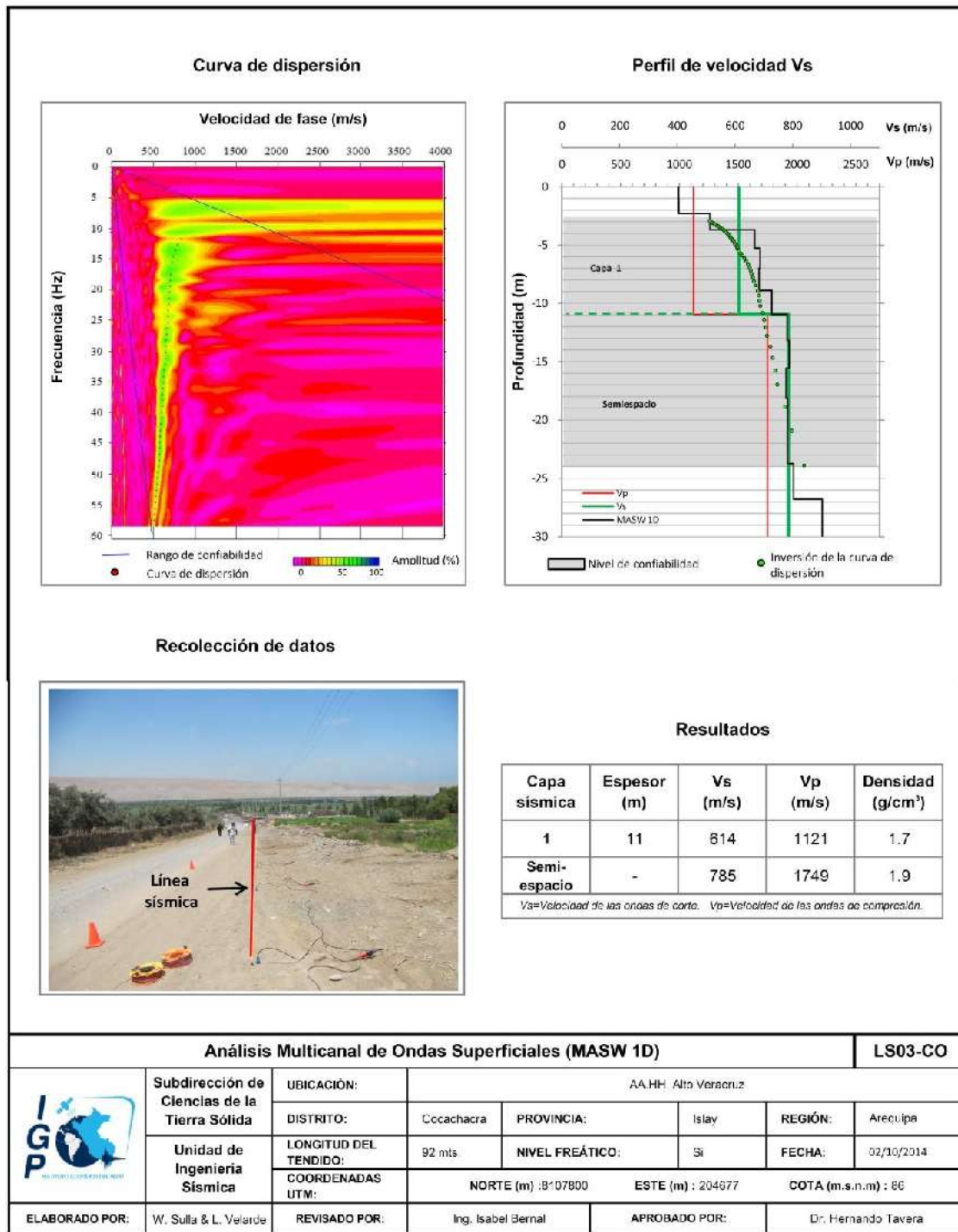


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS03-CO

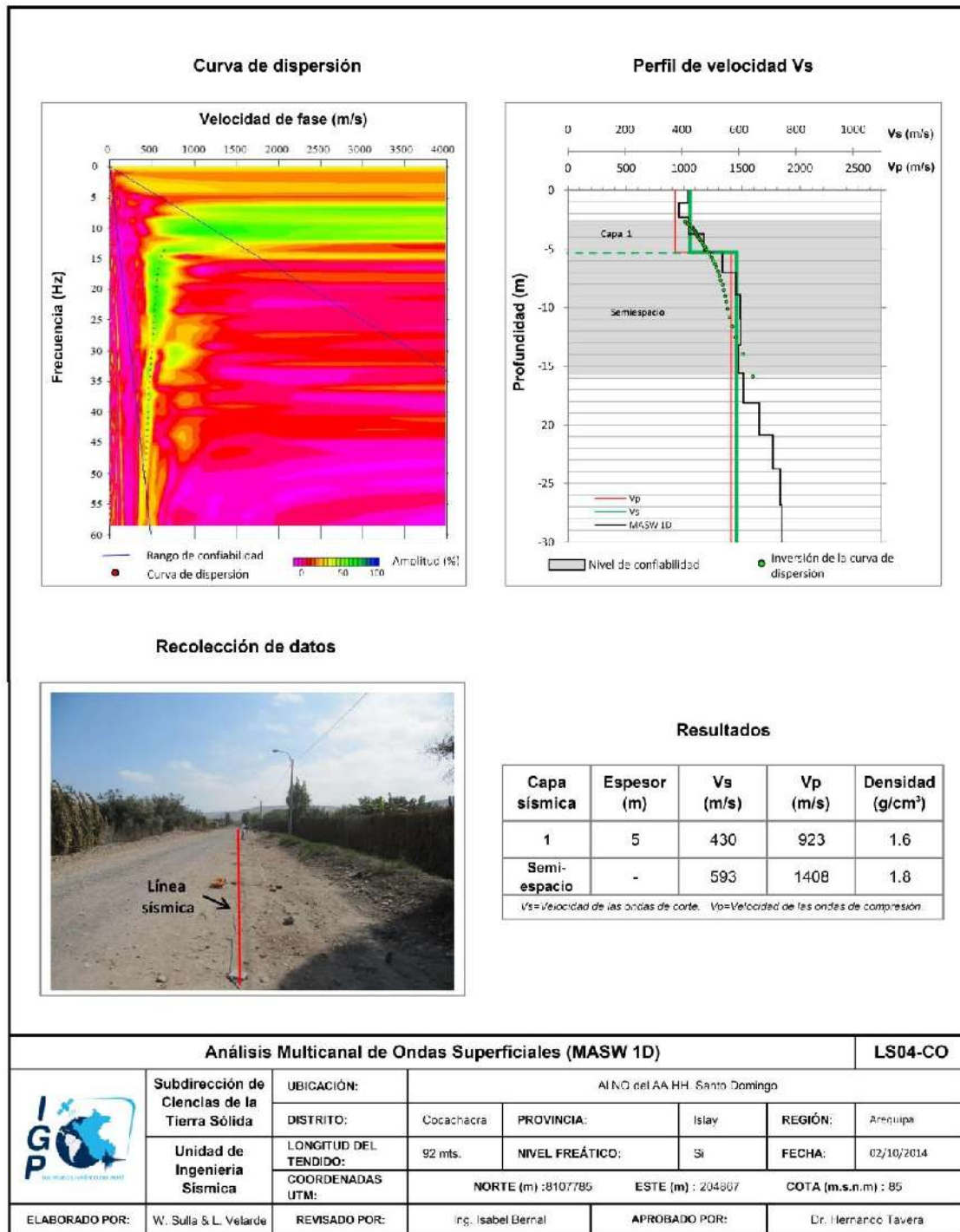


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS04-CO

**Línea LS05-CO:** Sondaje realizado en el PJ Túpac Amaru, en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 26 metros. Se ha identificado la presencia de una capa de 11 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 425 m/s que estratigráficamente corresponden a suelos duros. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades  $V_s$  mayores a 680 m/s y corresponden a suelos muy duros.

