



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 ACARÍ

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Acarí – Caravelí – Arequipa

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú  
2015



# ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE ACARÍ

Provincia de Caravelí – Departamento de Arequipa

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

## Desarrollo del Proyecto

### Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

### Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gomez

### Personal participante

Fabiola Rosado

Wilfredo Sulla

Javier Oyola

Martha Añezco

Gabriela Pérez

Jesús Huarachi

Henry Salas

Renzo Bustamante

Segundo Ortiz

Mariana Vivanco

Roberth Carrillo

Cristhian Chiroque

Abraham Gamonal

Julio Martínez

José Guzman

### Apoyo Técnico

Estela Torres

Augusto Cárdenas

## **RESUMEN EJECUTIVO**

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

*Los resultados obtenidos para la ciudad de Acarí han permitido identificar la existencia de un (1) solo tipo de suelo codificado como Tipo S1, y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) corresponde a la ZONA 1.*

*El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Acarí se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio.*

## ÍNDICE

### **RESÚMEN EJECUTIVO**

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Sismicidad

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

7.3.- Estudios 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 Tectónico Estructural

9.1.1.2.- Origen Fluvial

9.1.1.3.- Origen Eólico

9.1.1.4.- Origen Depositacional

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

### 9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

9.3.2.- Procesos Eólicos y 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 calidad de las construcciones y la educación de la población.

Los estudios de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente ([www.acerosarequipa.com](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 Acarí, ubicada en el distrito de Acarí, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



*Figura 1: Plaza de Armas de la Ciudad de Acarí*

### 3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Acarí es capital del distrito de Acarí, y este es uno de los trece distritos de la Provincia de Caravelí y Departamento de Arequipa, se encuentra bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa, en el sur del Perú (Figura 2).

El distrito de Acarí se encuentra ubicado en el valle del mismo nombre a la altura del Km 555 de la Panamericana Sur, siendo atravesado, de norte a sur, por el río del mismo nombre. Su capital, Acarí se encuentra sobre la margen derecha del río Acarí. De acuerdo a su historia, durante la época de la colonia, el valle era un centro de esclavos africanos con considerable producción agrícola, siendo enclave de importantes familias españolas y posteriormente, de una fuerte inmigración italiana. Entre las familias españolas más importantes se encuentran los Navarro, Osorio, De la Torre, Ramos, Lancho, Montoya, Carcamo, Arenaza, Gonzales, Vizcardo, Chávez, los italianos, Denegri, Casalino (Casarino), Parodi, Cassano, Alferrano (Alferano), Ricci, Morazzani, Mazzarini y Valega. Asimismo, soportó una fuerte migración asiática con población dedicada a la agricultura en las haciendas más importantes.

El distrito de Acarí fue creado el 25 de agosto de 1525.

Acarí fue también un fuerte bastión de la resistencia contra el ejército realista, apoyando decididamente al general Guillermo Miller en sus correrías por el sur y la sierra del Perú. Durante la guerra del Pacífico, rechazaron la invasión chilena a su paso por este valle.

Es de anotar que el distrito de Acarí se encuentra en ambas márgenes del río Acarí, teniendo como principal fuente de producción las aceitunas, aceite de oliva, algodón y camarones. El distrito de Acarí, a pesar de estar comprendido en la región Arequipa, depende mucho comercialmente y en servicios de las provincias vecinas de Nazca y Marcona en la región Ica.

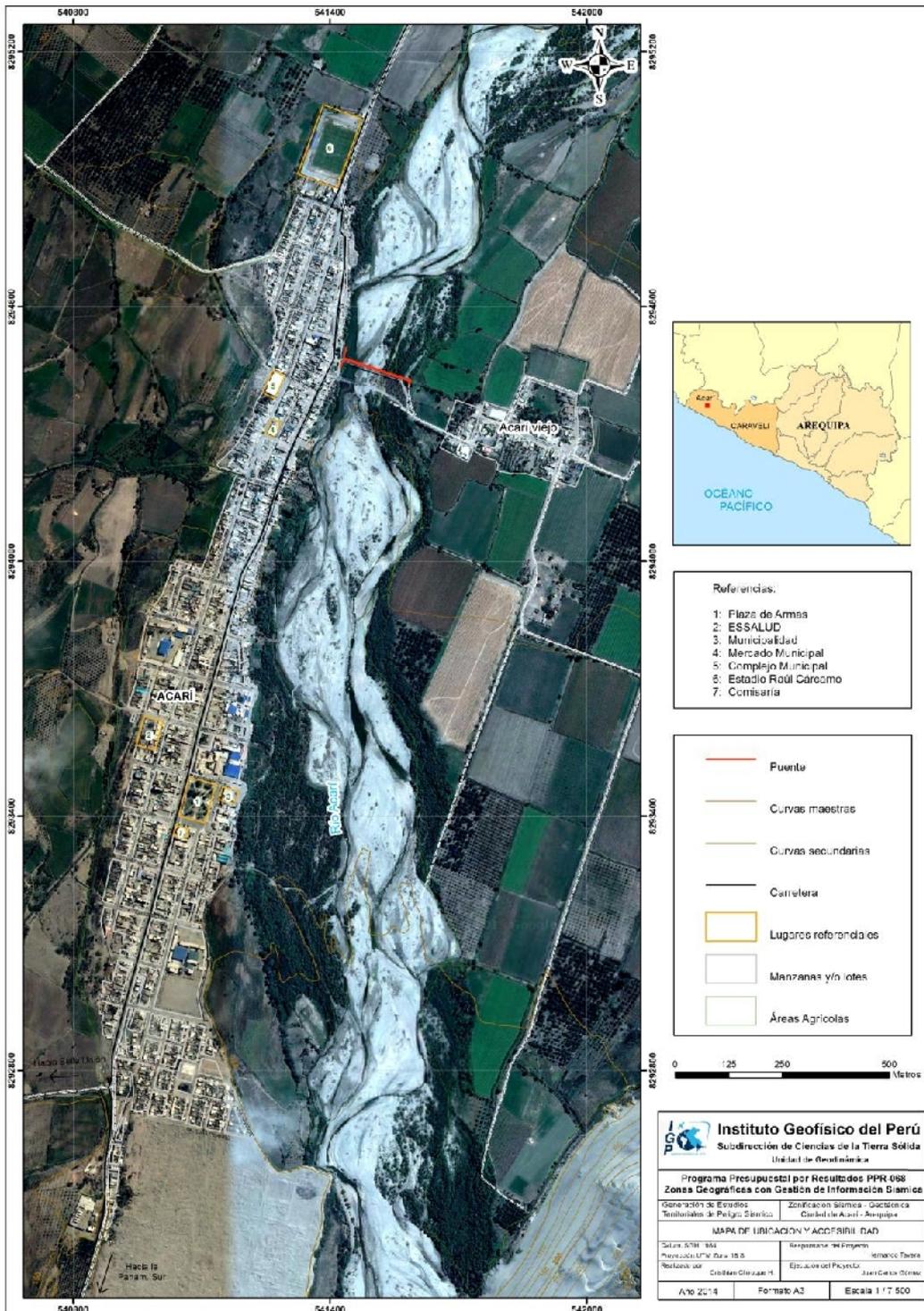


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Acarí, distrito de Acarí, provincia de Caravelí, Departamento de Arequipa

#### 4.- ANTECEDENTES

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

Por otro lado, a partir de los años 80, muchas de las ciudades costeras han soportado procesos continuos de migración de población proveniente de provincias del interior del país y, debido a la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, la población inmigrante ha ocupado zonas de alto riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis y otros efectos secundarios. A estas condiciones, se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables, sin medir su vulnerabilidad e incrementando el riesgo en dichas zonas.

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

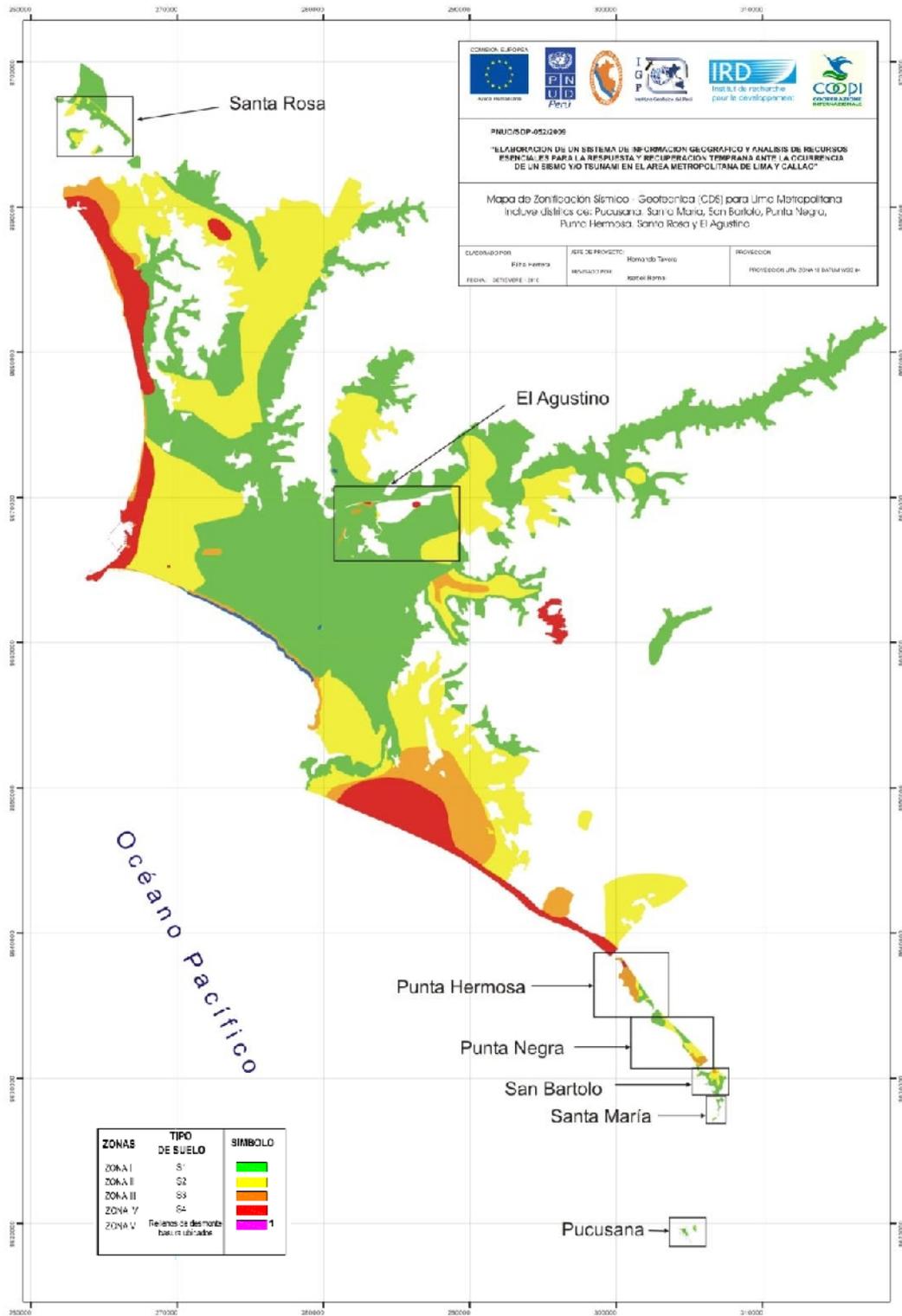


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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

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

## 5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio, son uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos. Este factor es fuertemente dependiente de las características geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de los suelos. En conjunto, estos factores controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en la superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas disponibles más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el **comportamiento dinámico de los suelos** (CDS) teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a,b; Bard y Sesame, 2001; Bernal, 2002).

Las metodologías a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, consideran los estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica sobre las observaciones de campo y la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

En conclusión, los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas, permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico. El resultado final es el Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos.

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

## 6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

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

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

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

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

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

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

**ZONA I:** Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración

natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) varía entre 500 y 1500 m/s.

**ZONA II:** En la zona se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) varía entre 180 y 500 m/s.

**ZONA III:** Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.8 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) son menores a 180 m/s.

**ZONA IV:** Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Los periodos predominantes para estos suelos son mayores que 0.7 s; por lo que, su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

**ZONA V:** Zona constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la

estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

El periodo fundamental de las estructuras puede ser deducido de la fórmula propuesta por Rodríguez y Aristizabal (1998), donde  $T = N/\lambda$  (T, Periodo de la estructura; N=Número de niveles en la edificación y  $\lambda$ = 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 Acarí se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías que se detallan a continuación.

### 7.1.- Estudios de Sismicidad

Se hace uso del Mapa Sísmico del Perú para describir las características sísmicas de la región en donde se encuentra el área de estudio (Tavera, 2014). Del mismo modo, se describe a los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en la región a fin de describir los daños producidos por estos eventos durante el periodo histórico e instrumental. Para este objetivo se analiza la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990), así como la proporcionada en los reportes técnicos elaborados por la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

### 7.2 Estudios de Peligro Sísmico

Considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida el área de estudio en un determinado periodo de tiempo. Para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2012), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007).