**Línea LS06-CO:** Sondaje realizado en Santo Domingo y en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 16 metros. Se ha identificado la presencia de una capa de 9 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 265 m/s que estratigráficamente corresponden a suelos duros. El semi-espacio, presenta velocidades  $V_s$  mayores a 655 m/s y corresponden a suelos muy duros.

**Línea LS07-CO:** Sondaje realizado en la Asoc. San Isidro y en donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S ( $V_s$ ) son confiables hasta una profundidad de 20 metros. Se ha identificado la presencia de una capa de 16 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 407 m/s que estratigráficamente corresponden a suelos duros. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades  $V_s$  mayores a 592 m/s y corresponden a suelos muy duros.

Los resultados obtenidos evidencian la presencia de suelos duros a muy duros (400 a 600 m/s), que conforme aumentan su espesor en profundidad, también incrementan su velocidad. Únicamente en el AAHH Santo Domingo la velocidad  $V_s$  disminuye considerablemente y puede ser debido a la presencia de terrenos de cultivo con la presencia de niveles freáticos. De acuerdo a la geología regional, los sondajes se encuentran emplazados sobre depósitos fluviales (terrazas) y aluviales que suprayacen a rocas granodioríticas fracturadas y alteradas, las cuales afloran en algunas áreas de la ciudad.