### 7.3.- Estudios 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 Acarí 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 4).



Figura 4: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 5, 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 AC-51 presenta tramos de señal con bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en AC-40, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, 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 6), 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.

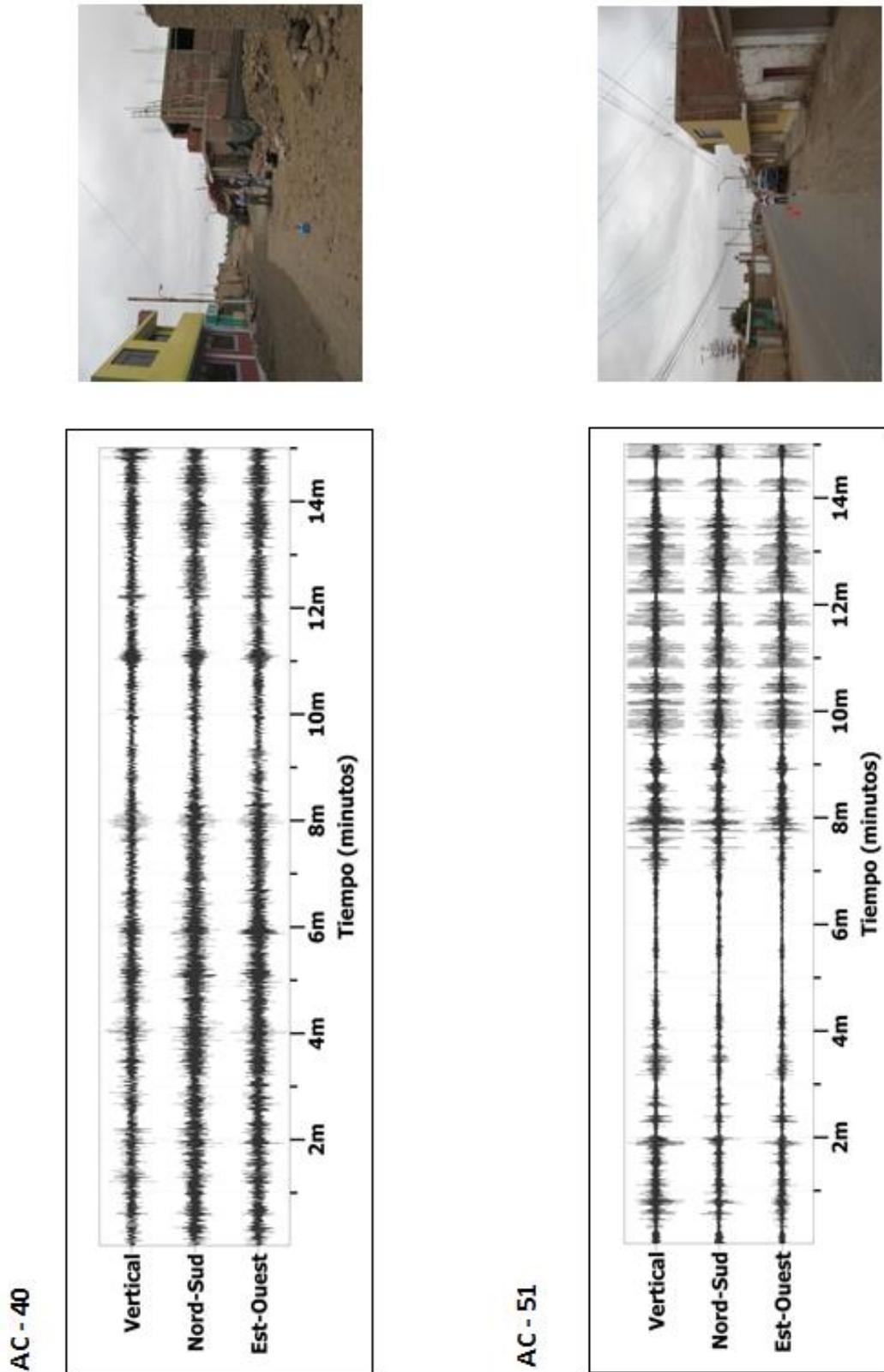
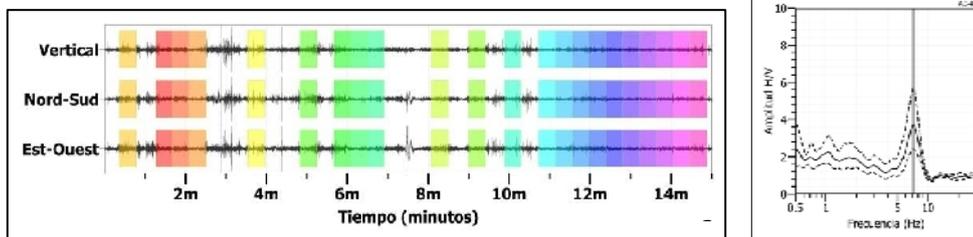


Figura 5: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro con presencia de ruido de fondo (AC-40) y otro con tramos de señal libre de ruido (AC-51).

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.

**AC - 46**



**AC - 29**

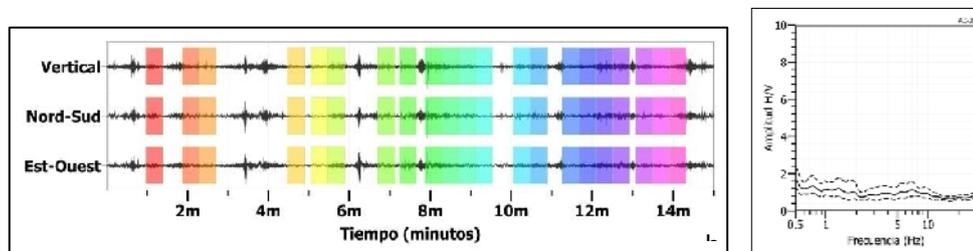


Figura 6: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. AC-46) Registros y razones H/V donde se identifica un pulso de frecuencia predominante, AC-26) Registros y razones H/V en los cuales la frecuencia predominante no está presente. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet y Bard, 1994): primero, debe estar presente en un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 30 Hz; segundo, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia) y por último, se considera el pico/rango de frecuencias más representativos para cada punto de medida.

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

.- **Método de Arreglos Lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales (Figura 7). 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 ( $V_s$ ) y ondas de volumen ( $V_p$ ) para el punto medio de cada línea de estudio.

.- **Método de Prospección Eléctrica:** Tiene por objetivo determinar la distribución real del parámetro resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida. Para ello se considera los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. En este estudio se considera solo los perfiles realizados en la superficie del terreno (Figura 8).

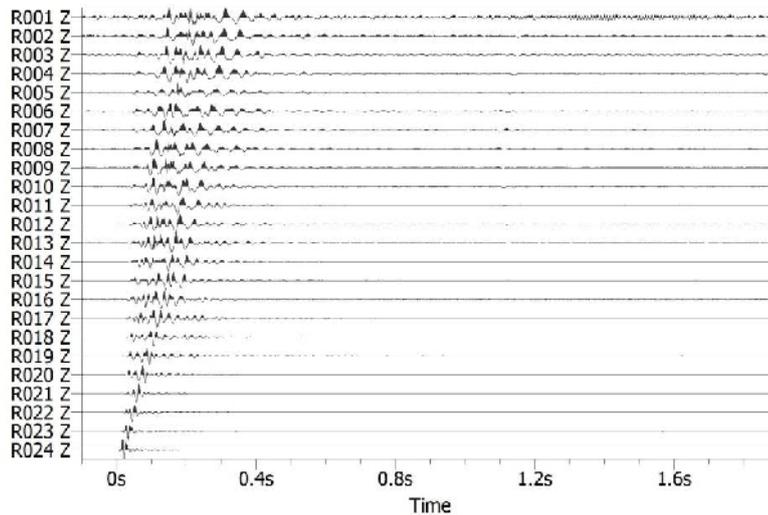


Figura 7: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica y ejemplo del tipo de registro obtenido en la ciudad de Acarí

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: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Acarí

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

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

*.- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Debe considerarse que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua, pero si hay*

*presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.*

*.- Alto Resistivo (color anaranjado): Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.*

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

*.- Bajo Resistivo (color celeste): Comprende valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.*

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

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

## 8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

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

### 8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región sur presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Figura 9). Una de estas ciudades es Acarí y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1913 (7.7Mw), 1942 (8.0Mw), 1996 (7.7Mw), 2001 (7.7Mw) y 2007 (7.5Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en sus construcciones precarias de adobe y quincha, además de algunos escenarios de licuación de suelos. Estos sismos causaron en la región sur del Perú intensidades del orden de IX-VIII en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978), tal como ocurrió con el sismo del año 2013.

El día 25 de setiembre del 2013 (Tavera et al, 2013), el borde occidental de la región sur del Perú fue afectado con la ocurrencia de un sismo de magnitud 7.0 Mw (magnitud momento) que produjo en el borde costero intensidades máximas de VI (MM), ver Figura 10. Este evento produjo daños mayores en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca y Chala. El epicentro fue ubicado a 86 km en dirección SSO con respecto a la ciudad de Acarí, produciendo daños en viviendas de adobe y rajaduras en los muros de un gran número de viviendas de material noble (Figura 11).