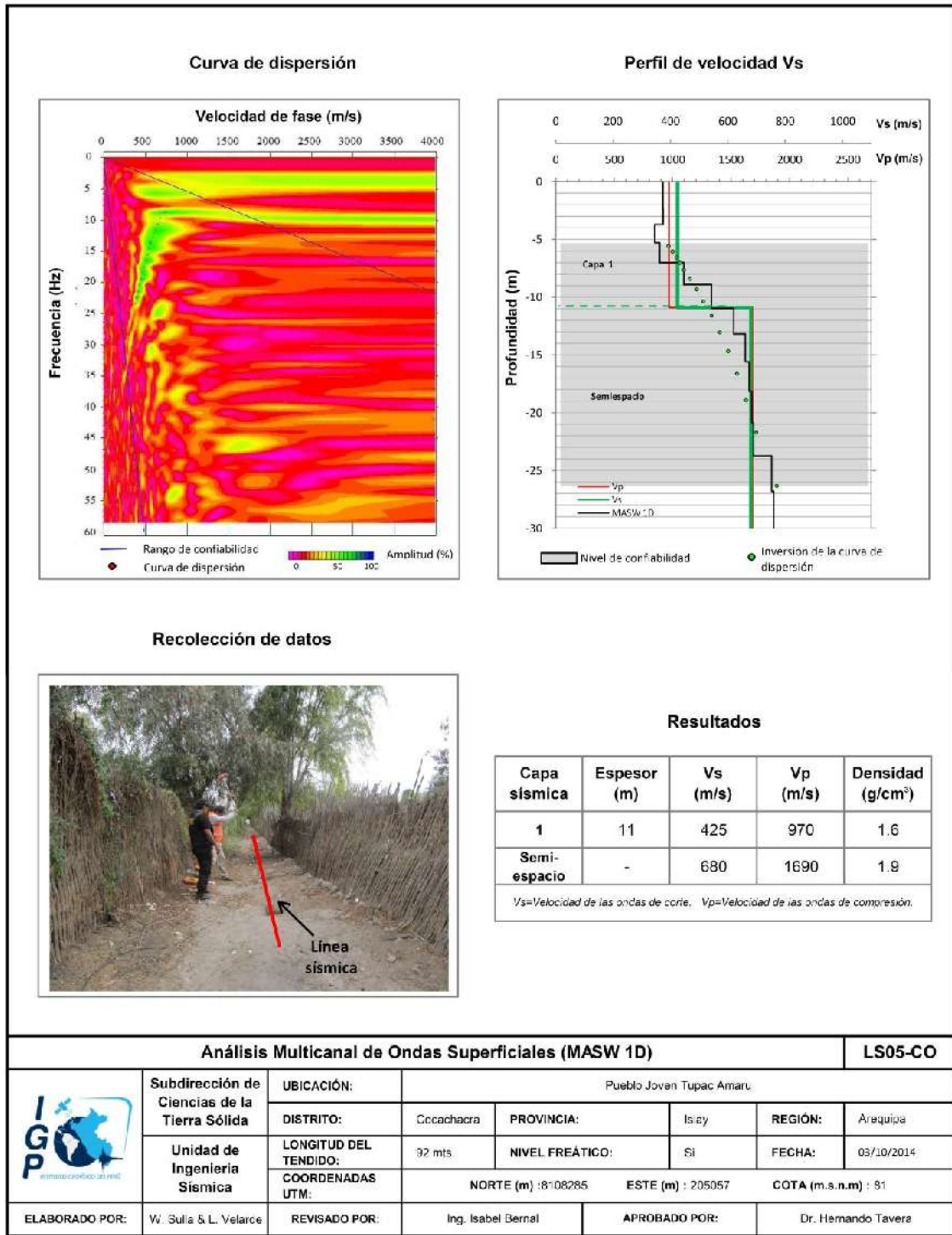


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS05-CO

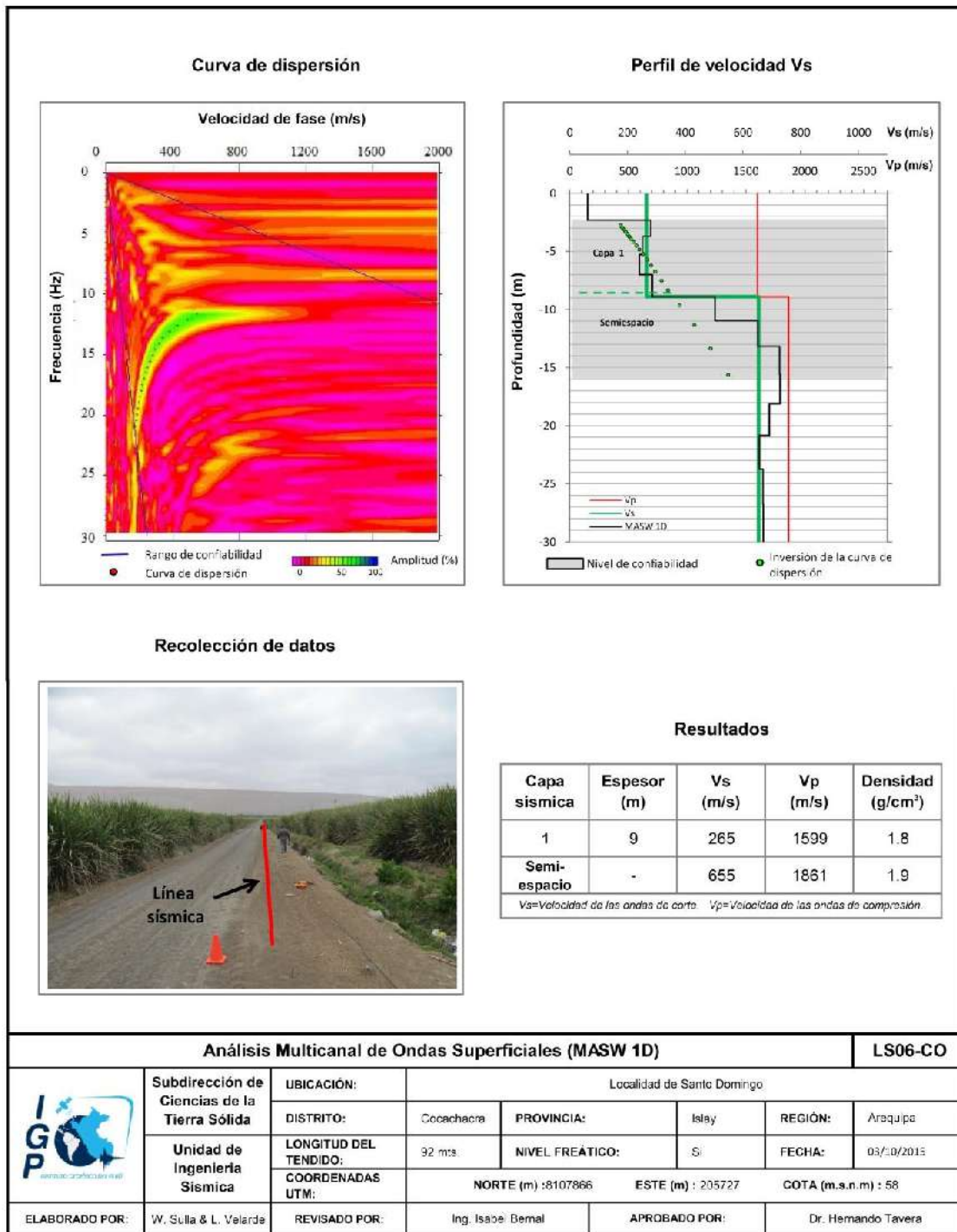


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS06-CO

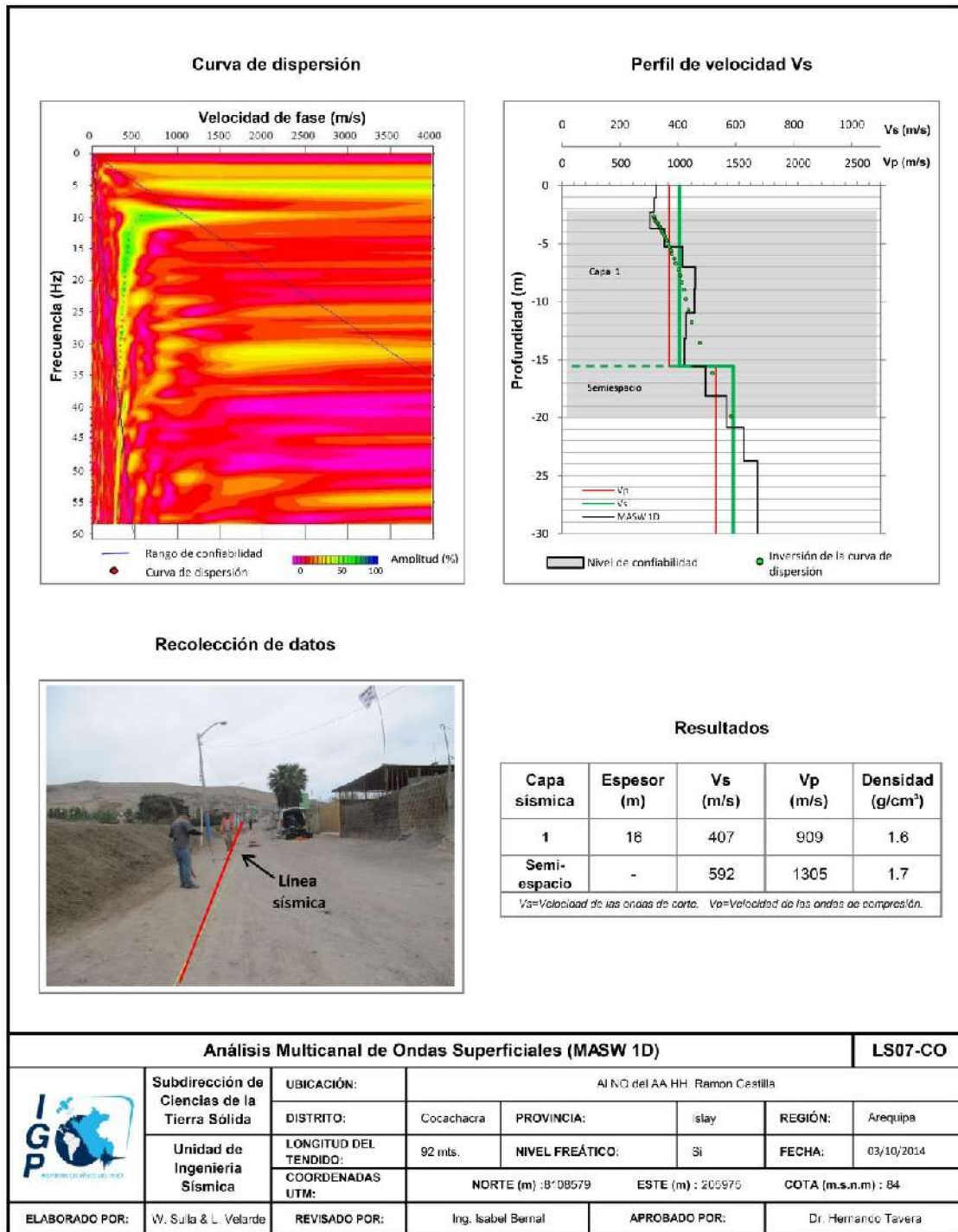


Figura 57: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS07-CO

### 11.3.- Periodos Dominantes

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 58 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Cochachaca. Los resultados obtenidos permiten definir la existencia de áreas con periodos entre 0.3 y 0.5 segundos distribuidos en el sector central de esta ciudad, sobre el PJ Túpac Amaru y en el AAHH Santo Domingo. Periodos entre 0.1 a 0.2 segundos se encuentra en los extremos NE, SO y NO del área de estudios, todos bordeando a la primera área. Hacia el extremo Este de la ciudad, sobresalen periodos que fluctúan entre 0.5 y 0.6 segundos con amplificaciones mínimas que deben ser considerados para la evaluación local del comportamiento dinámico de los suelos. Estos valores de periodos sugieren la presencia de dos tipos de suelos, de moderado espesor que dominan el comportamiento dinámico de los suelos en la ciudad de Cochachaca.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Cochachaca 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 500 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.1, 0.2 y 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 12 a 35 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

*El mapa de periodos dominantes muestra la presencia de dos áreas con suelos dinámicamente similares. Los periodos mayores e iguales a 0.3 segundos se encuentran en el 60% del total de la superficie de la ciudad y sugiere la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran potencia que domina el comportamiento dinámico de los suelos esta ciudad. Los periodos menores a 0.3 segundos, se encuentran distribuidos hacia los extremos, lo cual sugieren la disminución en el espesor de la capa superficial; es decir, coherente con la*

morfología local. Asimismo, hacia el sur (zonas de cultivo), el alto nivel freático contribuye a que estos suelos presenten efectos especiales asociados a la dinámica local del subsuelo.

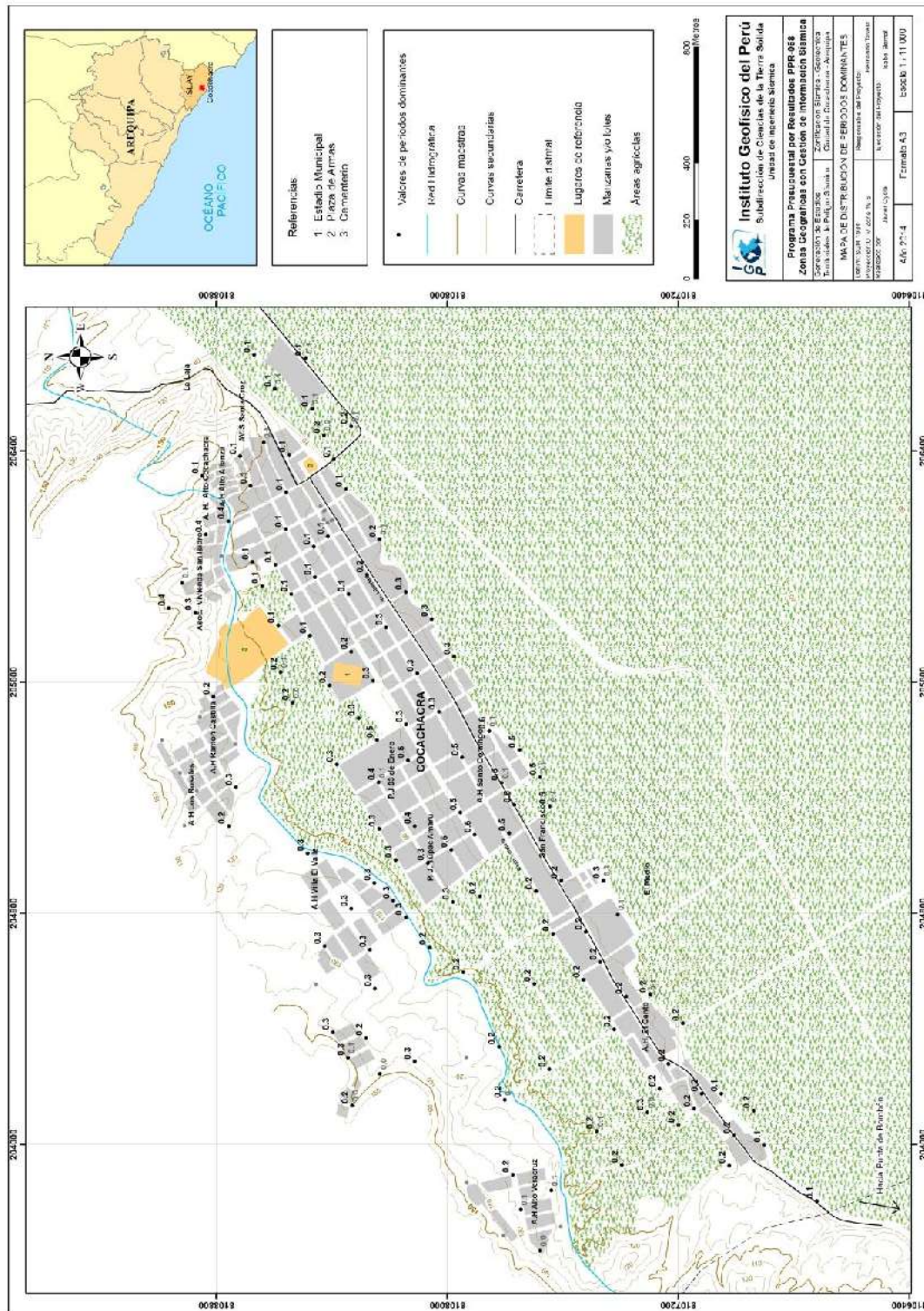


Figura 58: Mapa de la ciudad de Cochachaca y distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

#### 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 Cochachaca se han realizado 5 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 25 electrodos con un espaciamiento de 3, 6 y 10 metros y sobre tendidos longitudinales de 74, 144, 190 y 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 12, 20 y 30 metros (Figura 59).

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 Cochachaca (Figura 60).

**Sección geo-eléctrica L01-CO:** Sección realizada en el extremo SO del sector central de Cochachaca, aproximadamente a 90 metros de la Av. Libertad, próximo a terrenos de cultivo. En esta sección predominan valores bajos resistivos y muy bajos resistivos. En la parte superficial se identifica valores de 101 a 500 ohm.m que se distribuyen hasta una profundidad promedio de 5 metros, para luego incrementarse en superficie entre los electrodos 42 y 50, hasta una profundidad promedio de 3 metros. A lo largo de la línea se distribuyen valores entre 20 y 100 ohm.m, a profundidades variables, siendo más notorios entre los electrodos 58 y 80. Valores de resistividad entre 5 y 20 ohm.m están presentes en la sección a profundidades variables. Para esta sección, la presencia de terrenos de cultivo son los causantes de la saturación del terreno.

**Sección geo-eléctrica L02-CO:** Sección realizada en el extremo oeste del sector central del área urbana de Cochachaca. En esta sección, predominan valores resistivos. A lo largo de la línea se identifica valores entre 101 y 500 ohm.m, con espesores variables entre la superficie y niveles mayores en profundidad. Valores entre 501 y 3114 ohm.m se distribuyen en la parte superficial entre los electrodos 88 y 132 hasta una profundidad promedio de 15 metro. A niveles más profundos, se tiene valores entre 5 y 100 ohm.m.