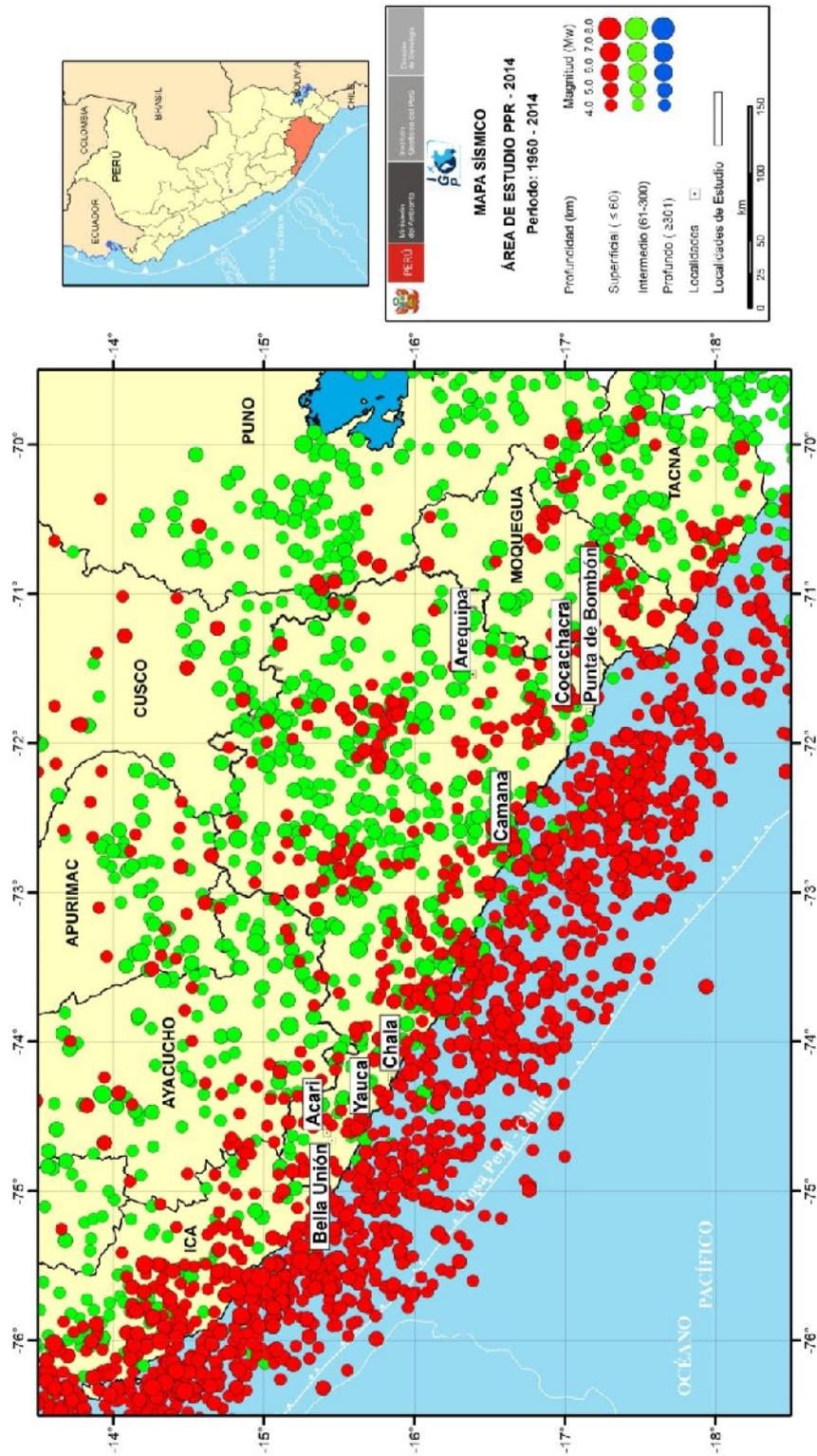


Figura 9: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

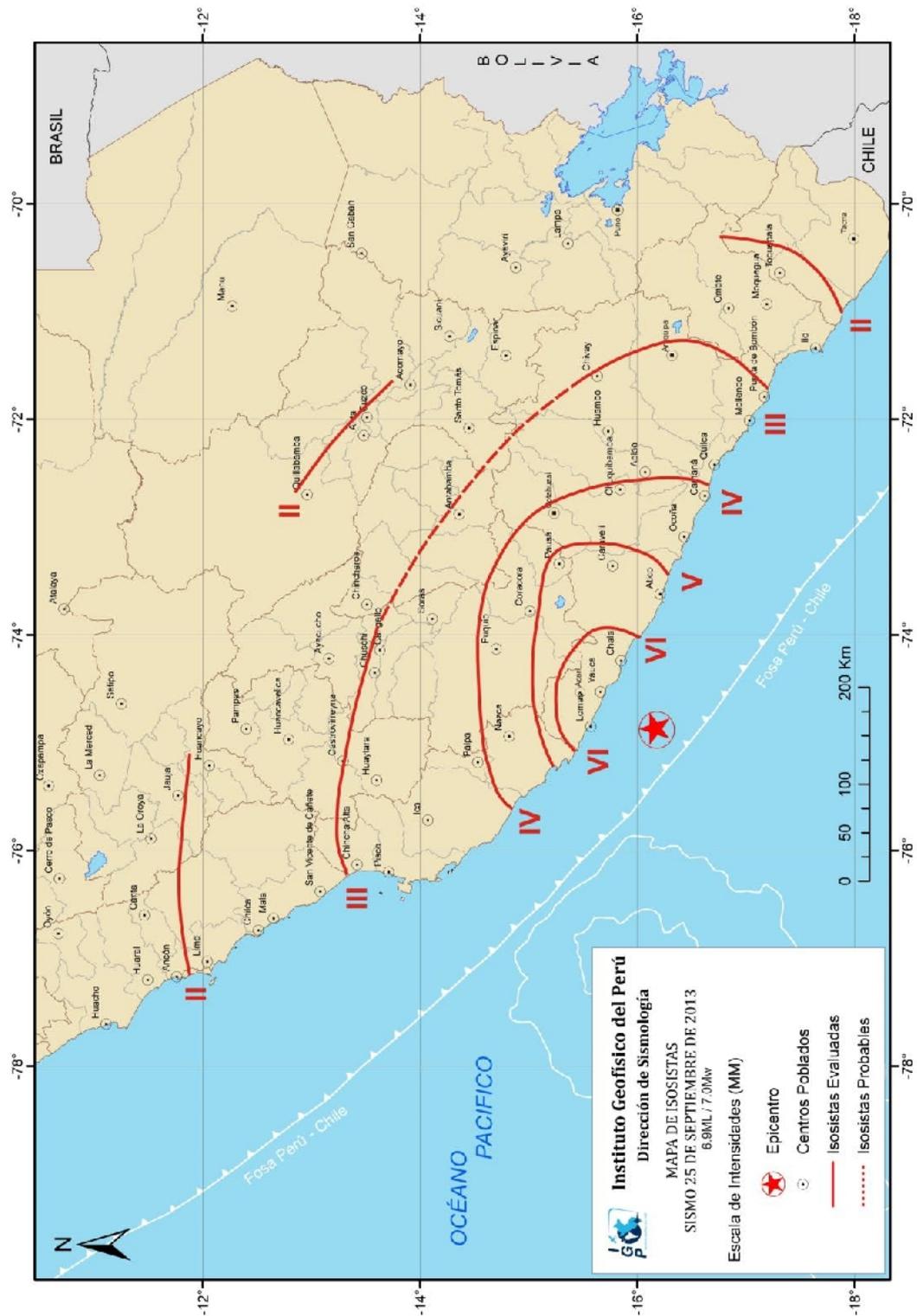


Figura 10: Mapa de intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 25 de septiembre de 2013. En la ciudad de Bella Unión las intensidades fueron de VI (MM).



Figura 11: Imágenes de daños observados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca y Chala debidos al sismo del 25 de setiembre de 2013.

Después de ocurrido el evento sísmico, se produjo hasta 20 réplicas con magnitudes menores a 4.5 ML, siendo al menos una de ellas percibida en la ciudad de Acarí con intensidades del orden de III (MM). Por otro lado, al analizar la distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de 1966 (Nazca), 2001 (Arequipa) y 2007 (Pisco), se observa claramente que existe un área, con eje mayor del orden de 150 km paralelo a la línea de costa, que aún no experimenta ruptura y probablemente corresponda al sismo de 1913 (~8.0 Mw) que afecto toda esta región (Figura 12). De acuerdo al escenario descrito, el borde costero de la región sur y sobre todo, entre las localidades de Lomas y Chala, existe una alta probabilidad para la ocurrencia de un sismo con una magnitud  $\geq 7$  Mw, el mismo que causaría altos niveles de sacudimiento del suelo en toda la región.

Finalmente, en la Figura 13 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo 1961 – 2014, llegándose a observar que la ciudad de Acarí, históricamente ha sido afectada por sismos que han producido en superficie

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

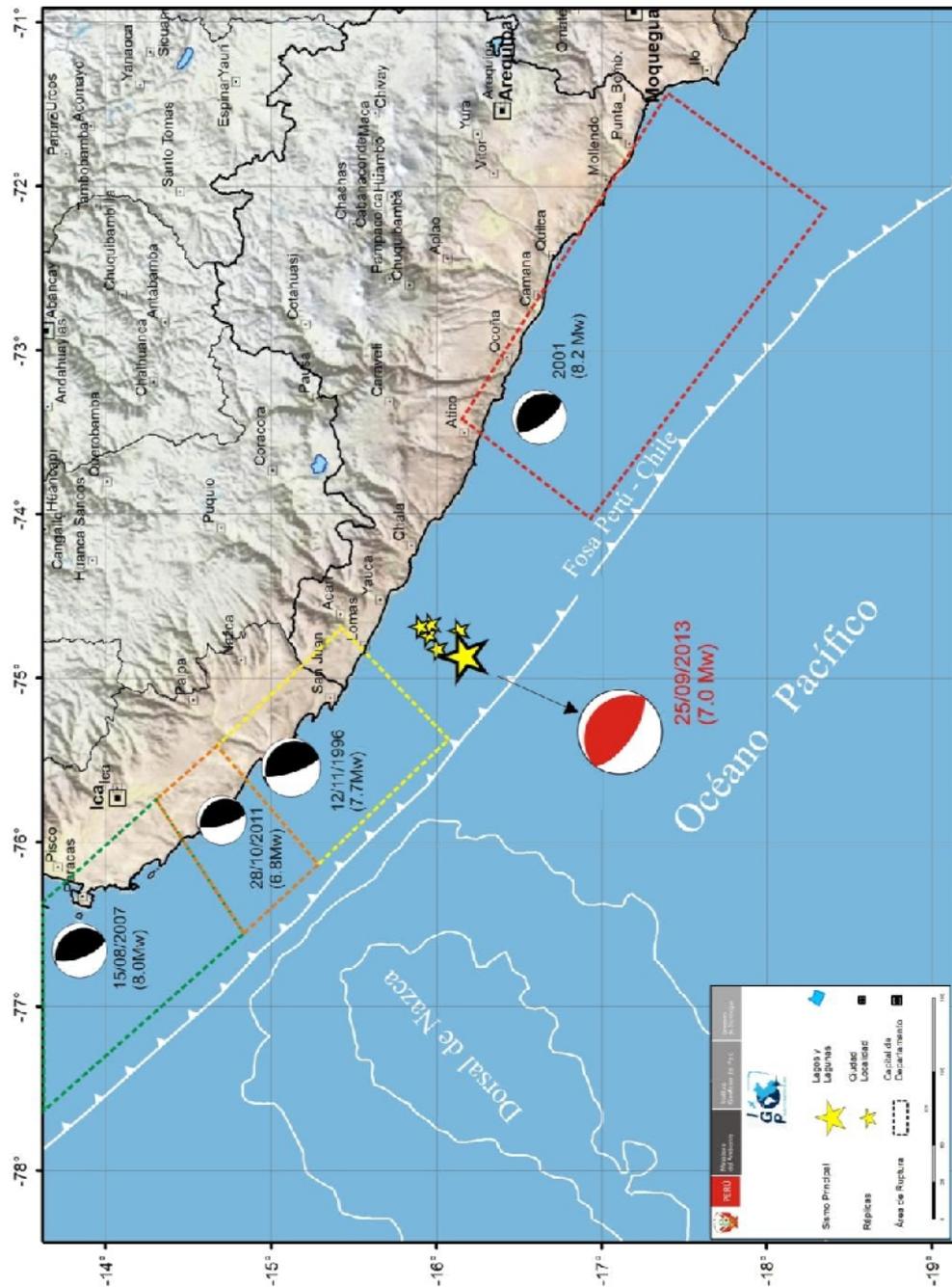


Figura 12: Distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de Nazca-1996, Pisco-2007, Ica-2011, Arequipa-2001 y Yauca-Acarí del 25 de septiembre del 2013. Los mecanismos focales indican el desarrollo de similares procesos de ruptura. El área de ruptura asociada al sismo de 1913 (7.7Ms) estaría entre las áreas de los sismos de 1996 y 2001.

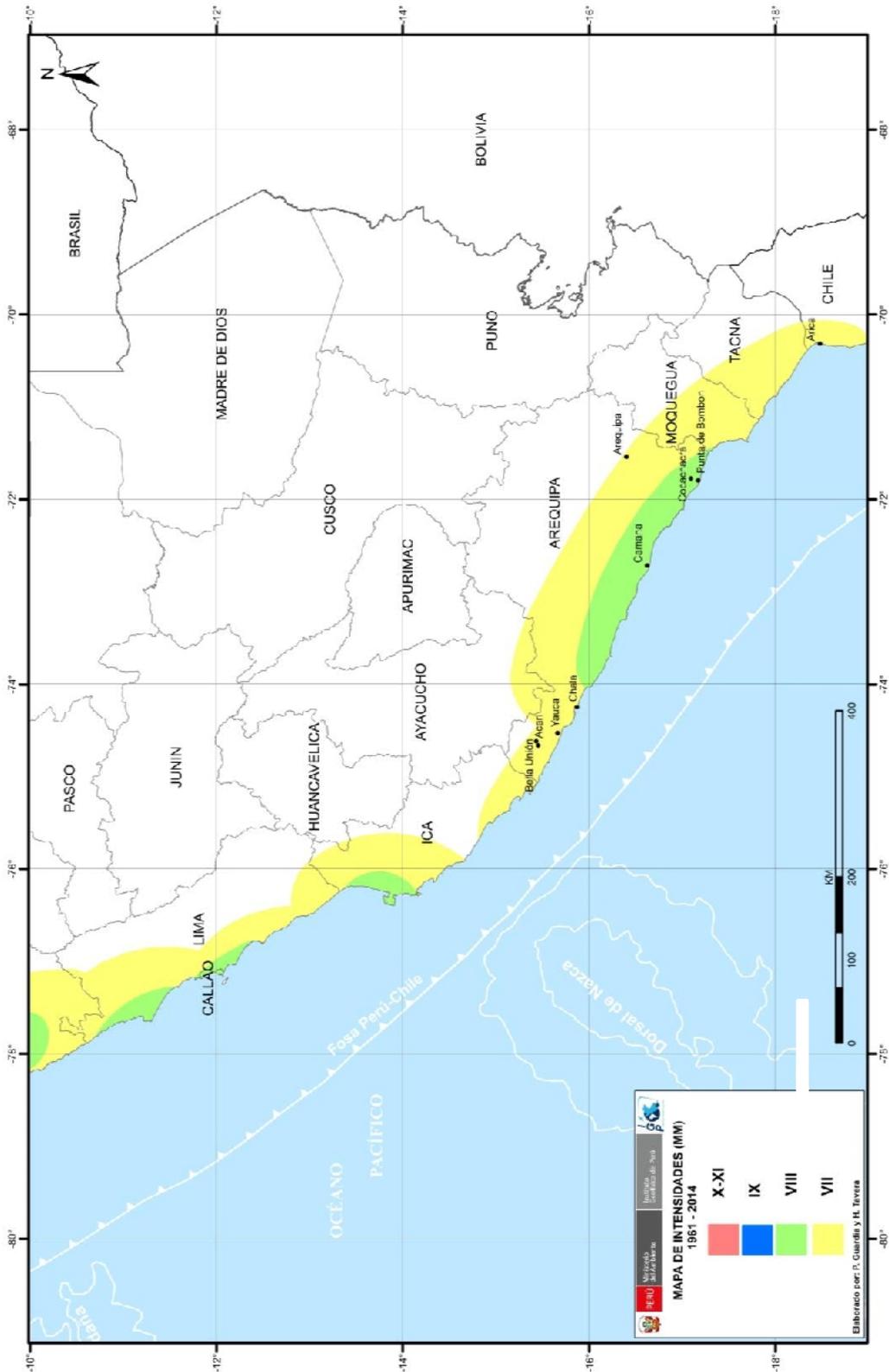


Figura 13: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

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 Punta de Bombón niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001. Esta información es corroborada por estudios realizados por Chilif et al (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En la Figura 14, se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-2 asociada al sismo de 1913, tal vez el sismo mayor ocurrido en esta zona y que tiene alta probabilidad de repetirse con una magnitud igual o mayor a 7 Mw. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