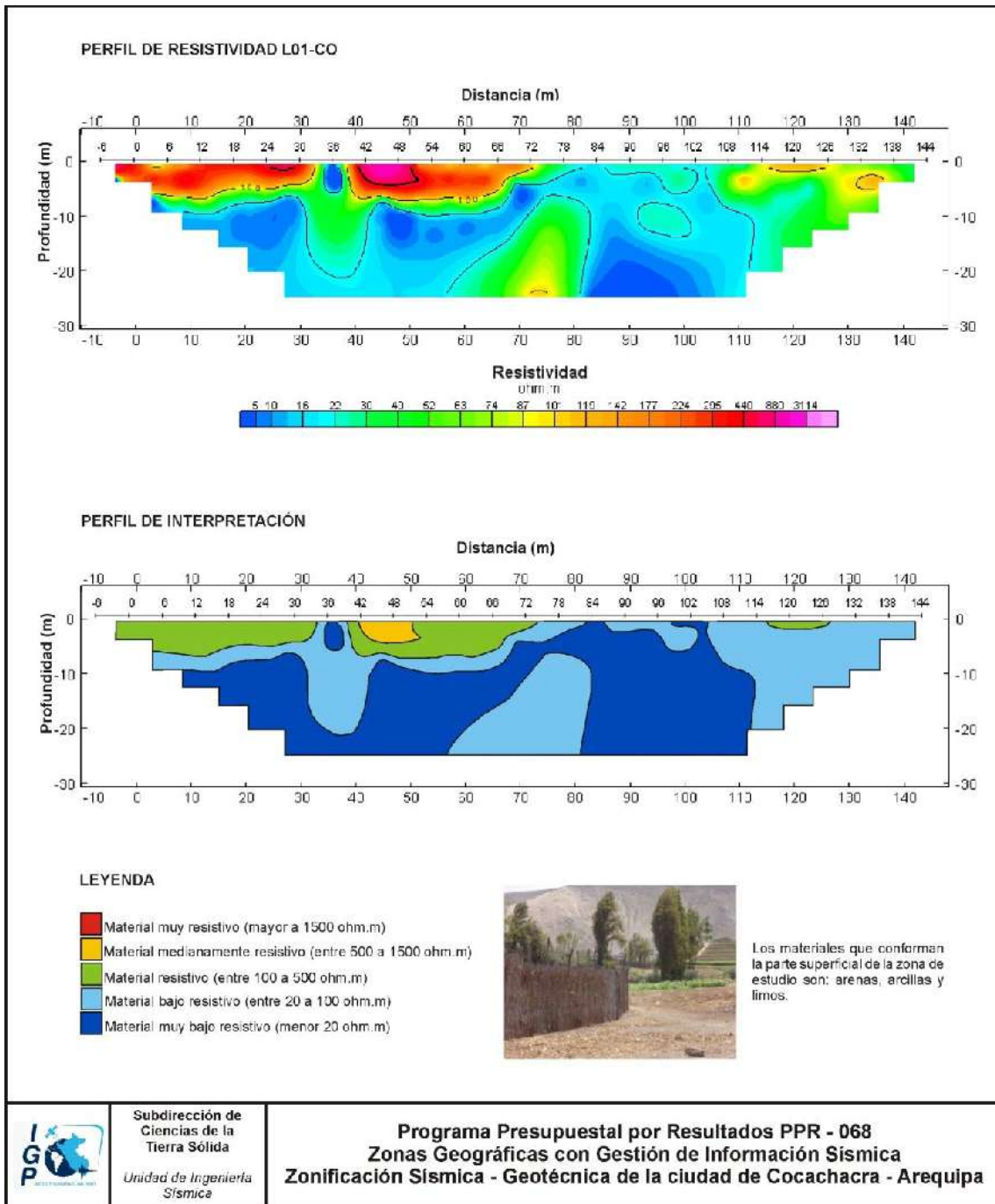


Figura 60: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-CO.

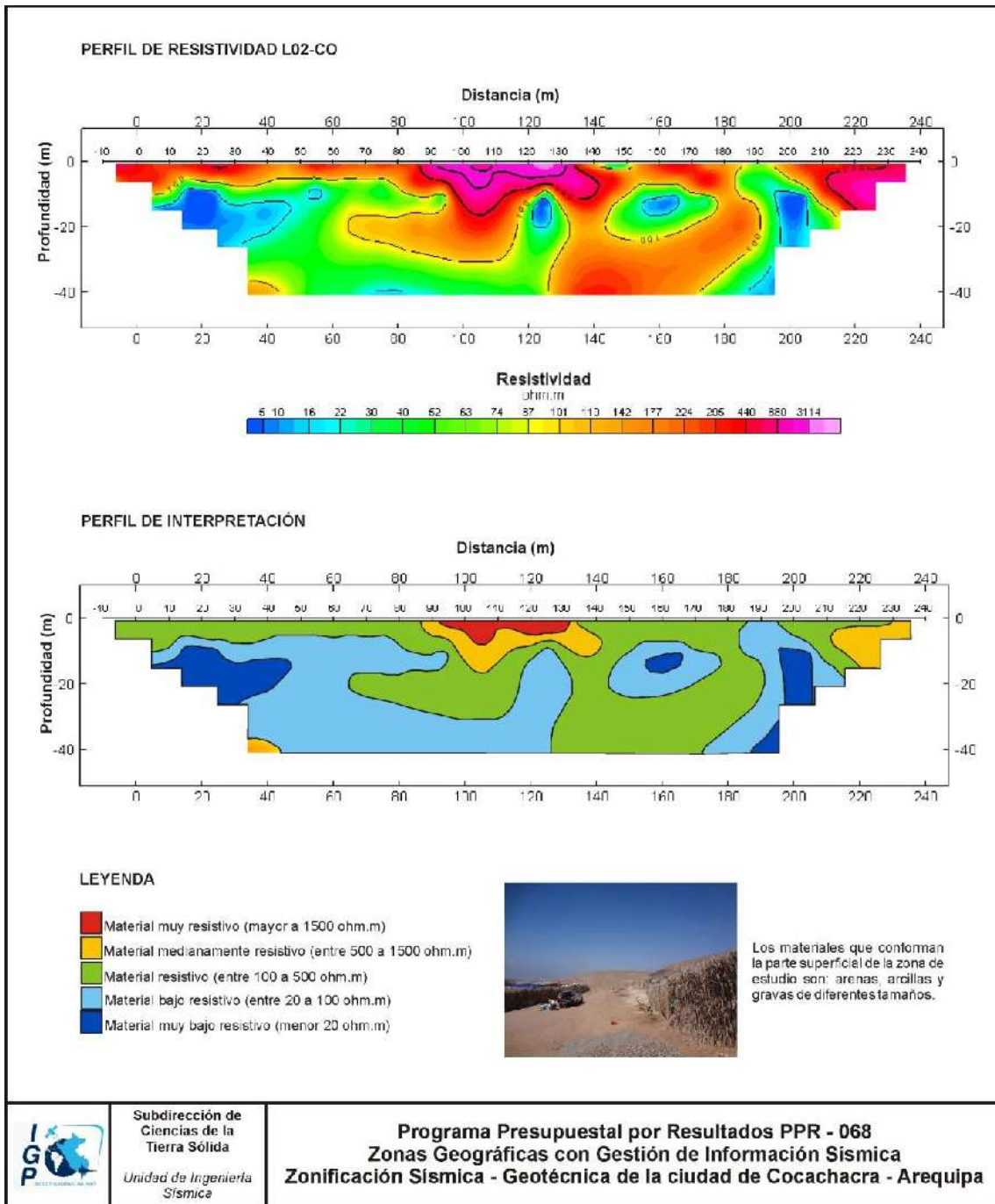


Figura 60: Continuación::: // Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-CO.

**Sección geo-eléctrica L03-CO:** Sección realizada en el extremo oeste del sector central del área urbana de Cochachaca, aproximadamente a 90 metros de la calle Deán Valdivia. En esta sección predominan valores resistivos a bajos resistivos. En la sección se identifica valores entre 100 y 500 ohm.m, con formas y espesores variables. Estos valores toman la forma de un dique entre los electrodos 110 y 130, desde la superficie hasta el nivel más profundo de la sección. Entre los electrodos 68 y 93 se concentran valores de resistividades que están entre 500 y 3114 ohm.m,. Valores entre 5 y 100 ohm.m se distribuyen en los extremos profundos de la sección. A lo largo de la línea se identifica la presencia de vegetación, lo que sugiere que los suelos están saturados y conformados por gravas con granos de tamaños variados.