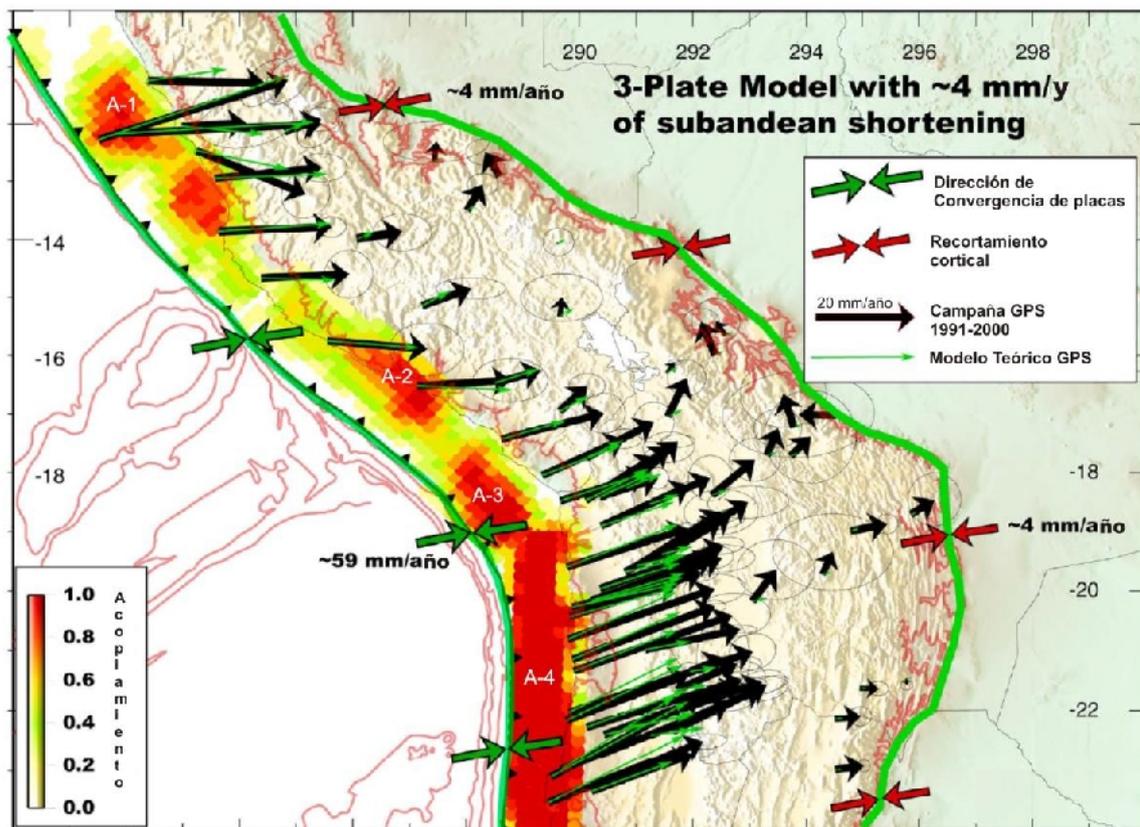


Figura 14: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de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

## 8.2.- Peligro Sísmico

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

Para el área que abarca la ciudad de Acarí se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 460 a 580 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), Pisco 2007 (Tavera, 2008) y Yauca-Acarí, 2013 (Tavera et al, 2013).

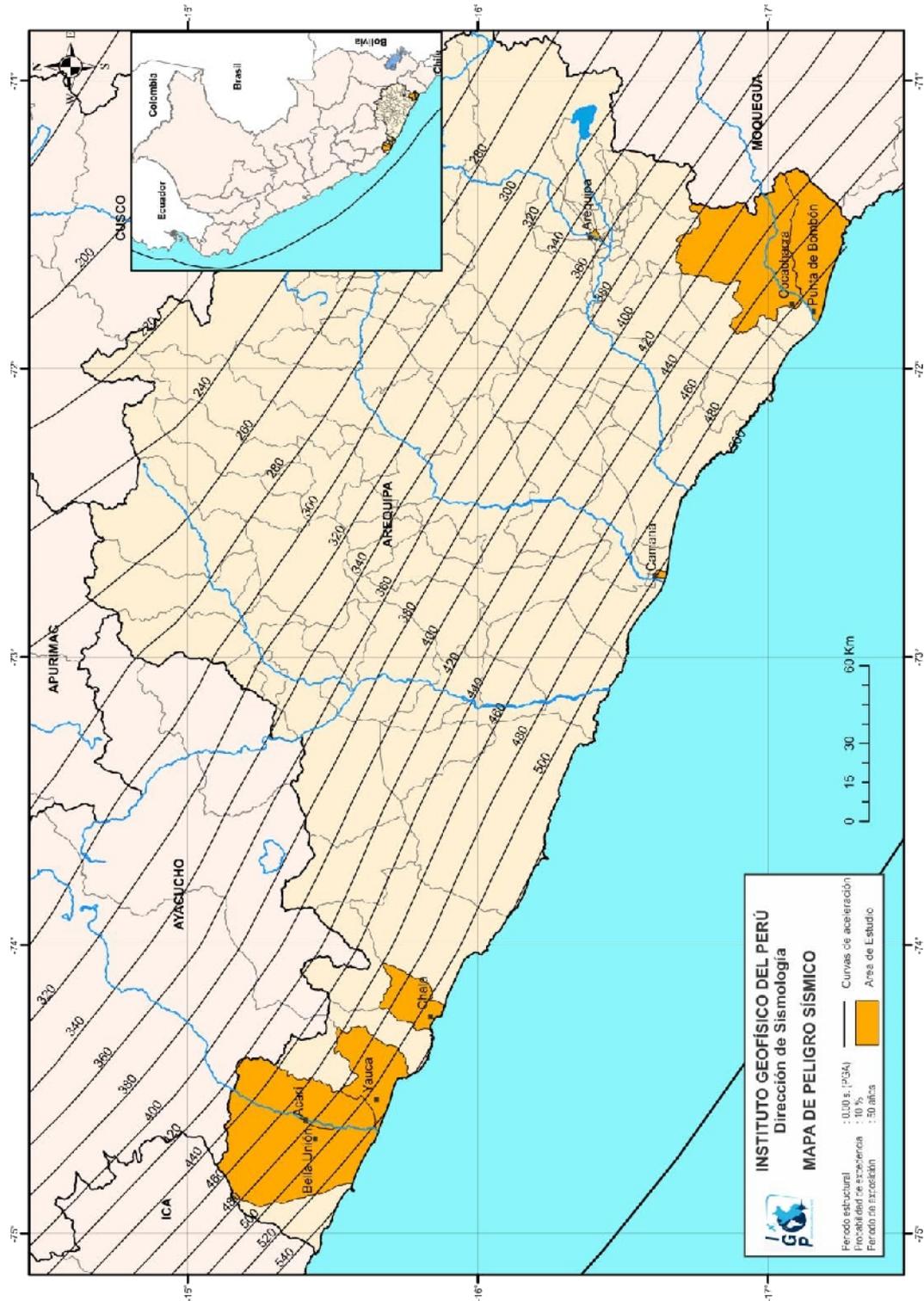


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

## 9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

### 9.1. Geomorfología

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

Para este estudio, en base de la topografía de terreno y el uso de herramientas computacionales como SIG y CAD se ha elaborado el mapa digital de terreno y plano de pendientes a fin de delimitar las características del terreno, las mismas que fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Acarí.

El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:5000, resolución espacial de 5 metros y referenciada al geoide WGS84/EGM96 (Zona 18S). La topografía se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica de fotografías aéreas de los años 1975 a 1990 a escala 1:15000. El MDT elaborado se presenta a escala gráfica de 1:15000 y cubre un área de 20 km<sup>2</sup> (Figura 16). La ciudad de Acarí se asienta sobre una terraza fluvio-aluvial antigua con alturas que nos superan los 450 m.s.n.m.

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. La ciudad de Acarí se encuentra sobre terrenos cuyas pendientes son menores a 5°, siendo sus máximos del orden de 10° a lo largo de una franja de 4 km de largo (Figura 17).

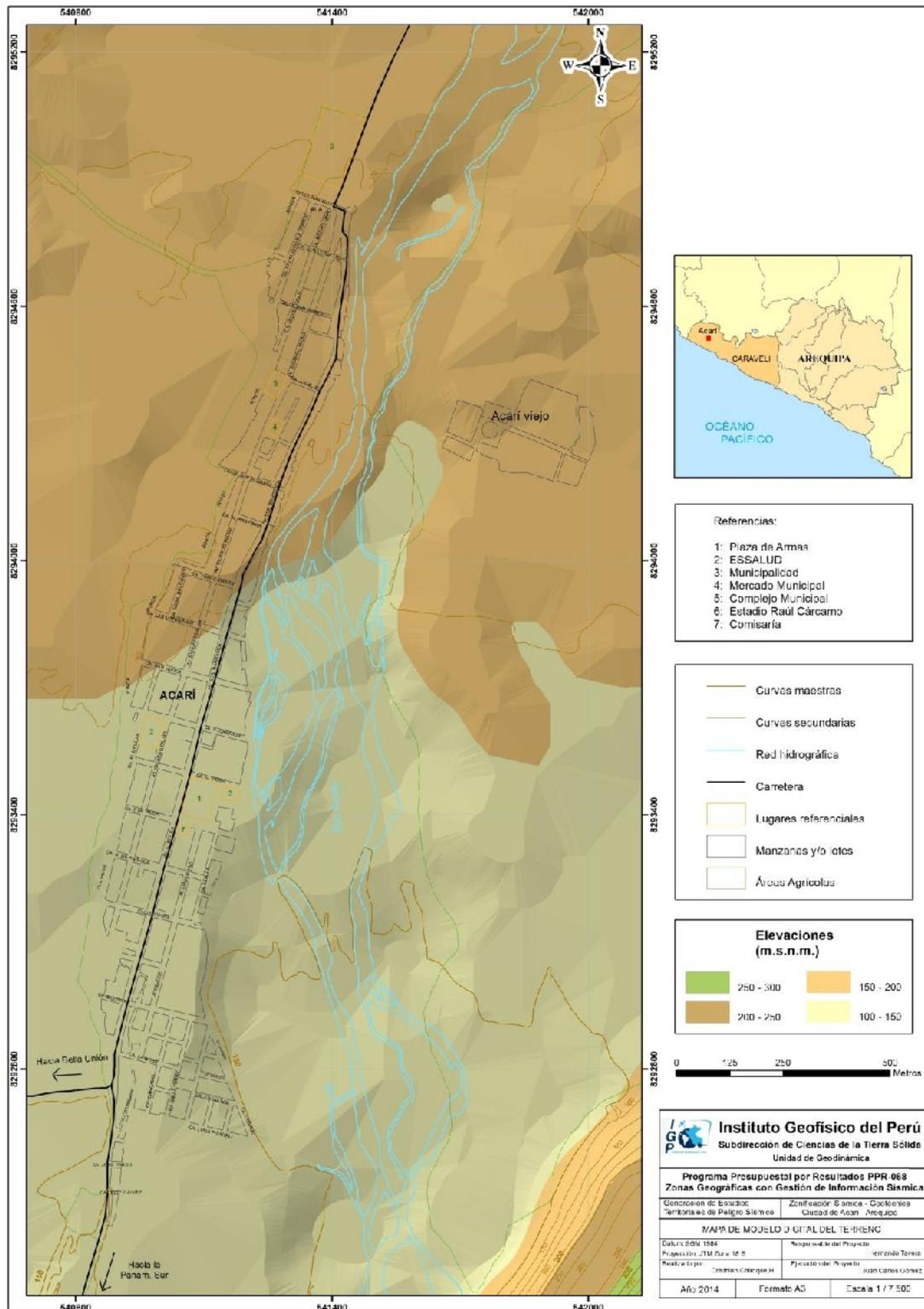


Figura 16: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Acarí y alrededores