**Sección geo-eléctrica L04-CO:** Sección realizada en el sector central del área urbana de Cochachaca, aproximadamente a 70 metros de la Av. Libertad. En esta sección predominan valores muy resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores mayores a 1500 ohm.m, a niveles de profundidad variable alcanzando como máximo 8 metros. Por debajo, los valores de resistividad son de 500 y 1500 ohm.m. A mayores profundidades los valores fluctúan entre 5 y 100 ohm.m, por en los extremos de la sección. Estos valores de resistividad podrían ser debido a la filtración de un canal de regadío que esta paralelo a la línea.

**Sección geo-eléctrica L05-CO:** Sección realizada en el extremo Este del área urbana, próximo al cementerio. En esta sección predominan valores bajo resistivos. A lo largo de toda la sección se identifica valores entre 22 y 100 ohm.m, desde la superficie hasta los niveles más profundos de la sección. Entre los electrodos 28 y 98 se distribuyen valores entre 100 y 500 ohm.m; mientras que, los valores más altos fluctúan entre 500 y 1500 ohm.m, asumiendo la forma de un elipsoide entre los electrodos 66 y 80 (entre 5 y 15 metros de profundidad). Por otro lado, la saturación de los suelos se debe a la proximidad de la línea con terrenos de cultivo y canales de regadío. Los materiales que conforman la parte superficial son suelos de tipo arcilloso, limoso y gravas.

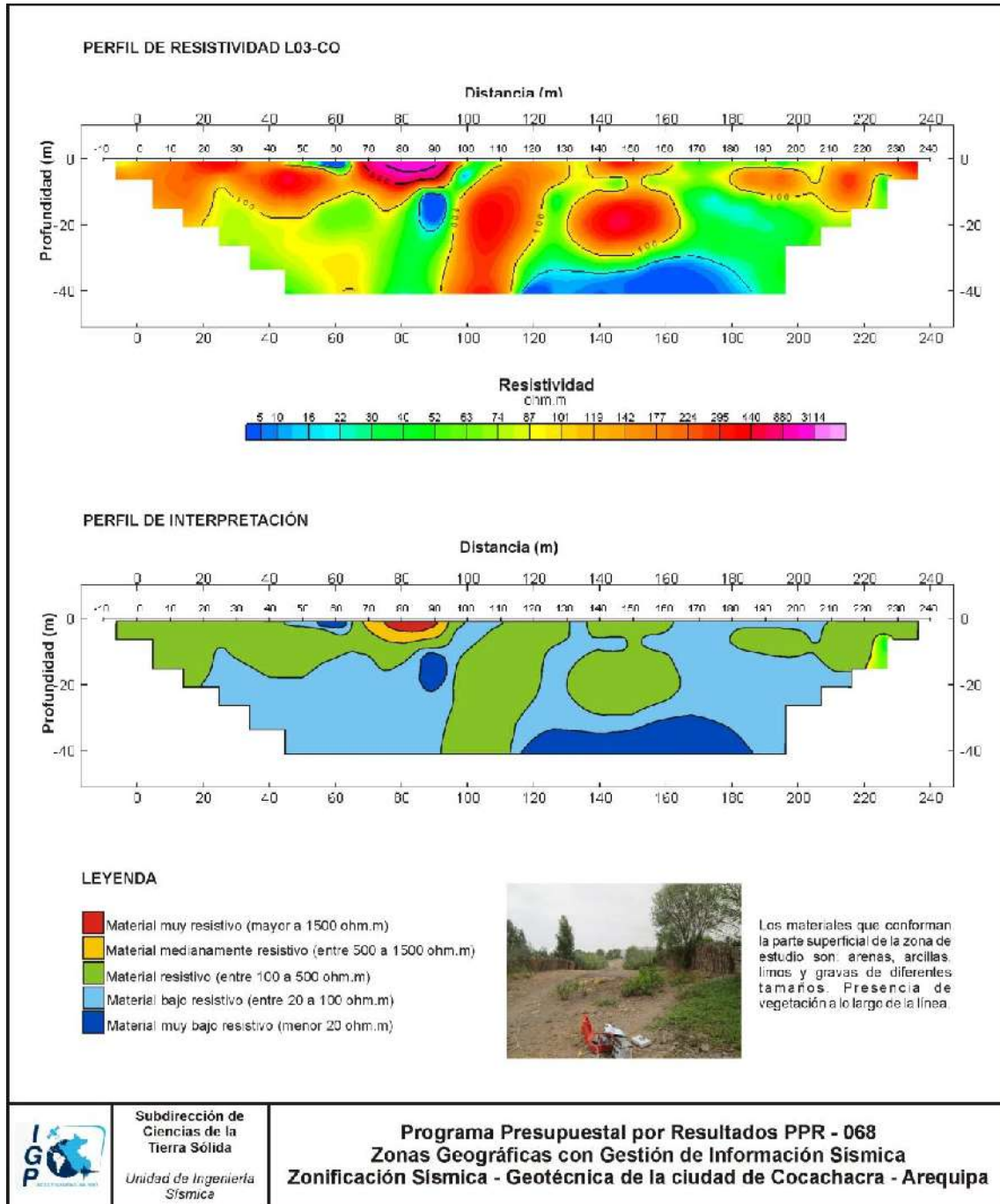


Figura 60: Continuación::: // Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-CO.