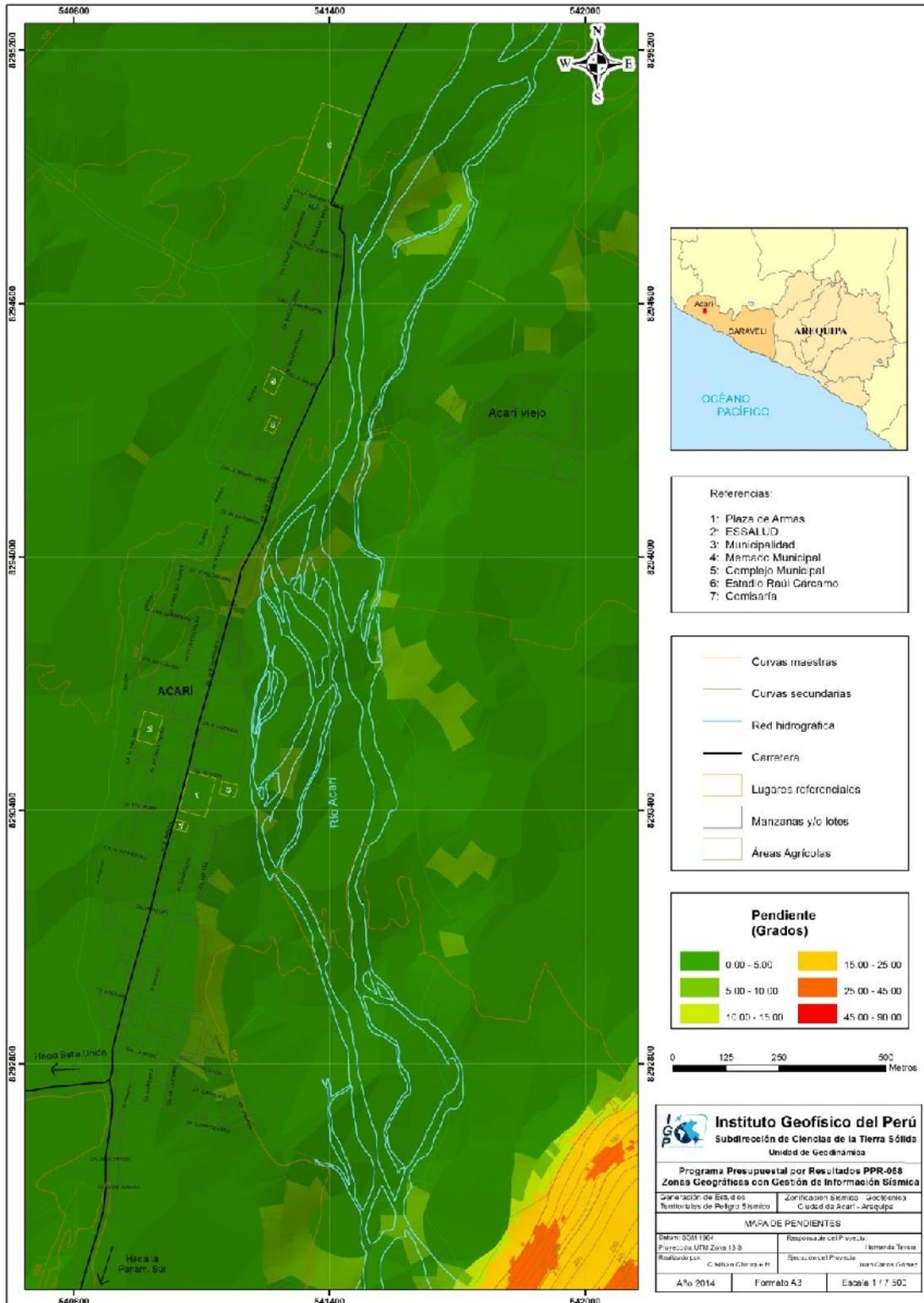


Figura 17: Mapa de pendientes para la ciudad de Acarí y alrededores

### 9.1.1. Unidades Geomorfológicas

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

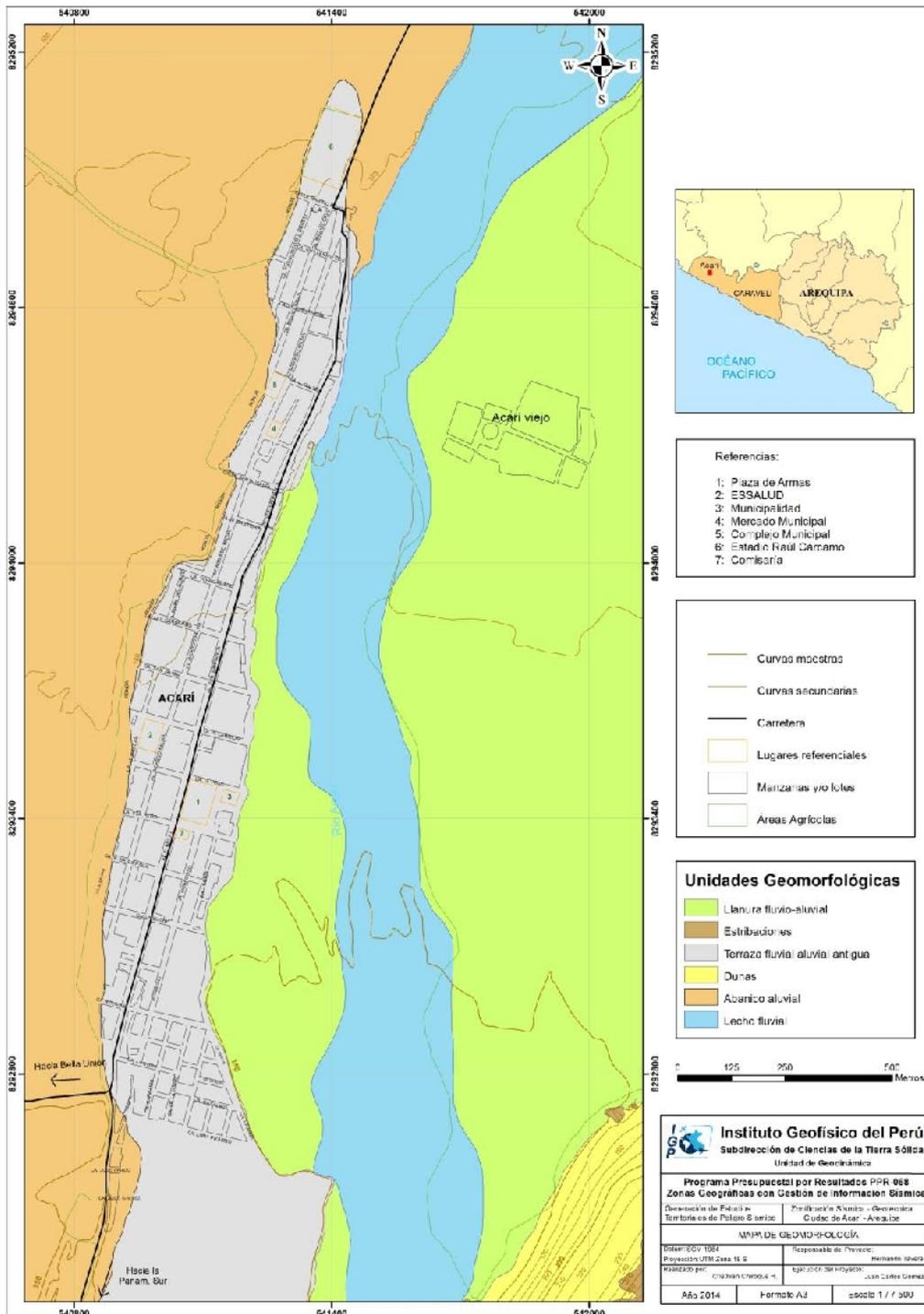


Figura 18 Mapa geomorfológico de la ciudad de Acarí y alrededores

### **9.1.1.1.- Origen Tectónico Estructural**

Para la ciudad de Acarí, la principal evidencia del factor tectónico y estructural que modelaron su superficie se encuentra en la evolución histórica a nivel geológico y ella, se puede sintetizar en la siguiente secuencia:

- .- A fines del Precambriano o en el Paleozoico Inferior (540 – 250 ma), las rocas ya formadas fueron modificadas por un ciclo orogénico que produjo el levantamiento y erosión de la zona, para luego seguir un periodo de transgresión que facilitó la deposición de sedimentos calcáreos.*
- .- Los depósitos del Paleozoico Medio y Superior, estuvieron sometidos a diferentes ciclos orogénicos y de denudación, manteniéndose la región emergida.*
- .- A fines del Cretáceo o principios del Terciario (80 – 60 ma), se produjeron efectos compresivos a lo largo de la cuenca andina, desarrollándose plegamientos amplios que dieron lugar a la formación de fallas con desplazamientos de rumbo a lo largo del margen occidental.*
- .- En el Plioceno medio (3.6 ma), el bloque andino desarrollo un notable levantamiento y formación de fallas, principalmente en la orla continental produciendo el retiro del mar. Posteriormente se produjo un basculamiento hacia el Oeste por efecto de un fallamiento gravitacional a lo largo de la depresión Preandina. La Cordillera de la Costa quedó levantada en forma de un enorme horst, para luego tomar la morfología actual.*
- .- El hundimiento producido por los movimientos diferenciales, entre los bloques de las fallas desarrolladas en la orla continental con el levantamiento del bloque andino, fue la causa de una acción erosiva debido al avance del mar, dando como resultado una superficie plana. Al proseguir el hundimiento, cesa la erosión y se depositan materiales por debajo de la acción de las olas.*
- .- El dominio del levantamiento sobre el hundimiento de la superficie, dio como resultado el retiro del mar, dejando como rasgo geomorfológico característico una superficie plana con cubierta de gravas y arenas.*

.- **Estribaciones:** También llamadas estribaciones andinas y corresponden a cadenas de montañas de baja altitud que se constituyen como evidencias del inicio del levantamiento originado por la subducción de la placa de Nazca debajo de la continental. En la zona de estudio alcanzan altitudes entre 400 a 600 m.s.n.m. Al noreste de la ciudad, en el cerro Portachuelo y al este en el cerro Rodadero, las cotas máximas alcanzan alturas de hasta 600 m.s.n.m. Estas unidades presentan gran actividad geodinámica como aluviones y caída de rocas (Figura 19).

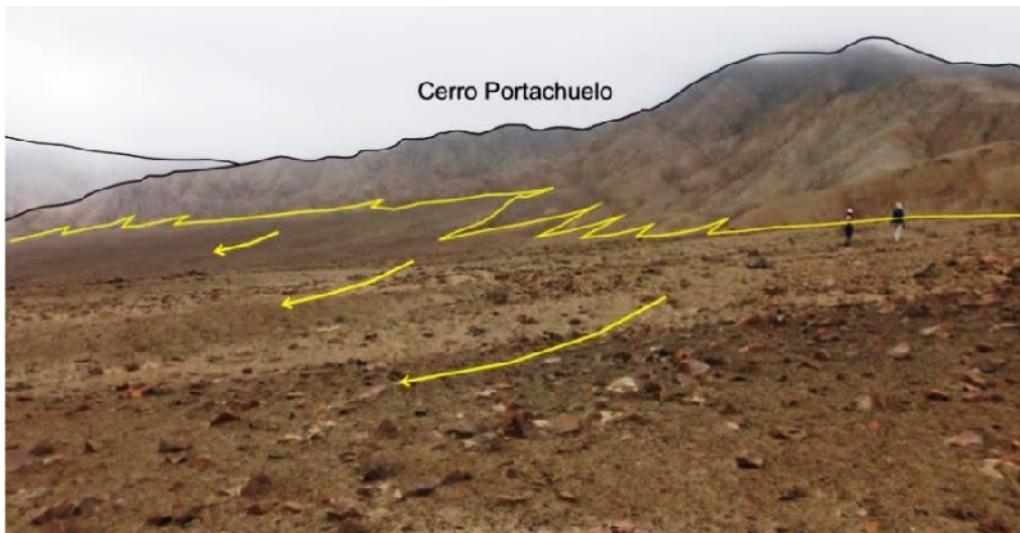


Figura 19: Cerros Portachuelo y La Monja que conforman las estribaciones presentes en los alrededores de la ciudad de Acarí. Destacan los materiales aluviales y las geoformas resultantes de la deposición, los aluviones.

#### 9.1.1.2.- Origen Fluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968). Crea una gran parte del relieve y forma 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. A pesar de que  $<0.005\%$  del agua continental se encuentra en los ríos, en un momento determinado, el flujo del agua es una de las fuerzas más importantes que operan en la superficie terrestre (Knighton, 1998).

En la zona de estudio, este tipo de modelado está conformado por agentes externos tales como los cursos de aguas permanentes o regulares, la escorrentía superficial y las redes de drenaje originadas por periodos de lluvias intensas. Las formas resultantes de estos agentes son:

.- **Llanura Fluvio - Aluvial:** La llanura ha sido formada por acción del río Acarí y por los procesos denudativos que erosionaron, transportaron y depositaron en la zona de estudio grandes volúmenes de sedimentos de origen aluvial. El resultado de estos procesos ha dejado extensas áreas semiplanas con pendientes entre 0° y 10°, dichas zonas son consideradas también como llanuras de inundación. Los suelos están conformados por una cobertura areno limosa que suprayace a gravas redondeadas de origen fluvial. Esta unidad abarca 25 a 30% de la zona de estudio, Figura 20.



Figura 20: Llanura fluvio – aluvial en la ciudad de Acarí. El 95% de las viviendas, colegios y posta médica se asienta sobre esta unidad delimitada por las estribaciones y depósitos eólicos.

.- **Terraza fluvio – aluvial antigua:** La génesis de esta geoforma obedece a grandes aluviones provenientes de las estribaciones y de la acción erosiva del río Acarí. La terraza fluvio - aluvial está conformada por materiales bien compactados conformados por gravas y clastos subredondeados a redondeados con tamaño variable desde 10 a 30 cm con una matriz areno limosa. El espesor promedio de la terraza es de 5 m y se encuentra presente sobre el 15% de la superficie del área de estudio. La zona urbana de la ciudad de Acarí se encuentra asentada sobre este tipo de geoforma, Figura 21.



Figura 21: Terraza fluvio-aluvial conformada por gravas redondeadas originadas por antiguos aluviones y retrabajadas por acción fluvial del río Acarí.

.- **Lecho aluvial:** Es el canal o cauce originado por la acción erosiva del agua y de los materiales acarreados durante todo el desarrollo y evolución del río Acarí. Este proceso demarcó la forma de los cauces antiguos, del perfil transversal y en general, de las formas del drenaje fluvial, Figura 22. En este caso se debe considerar la existencia de un lecho menor y otro mayor. El Lecho Menor, es el cauce por donde fluye el agua en períodos de sequía debido a las escasas precipitaciones y se encuentra junto a la zona urbana de la ciudad. El Lecho mayor, se encuentra rodeando a la zona urbana de Acarí Viejo. El agua circula en períodos de avenidas o precipitaciones intensas.

El lecho fluvial antiguo es una de las formas resultantes de la acción erosiva del agua, se le denomina lecho de inundación o llanura de inundación. Este constituye un cauce inactivo donde se asientan las viviendas del área urbana de Acarí Viejo. La probabilidad de inundaciones en épocas de grandes avenidas está asociada a cambios climáticos a nivel regional como El Niño Southern Oscillation (ENSO).



Figura 22: Llanura de inundación limitada por el cauce antiguo del río Acarí. La zona urbana de la ciudad se encuentra en la margen derecha del río; mientras que, Acarí viejo se encuentra en la margen izquierda del río dentro de la llanura de inundación.

#### 9.1.1.3.- Origen Eólico

El modelado eólico presente en la zona de estudio resulta de la acción continua del viento que ocasiona la erosión, transporte y depositación de material sedimentario fino característico de la granulometría de las arenas.

El principal mecanismo de transporte de estas arenas son los denominados Vientos Paracas. Este fenómeno se inicia en la localidad de Tanaca, ubicado a 34 km al SE del área de estudio y se extiende hasta Pisco (Ica). Las tormentas de arena son vientos que se trasladan en dirección S-SE y N-NO, junto a otros procedentes desde el mar hacia el continente (O-E) y que ocasionan el lento y progresivo avance de las cubiertas eólicas dentro del valle del río Acarí.

.- **Dunas:** La principal actividad eólica se produce en el cerro Rodadero, actualmente cubierto por extensos mantos de arena de grano fino (Figura 23) y para los cuales, no ha sido posible estimar su espesor.

#### 9.1.1.4.- Origen Depositacional

Los abanicos se originan por la pérdida de compactación de los sedimentos, siendo el agua el principal mecanismo de transporte. El agua proviene de las precipitaciones intensas que originan flujos superficiales (escorrentía), siendo la pendiente el factor que incrementa la ocurrencia de estos eventos. Post evento, se

desarrolla el proceso depositacional al alcance de los flujos. En la ciudad de Acarí, predominan los flujos granulares compuestos por gravas, clastos y bloques.

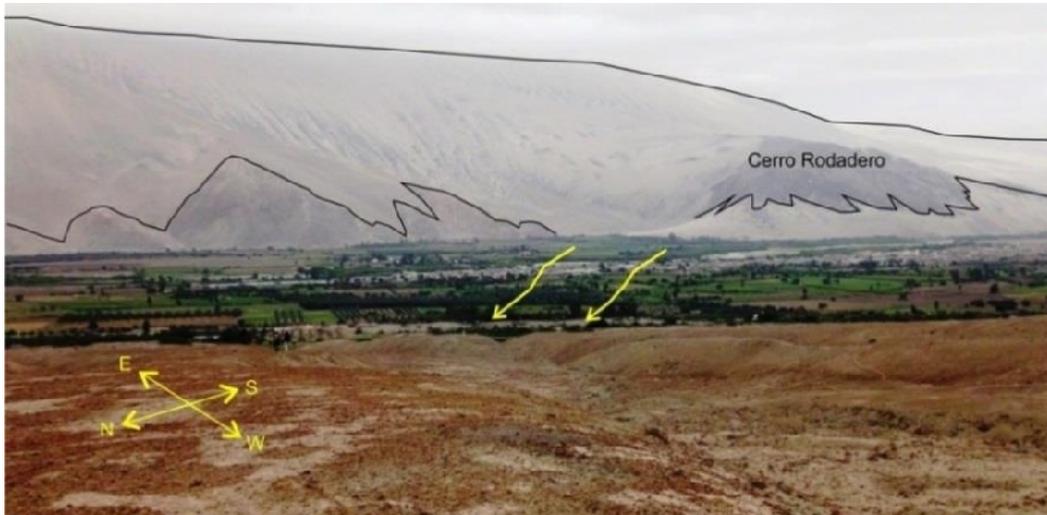


Figura 23: Los cerros ubicados al Este de la ciudad de Acarí se comportan como una barrera natural para el avance de la arena hacia la llanura. Las flechas amarillas indican la dirección de los vientos.

**.- Abanico aluvial:** Estos flujos descienden de los cerros Portachuelo y Chocavento, para luego acumular sedimentos y formar un gran abanico o semicono que se encuentra a la salida del torrente de las quebradas Pedregosa y Portachuelo. Estos flujos pueden tener hasta 2 km de extensión en la parte más amplia del abanico y alcanzar recorridos de hasta 3 km en dirección de la ciudad de Acarí (Figura 24). Actualmente, es difícil definir el límite de los depósitos con la llanura debido a la intervención del factor antrópico.

En general, los flujos de sedimentos que dan origen a estas geoformas se orientan en dirección NE-SO; es decir, en dirección de la zona urbana de la ciudad, siendo conformados por clastos angulosos de 20 a 70 cm de diámetro con escasa selección e incipiente estratificación (Figura 25).



Figura 24: Cerros Chocavento y Portachuelo y vista de los aluviones sobre el cual se encuentra la ciudad de Acarí.



Figura 25 Cono aluvial mostrando la presencia de clastos angulosos y la cubierta de arena limosa.

Entre el Cerro Cruz y el sector Lucasi, ubicado a 2.5 km al NE del área urbana de Acarí, se ha cartografiado la presencia de antiguos conos aluvionales provenientes de estribaciones que estuvieron activos antes de ser cubiertos por depósitos eólicos, para luego ser erosionados por acción fluvial del río Acarí, Figuras 26 y 27.



Figura 26: Terraza aluvional cubierta por depósitos eólicos que limita con la llanura fluvio aluvial presentes en Acarí.



Figura 27: Terraza aluvional conformada por depósitos aluviales con un espesor de 10 a 15 m. Según su estratigrafía, se observa la presencia de clastos angulosos a subredondeados con de arena limosa.

## 9.2.- Geología

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

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

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

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

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

Para el estudio geológico de Acarí, se hace uso de la información contenida en el compendio de geología regional de INGEMMET (a escala regional 1:100000), complementado con la geología local obtenida en base al cartografiado realizado en campo (escala 1:5000). Se debe describir las principales unidades litológicas aflorantes y sus características más resaltantes; información importante para un estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica de la ciudad de Acarí.

### 9.2.1- Geología Regional

En la ciudad de Acarí y alrededores, las rocas más antiguas corresponden al intrusivo Tiabaya y a la Formación Hualhuani de edad Cretácica conformadas por rocas de naturaleza sedimentaria. Además, afloran rocas plutónicas correspondientes al Intrusivo Bella Unión, también de edad Cretácica. Los materiales del Cuaternario son de edad Pleistocena Inferior, época en la que comenzaron a depositarse y dar geformas correspondientes a terrazas marinas debido al desarrollo de deposiciones de materiales eólicos y aluviales. Estos materiales cuaternarios cubren hasta un 65% de la superficie de la zona de estudio.

Durante el Mioceno superior, se produjeron esfuerzos tensionales que culminaron en movimientos extensivos y la invasión del mar. El resultado fue el depósito de materiales que se acumularon en ambientes playeros, cambiando gradualmente a condiciones de aguas poco profundas y dando como resultado alternancias de sedimentos marinos con cenizas y tufos redepositados.

Durante el Plioceno, la transgresión se extiende hacia la Cordillera de los Andes, produciéndose nuevos levantamientos y la continua regresión, iniciada en el Plioceno, para permitir el desarrollo de terrazas marinas. Estos rasgos geomorfológicos son disectados por la erosión de los ríos de la costa, cuyo poder erosivo se incrementa por efectos de la glaciación en la región cordillerana. Sobre esta geomorfología se acumularon dunas, cubiertas eólicas y depósitos aluviales. Además, la acción eólica fue modificando incipientemente el relieve durante el Holoceno, desde hace 2.5 millones de años hasta la actualidad.

Para describir las principales unidades geológicas regionales, se consideró como base la información descrita por INGEMMET a escala 1:100000, Cuadrángulos de San Juan (31m), Acarí (31n) y Yauca (32n), Hoja 31n (Caldas, 1978).

### 9.2.2- Geología Local

Para la elaboración del mapa geológico local se ha considerado la recopilación de la información publicada por INGEMMET (Caldas, 1978), mapas geológicos y estudios neotectónicos. Posteriormente, en campo se realizó la delimitación de las principales unidades geológicas aflorantes a fin de obtener el mapa geológico a escala 1:15000 (Figura 28), sobre el cual se puede identificar la presencia de 5 unidades del Cuaternario que no han sido consideradas en la cartográfica del INGEMMET. Estas unidades cronoestratigráficas corresponden al Holoceno (11500 años) y entre ellas se puede citar a los Depósitos fluvio-aluviales antiguos, fluviales, eólicos y coluvio-aluviales. Esta información ha permitido construir la columna litoestratigráfica para la ciudad de Acarí, Tabla 1.

Finalmente, en la ciudad de Acarí se ha reconocido las unidades litológicas que se detallan a continuación:

Tabla 1: Columna litoestratigráfica de las principales unidades que afloran en la ciudad de Acarí y alrededores

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Fluvio-aluvial antiguo		
			Dep. Fluviales		
			Dep. Eólico		
			Dep. Aluvial	Qh-al	
			Dep. Coluvio-aluvial		
	NEOGENO	Plioceno			
		Mioceno			
MESOZOICO	CRETACEO	Superior	Fm. Tiabaya	Ks-ti	Super Unidad Linga
		Inferior	Fm. Copara	Kim-co	Fm. Bella Unión
	JURACICO	Medio	Fm. Hualhuani	Ki-hu	
		Inferior			