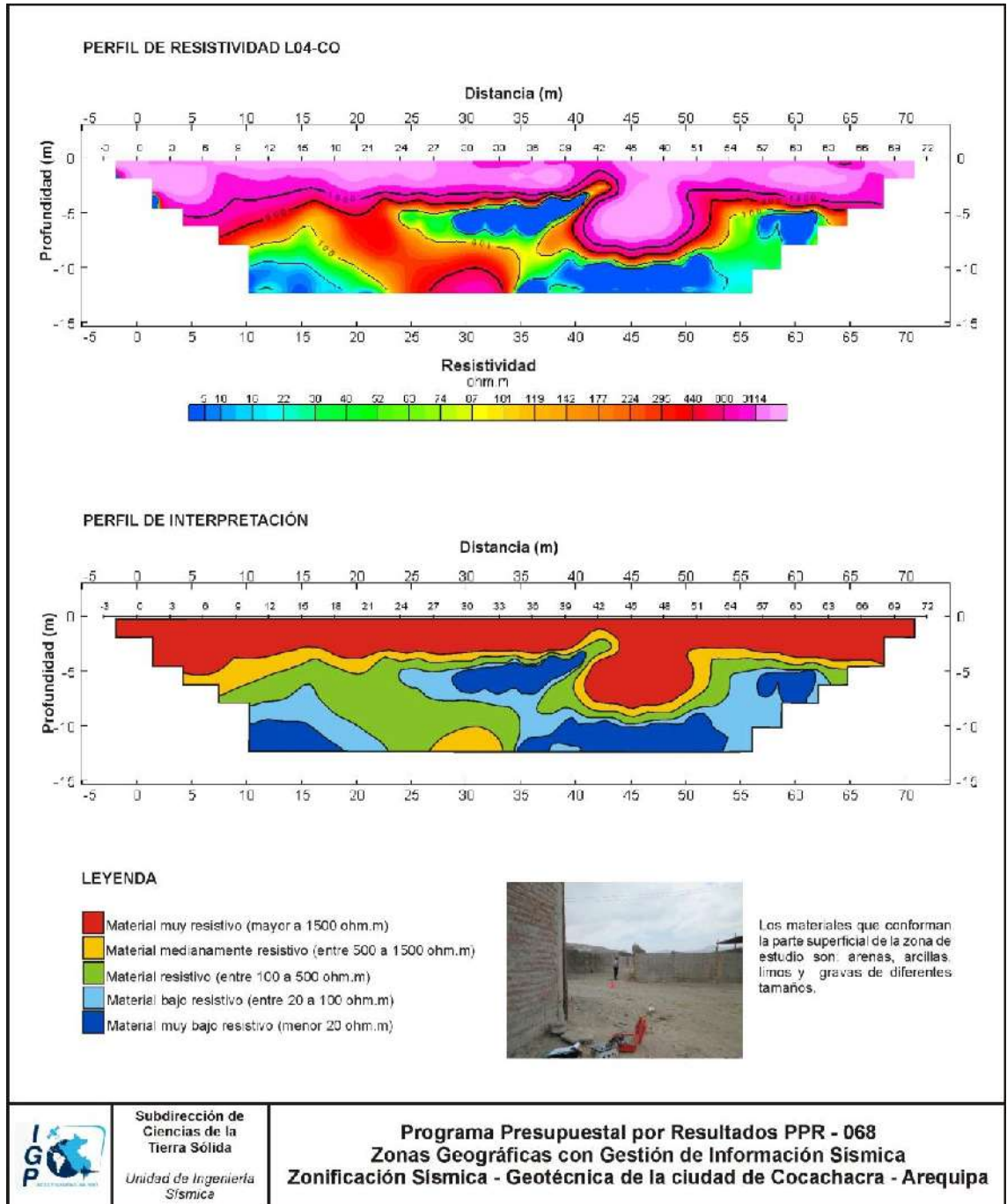


Figura 60: Continuación... // Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-CO.

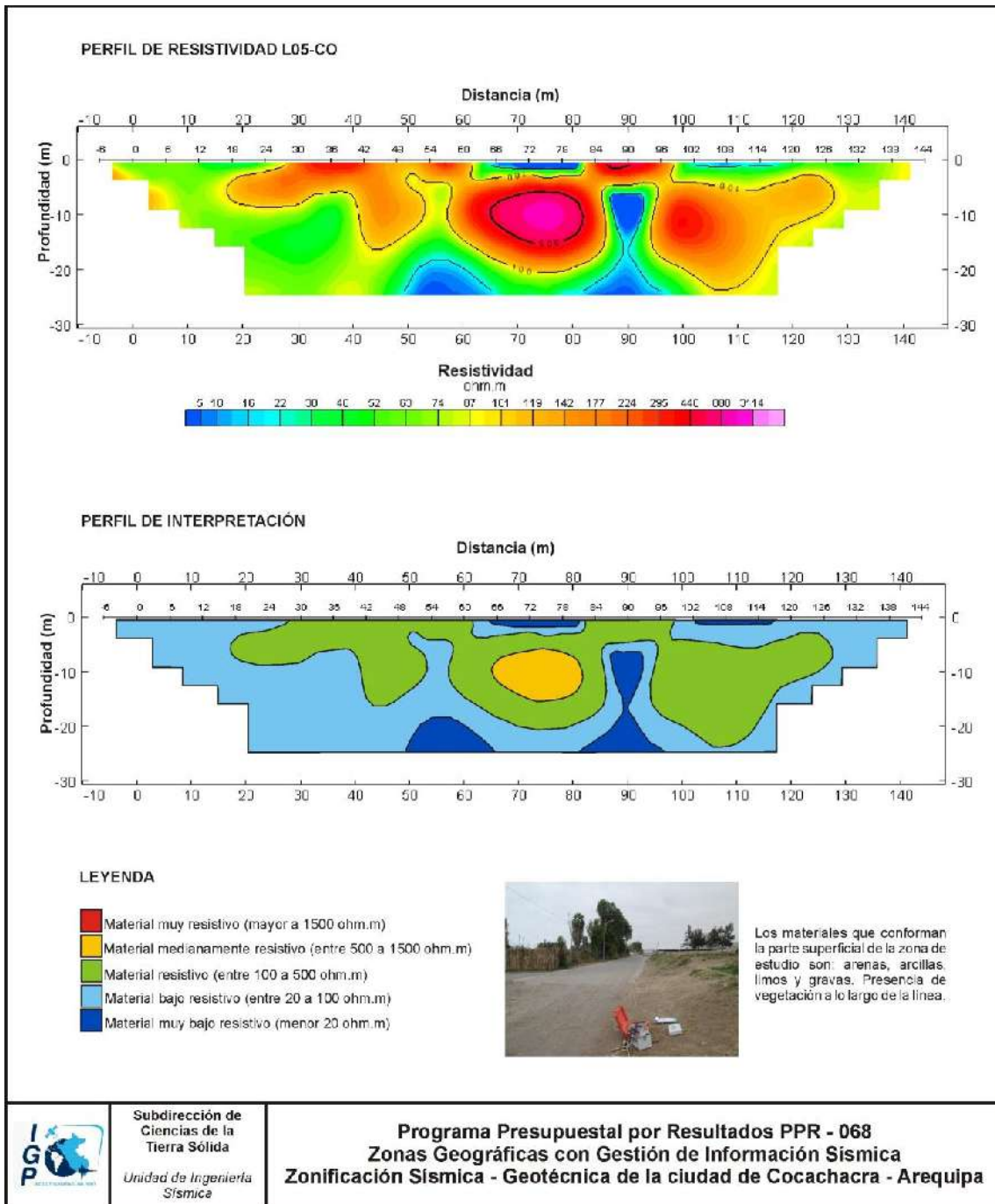


Figura 60: Continuación::: // Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L05-CO.

En resumen, 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 Cochacra, asociados en el primer caso, a la presencia de suelos compactos y en el segundo, a áreas de cultivo y canales de regadío próximos a las secciones. Hacia el extremo Oeste predominan valores resistivos y bajos resistivos, asociados a su cercanía a terrenos de cultivo que saturan a los suelos. Estos valores resistivos se obtienen en superficies compuestas por arena seca y gravas.

## 12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Cochachaca considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Cochachaca, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de dos tipos de suelo: Tipo S1 y Tipo S2.

### 12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Cochachaca se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 61):

**ZONA I:** Conformada mayormente por suelos gravosos conformados por clastos de origen ígneo de forma redondeada y cubiertos por suelos meteorizados y erosionados de poco espesor. A profundidad este 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 400 m/s y 500 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y un periodo de 0.3 segundos, permite estimar que la potencia de la capa superficial corresponde a 28 y 38 metros, variación asociada a la inclinación del terreno. Asimismo, esta zona presenta capacidad portante alta ( $> 3.0 \text{ kg/m}^2$ ). La zona de estudio, por su cercanía al mar y geomorfología, presenta suelos que responden a periodos entre 0.5 y 0.6 segundos pero con menor amplificación.

**ZONA II:** Conformada por estratos sub-angulosos de origen sedimentario en una matriz limosa de moderado espesor, subyaciendo a estos estratos se tiene material de origen ígneo. Esta zona se ubica principalmente en los extremos NE y SO de Cochachaca, donde los periodos dominantes del suelos, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían de entre 0.3 y 0.5 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la Norma Sismorresistente Peruana. Esta zona presenta capacidad portante de media a alta, entre 2 y 3  $\text{kg/cm}^2$ .