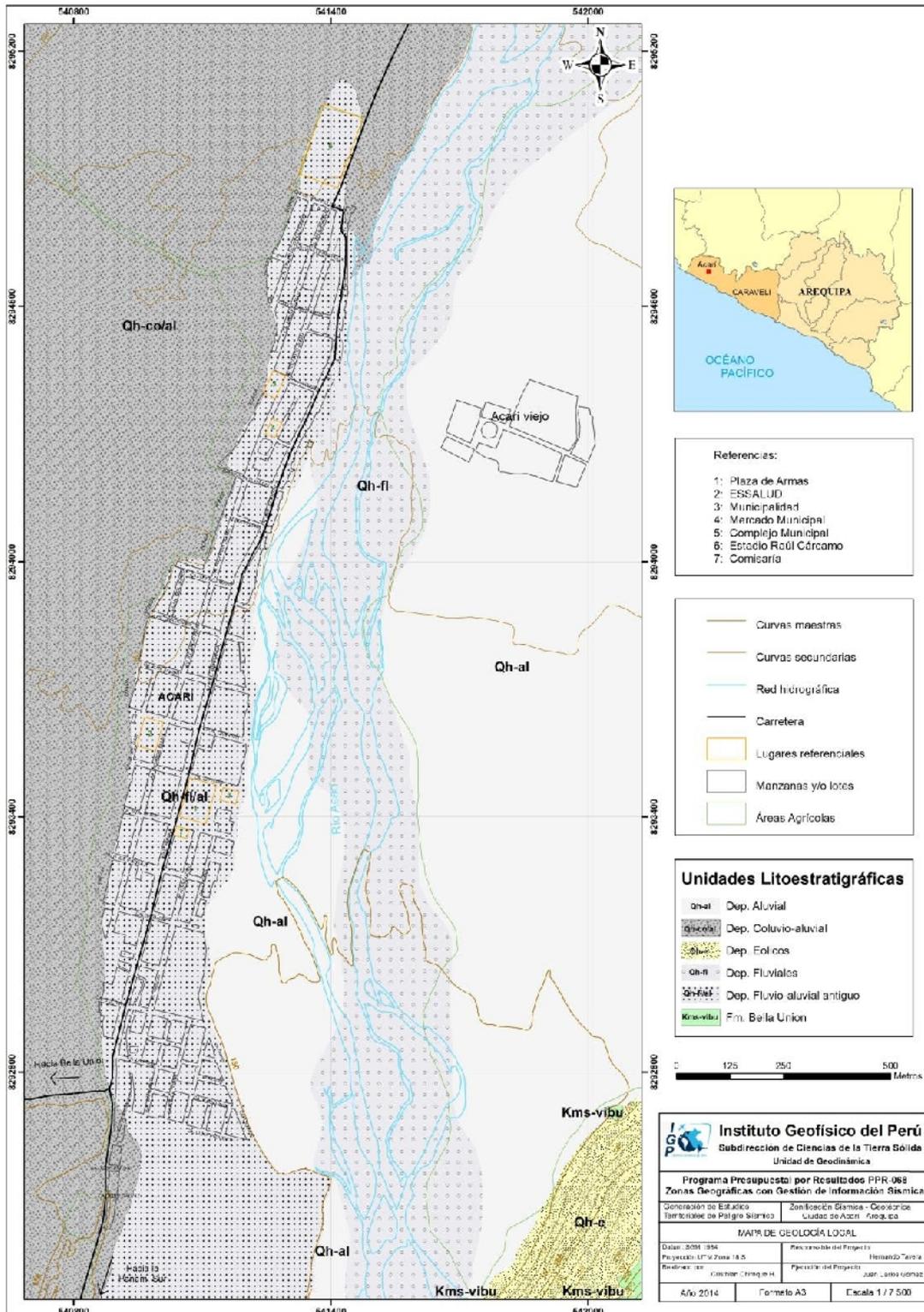


Figura 28: Mapa geológico local de la ciudad de Acari y alrededores

.- **Formación Hualhuani (Ki-hu):** Litológicamente, la formación está conformada por areniscas cuarzosas que meteorizan en tonalidades de blancas a amarillentas y de rojizas a marrones (Figura 29). Este tipo de rocas afloran en la margen izquierda del río Acarí formando los cerros Rodadero, Cruz y Cascajal, entre otros.



Figura 29: Obsérvese la presencia de rocas aflorantes de la Formación Hualhuani con alturas de hasta 600 m.s.n.m y cubiertas detríticas producto de la meteorización de la roca in situ.

.- **Formación Copara (Kim-co):** Es una secuencia clástica que aflora a 1 km al norte de Acarí. Está conformada por areniscas feldespáticas y grauvacas con coloraciones gris verdosas. Asimismo, muestran intercalaciones de tufos volcánicos (tobas) de tonos violáceos, todos acompañados de flujos lávicos brechosos, Figura 30.



Figura 30: Afloramiento de tobas volcánicas intensamente diaclasadas y meteorizadas.

.- **Super Unidad Linga (Ks-li)**: Corresponde a rocas intrusivas tipo cuarzo-monzonita, afloran al NW de la ciudad de Acarí en los cerros Portachuelo y Chocavento, Figura 31.



Figura 31: Rocas intrusivas de estructura granular y alto porcentaje de cuarzo.

.- **Formación Tiabaya (Ks-ti/to-gd)**: Corresponde al miembro más joven del Batolito de la costa y, está conformada por tonalitas y granodioritas grises. En general, se trata de rocas intrusivas que van desde la granodiorita hasta las monzonitas, tonalitas y dioritas. Estos cuerpos constituyen afloramientos aislados presentes en la margen izquierda del río Acarí formando cerros de hasta 300 m de altura.

.- **Formación Bella Unión (Kms-vibu)**: Llamado Volcánico Intrusivo Bella Unión. Esta formación se ha emplazado como grandes cuerpos intrusivos de ambientes hipabisales; es decir, se formaron a profundidades intermedias. Localmente los afloramientos se encuentran a 1.4 km al SE de Acarí, en la margen derecha del río del mismo nombre (Figura 32). Está constituido por andesitas marrones a violáceas, con tonos grises que varían a verdes por alteraciones hidrotermales. La formación de los intrusivos está asociada al emplazamiento forzado, el cual provocó deformaciones y fracturas, principalmente en las formaciones Yauca y Copara.

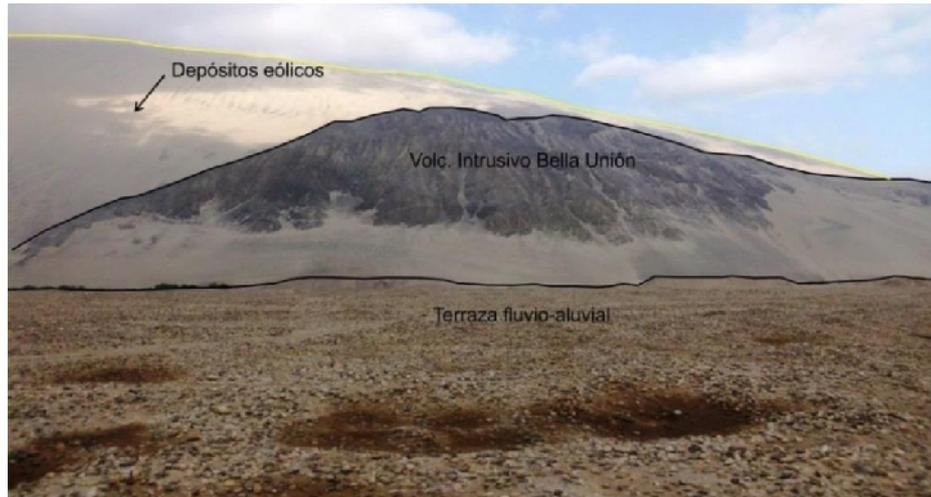


Figura 32: Cerro Rodadero donde afloran rocas del volcánico intrusivo Bella Unión, ubicado a 1.6 km al Sureste del centro de la ciudad.

**.- Depósitos Cuaternarios:** Son materiales de cobertura constituidos por depósitos de origen volcánico, eólico, coluvial, aluvial, etc. Los depósitos están conformados por materiales provenientes de la erosión de laderas debido al agua de escorrentía que se forma por precipitaciones intensas. La actividad eólica se observa con mayor intensidad al este de la ciudad de Acarí, desde el cerro Rodadero hasta el sector Lucasi.

Las características de estos materiales se describen a continuación:

**.- Depósito coluvio-aluvial (Qh-co/al):** Están conformados por materiales angulosos a sub-redondeados debido a su corto recorrido. Estos son originados por la meteorización de rocas, la acción de la gravedad y por flujos de agua superficial (escorrentía). Su origen considera bloques y fragmentos rocosos que son transportados por flujos con matriz lodosa (aluvión) y depositándose en las partes bajas de las laderas de cerros y en las zonas con pendiente sub horizontal, Figura 33.

**.- Depósitos aluviales (Qh-al):** Se denominan así a los materiales heterogéneos que han sido transportados y depositados por acción de los flujos de agua superficial provenientes de las quebradas Pedregosa y Portachuelo, pero a diferencia de los depósitos fluviales presentan menor transporte. Los suelos del área de estudio se presentan con intercalaciones de gravas angulosas con arenas de grano medio a grueso con bajo porcentaje de limos y arcillas. Estos depósitos cubren gran parte del área de

estudio y sobre ella, se han desarrollado diversas actividades agrícolas, Figura 33.

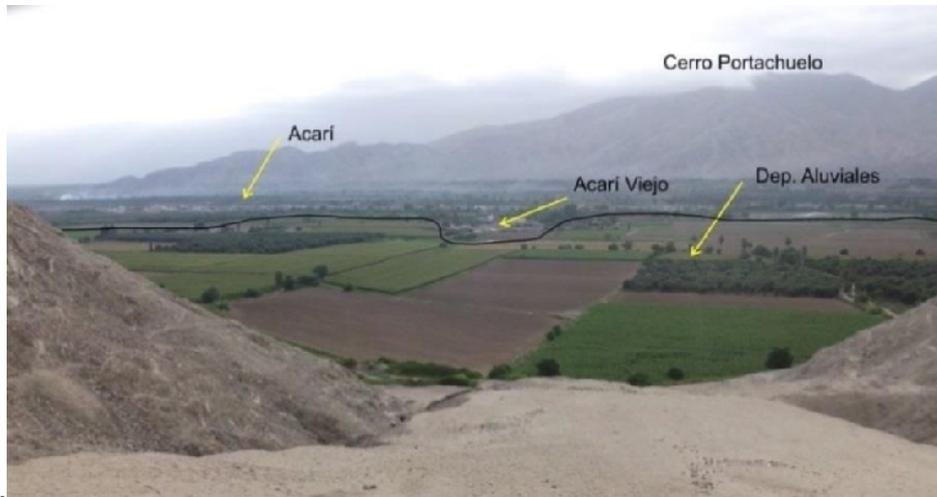


Figura 33: Obsérvese a suelos aluviales utilizados para actividades agrícolas. La presencia de gravas y arenas indican la influencia del río Acarí.

.- **Depósitos eólicos (Qh-e):** Están constituidos por arenas y limos que han sido transportados y depositados por la acción del viento. Se encuentran principalmente al Este de la zona de estudio cubriendo áreas extensas de los cerros Rodadero, Lucasi, Cascajal y Cerro Cruz, Figura 34.



Figura 34: Cerros Cascajal y Lucasi, ubicados al Este de la ciudad de Acarí, con 600 m de altura que actúan como barreras naturales ante el avance de la acción eólica.

.- **Depósitos fluviales (Qh-fl):** Estos materiales son transportados y depositados por el río Acarí; es decir, se encuentran distribuidos principalmente a lo largo del cauce del mismo. En la margen derecha se presentan como terrazas altas sobre las cuales se asienta la mayor parte de

la zona urbana de la ciudad. Los depósitos están conformados por gravas redondeadas bien compactadas, con presencia de matriz areno-limosa, Figura 35.

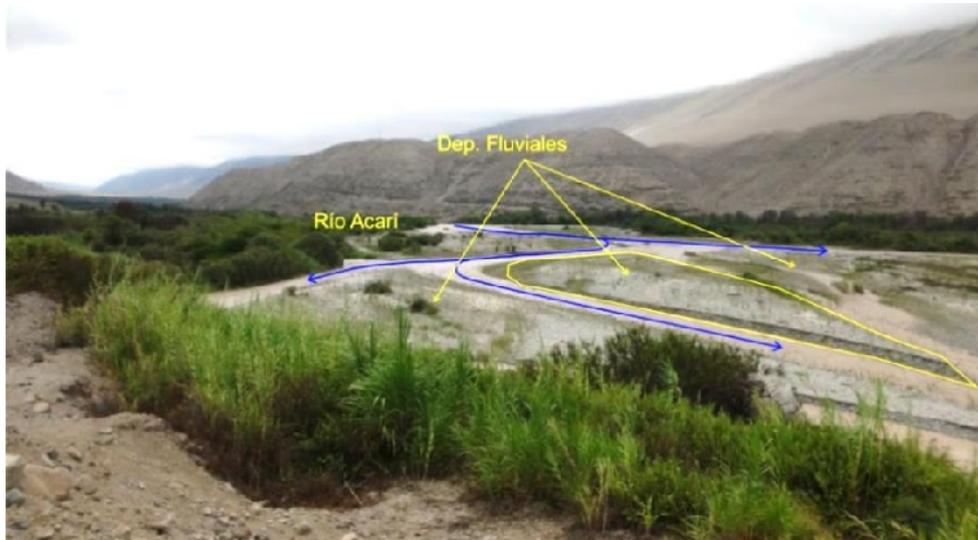


Figura 35: En la parte central y bordes del cauce del río Acarí se observan acumulaciones de gravas redondeadas con arenas gruesas.

**- Depósitos fluviales (Qh-fl):** Depósitos cartografiados en el sector Nueva Esperanza y corresponden a un conglomerado bien compactado y conformado por gravas redondeadas de tamaño variable, de 10 a 30 cm con una matriz arenosa. El espesor promedio de los depósitos es de 5 m. Esta unidad se formó con el aporte de materiales provenientes de grandes aluviones y de la actividad fluvial del río Acarí. Considerando que esta dinámica ha cesado, se les denomina como depósitos antiguos, Figura 36.



Figura 36: Depósitos formado por los grandes aluviones provenientes de las estribaciones ubicadas al oeste de la zona urbana.