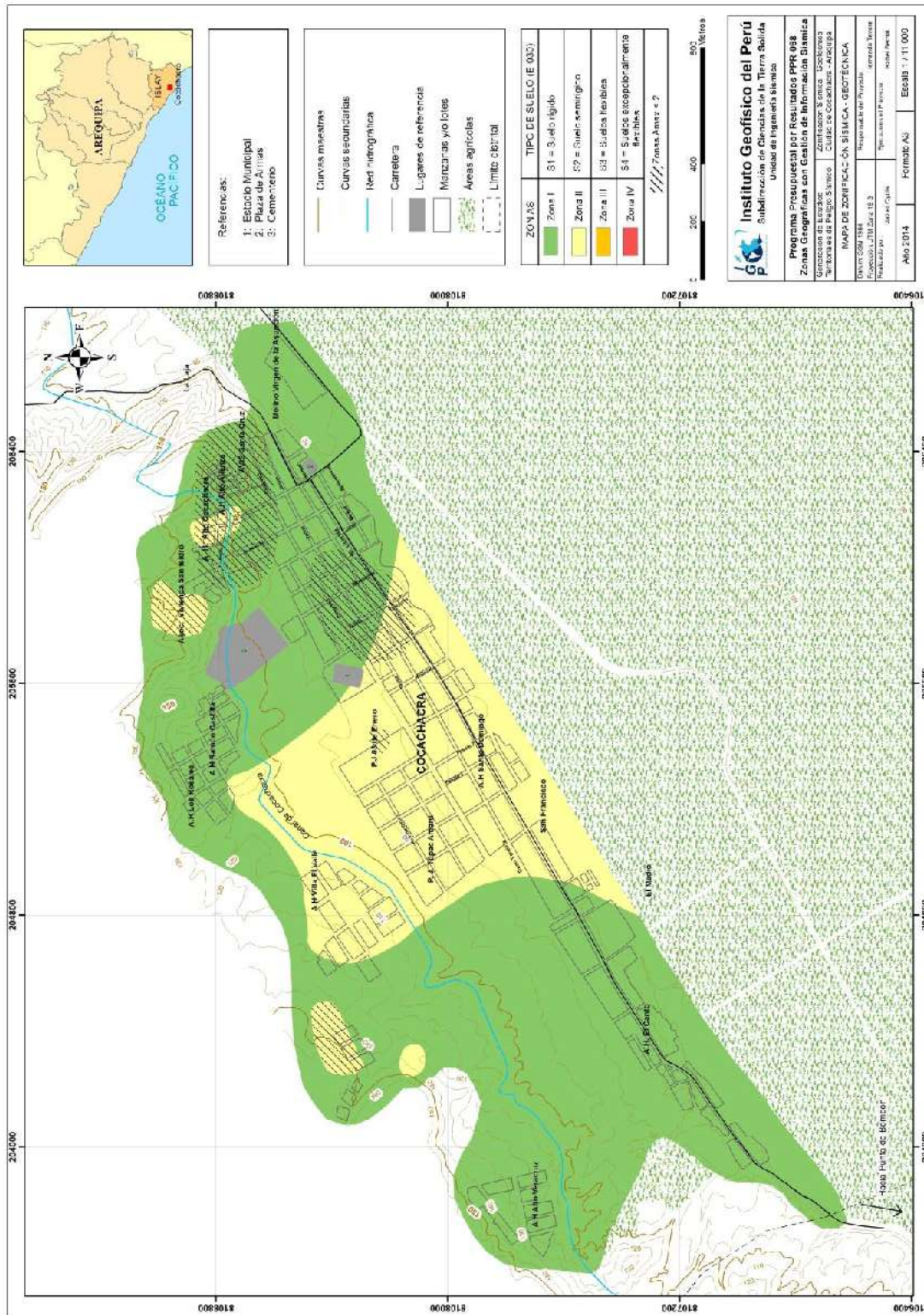


Figura 61: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Cochachaca.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

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

### **CONCLUSIONES**

El ciudad de Cochachaca se encuentra emplazada sobre una terraza aluvial, constituida por gravas redondeadas a subredondeadas con diámetros que no superan los 17 cm, dentro de una matriz areno-limosa, típico de suelos procedentes de depósitos aluviales.

El Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que la ciudad de Cochachaca 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 Cochachaca 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 Cochachaca.

## 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

- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). BSGP, V94, 45-59.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. J. G. R. Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. IAEG. Bull. 43, 27-29.
- Casagrande. A. (1948): Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
- Cobbing, J. (1970). Geología de los cuadrángulos de Huacho (23h). Boletín N°26 , INGEMMET.
- Dale D. (1990). Mountain waves and Downslope Winds. Meteorological Monographs. 23:59 81
- Dorbath, L., 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.
- Guevara, C. (1961): Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clemesi, INGEMMET,
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J.N. (1986). A sliding-consolidation model for flow slides, *Can.Geotech.J.*, 23, 115-126

- INADUR (2000): Mapa de peligros y plan de uso del suelo de la ciudad de Chimbote. Instituto Nacional de Desarrollo Urbano.
- INDECI (2001): Informes de los principales desastres ocurridos en Perú. Instituto de Defensa Civil del Perú.
- INGEMMET (1970): Cuadrángulo Geológicos de Barranca. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.
- Knighton, A. (1998): *Fluvial Forms & Processes: a new Perspective*. Londres. Arnold
- Lachet, C. y P. Y. Bard (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b): Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- Loke MH (2001). Tutorial: 2 D and 3 D electrical imaging survey, Geotomo Software, Malaysia
- Morisawa, M. (1968). *Streams: their dynamics and morphology*. McGraw-Hill. New York, New York, USA.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1,25-33 pp.
- Norma E-30 (2003): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): *The Microtremor Survey Method*, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Pagador, C. (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la Cuenca del río Huaura. Autoridad nacional del agua.
- Papazachos, et al. (2004): Global realtions between seismic fault parameters and momento magnitude of eathquakes. *Bull. Geol. Soc. of Greece*, 36, 1482-1489.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530

- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- SENAMMHI (2008): Datos de temperaturas máximas y mínimas de la Estación Pampa Blanca.
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. *Sismología*, IGP.
- Tavera et al, (2002): The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6: 279-283, 2002.
- Tavera et al. (2013). Sismo de Acari-Yauca del 25 de setiembre de 2013 (7.0Mw). Aspectos Sismológicos.. Dirección de Sismología, IGP. Informe Técnico N°03-2013. 25 pags.
- Tavera, H. (2001). El terremoto de la región sur del Perú del 23 de junio de 2001. Instituto geofísico del Perú. Informe Especial, Dirección de Sismología. 422 pag.
- Tavera, H. (2008). EL terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto de 2007 (7.9 Mw). Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología. Informe Especial. 480 pags.
- Tavera, H. (2001). El terremoto de la Región Sur del Peru del 23 de Junio de 2001. Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera, H. (2014). Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Tavera, H. (2008): El terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007 (7.9 Mw). Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera et al, (2014). Estimación del Peligro Sísmico para el Perú. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.

Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.

Villegas\_Lanza, J.C. (2014)

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