### 9.3.- Geodinámica

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

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

***.- Geodinámica Externa:** La geodinámica externa estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra. En tal sentido, las precipitaciones pluviales son las de mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de los Movimientos en Masa (MM), como los deslizamientos, derrumbes y caída de rocas; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren este tipo de eventos.*

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

La geodinámica interna y externa presente en la zona de estudio, es la responsable de modelar la superficie, creando geoformas que han sido objeto de estudio en capítulos anteriores. A continuación, se analiza los procesos dinámicos que

se desarrollan en la ciudad de Acarí, tales como los movimientos en masa y las inundaciones.

### 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 Acarí, 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 Acarí y alrededores, ha permitido identificar movimientos de masa del tipo caída de rocas (tipo de movimiento) y flujos de detritos (tipo de material), siendo sus características las siguientes:

***- Caída de rocas:** Son eventos que involucran el desprendimiento de clastos y bloques de rocas que caen por efectos de la gravedad y movimientos sísmicos, entre otros. En el proceso de caída puede aumentar o disminuir de velocidad de acuerdo a la pendiente del suelo. Asimismo, los volúmenes y dimensiones de las rocas dependerán de la pendiente, del grado de intemperismo y diaclasamiento de las rocas. Estos movimientos en masa, están presentes en el flanco este de las laderas de los cerros Rodadero y Portachuelo, ambos ubicados a 1.5 y 2.5 km al este y oeste de la ciudad de Acarí, Figura 37.*



Figura 37: El cerro Portachuelo se encuentra cubierto por clastos y bloques de rocas producto de las caídas de los materiales provenientes de la parte alta.

**.- Flujo de detritos:** En este tipo de eventos, los sedimentos controlan el flujo y predominio sobre la fase granular, son rápidos y turbulentos, discurren a lo largo de canales o cauces de quebradas. Los factores como pendientes, escasa vegetación y antiguos flujos condicionan su ocurrencia, aunque las precipitaciones pluviales actúan como el factor detonante.

En el área de estudio, los flujos están conformados por gravas, clastos y bloques angulosos mal gradados con diámetros que van desde 10 cm hasta 1 m en promedio, todos transportados en suspensión por una matriz arcillo - limosa. En el extremo oeste de la ciudad de Acarí, se encuentra la quebrada Pedregosa, en ella han ocurrido varios flujos y haciendo uso de imágenes satelitales, se determinó que ellos habrían recorrido aproximado entre 1 a 2 km, Figuras 38 y 39.



Figura 38: Los flujos de detritos son eventos activados en períodos de precipitaciones intensas que afectan áreas de cultivo e infraestructura de agua potable y riego.



Figura 39: Cauce de la quebrada Pedregosa en donde se observa la matriz fina y los materiales granulares sobre los clastos y bloques transportados en dirección oeste-este.

### 9.3.2.- Procesos Eólicos y Fluviales

Debido a que, estos procesos no se encuentran dentro de la clasificación de los Movimientos en Masa, se procede a describir sus características de manera independiente.

**- Migración de Arenas:** *En la zona de estudio, los vientos tienen dos direcciones de propagación: SSE y NNO, y ambas están relacionadas con los denominados “Vientos Paracas”. Este fenómeno es uno de los factores determinantes en la dinámica eólica de la ciudad de Acarí. Según Escobar (1993), los Vientos Paracas (VP) corresponden a una tormenta de arena y polvo que se inicia en la localidad de Tanaca (Arequipa) hasta Pisco en Ica. La máxima ocurrencia se da entre los meses de julio y setiembre, con velocidades superficiales de 17 m/s aproximadamente.*

*Los factores locales como la topografía (cerros) y su interacción con los vientos en superficie (Dale, 1990), generan la intensificación local del viento a sotavento (a favor del viento). En zonas con topografía elevada se reduce el barlovento (opuesto a la dirección del viento). A este proceso también se le contribuye la radiación que llega a la superficie debido a la ausencia de nubosidad.*

**- Interpretación de la dinámica eólica:** *En la ciudad de Acarí y alrededores, los factores que favorecen a la formación de extensos mantos de arena son los Vientos Paracas (VP) y la topografía pre-existente en la zona (cerros). El primero transporta los sedimentos finos y arenas de fuentes ubicadas, desde Tanaca (Arequipa) hasta Pisco (Ica), con vientos que se trasladan sobre la ciudad de Acarí con direcciones S-SE y N-NO, junto a otros procedentes del mar hacia el continente (O-E).*

*Desde el punto de vista topográfico, las estribaciones formadas por los cerros Rodadero, Cascajal, Cruz y Lucasi (ubicados en dirección este con respecto a la ciudad), se comportan como barreras naturales para el avance de las arenas, lo cual facilita su acumulación e incrementan la alturas de los cerros, actualmente del orden de 600m.s.n.m, Figura 40.*

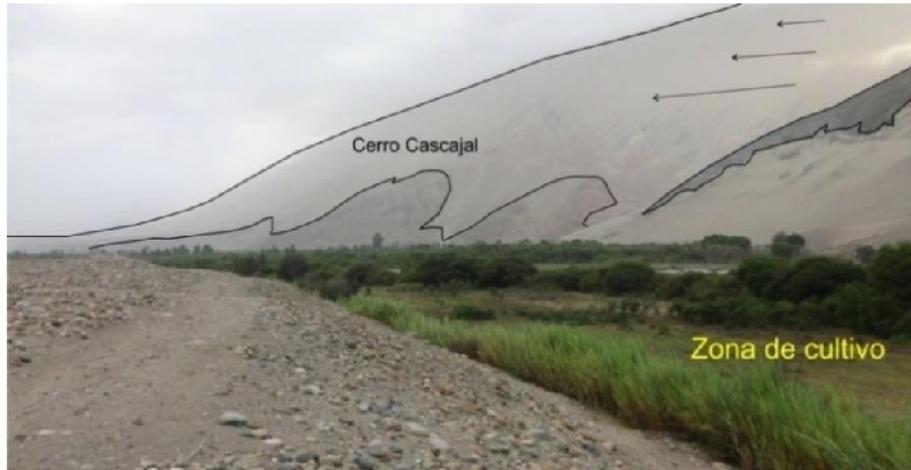


Figura 40: Vista del cerro Cascajal y dinámica eólica que cubre a los afloramientos rocosos. Las flechas indican la dirección de los vientos (S-SE).

**Erosión fluvial:** Corresponde al desgaste continuo de la ribera de los ríos debido al flujo de agua y cuya intensidad está ligada a la presencia de lluvias. Ambos controlan el grado de erosión, pasando de ser destructiva a modeladora de la morfología de la zona.

A lo largo del río Acarí, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, la dinámica descrita es activa debido a que no existen obras de mitigación como los enrocados o muros de contención que ayuden a disminuir la acción erosiva en las riberas (Figura 41). Por ejemplo, la pérdida de terrenos de cultivo evidencia la fuerte erosión que ejerce el río Acarí en la zona y que se intensifica en presencia de “El Niño”.



Figura 41: Las bases y secciones laterales del Puente Acarí muestran intensa erosión fluvial. Obsérvese el desprendimiento de materiales que caen al cauce.

### 9.3.3.- Hidrografía

La cuenca del río Acarí cubre un área alargada de drenaje de 4,299 km<sup>2</sup>, siendo su patrón de tipo dendrítico. En su inicio, la cuenca presenta un relieve favorecido por fuertes pendientes y valles angostos (Figura 42).

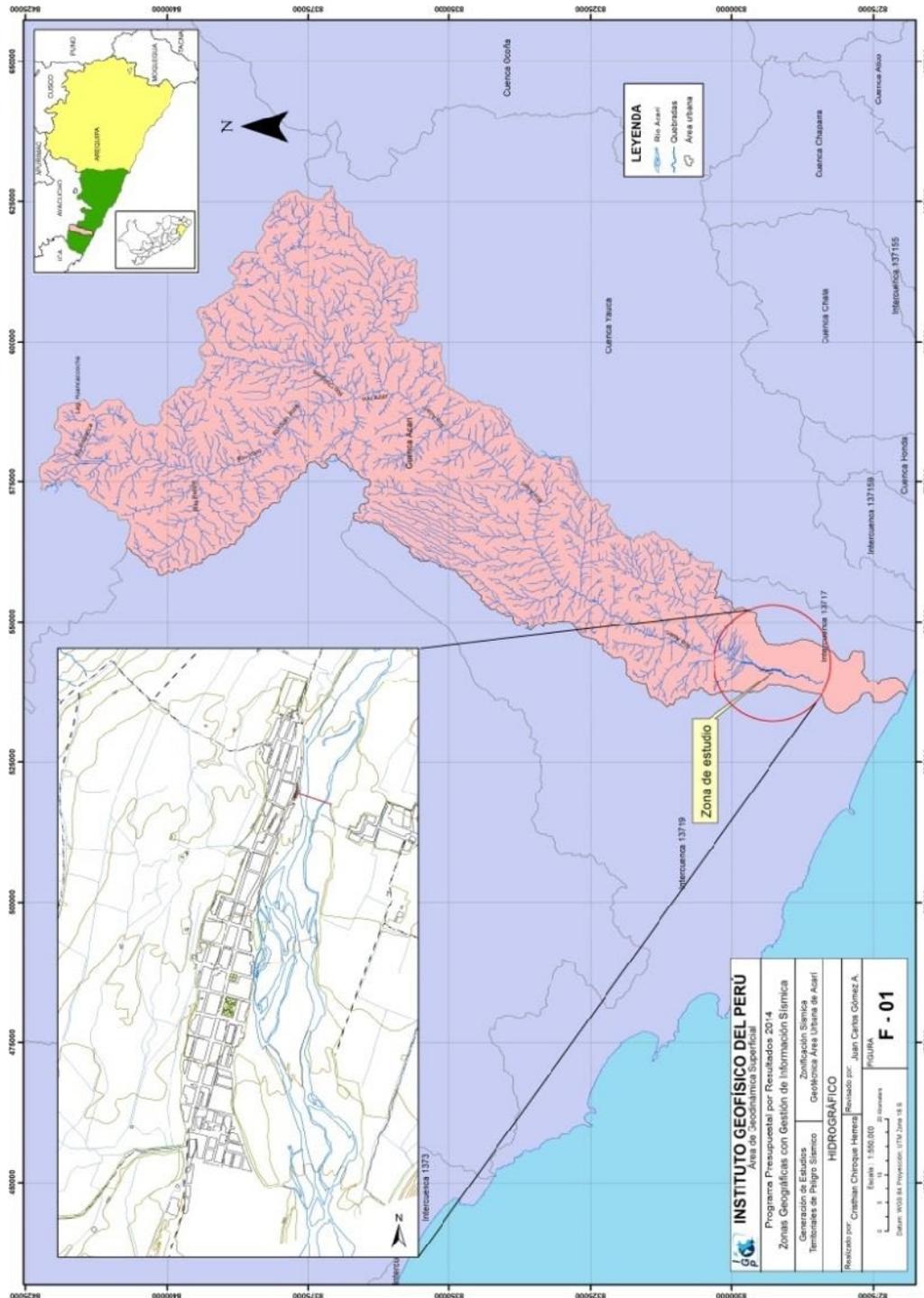


Figura 42: Ubicación de la cuenca del río Acarí y sus principales afluentes.

El río Acarí nace en la laguna Huancacocha, adoptando su primera denominación como río Intoncca; posteriormente, a lo largo de su recorrido toma otros nombres como río Iruro y luego de la confluencia con el río Pallpo, adquiere el nombre de San José. Después de la confluencia de este río con el Chilques, recibe el nombre de río Acarí, el cual conserva hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (Figura 42). El régimen del río Acarí es torrencioso e irregular, alcanza una longitud de 180 km con una pendiente promedio de 2%, Figuras 43 y 44.



Figura 43: Río Acarí cuyas aguas fluyen de NE a SO. Las zonas urbanas de Acarí y Acarí Viejo se ubican sobre la margen derecha e izquierda del río respectivamente, la estructura más importante es el puente que conecta ambas ciudades.



Figura 44: Vista aguas abajo del Río Acarí, sector Nueva Esperanza. Obsérvese que en la margen izquierda existen zonas con pendientes casi horizontales en contraste con la morfología de la margen derecha.

## 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 Acarí se recolectó información según las siguientes técnicas:

**.- Exploraciones a cielo abierto** (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Acarí se construyeron 7 calicatas (Tabla 2 y Figura 45), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 2.8 metros y la mínima de 2 metros (ver Anexos).

Tabla 2: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
ACA-01	541424	8294839	170	2.10
ACA-02	541259	8294290	165	2.70
ACA-03	541594	8294333	165	2.00
ACA-04	541110	8293960	160	2.80
ACA-05	541055	8293744	160	2.60
ACA-06	540924	8293305	155	2.60
ACA-07	540889	8292740	150	2.00

**.- Densidad de suelo in situ** (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó el ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. En la Tabla 3 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación.

**.- Exploración con posteadora manual** (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 7 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 4), siendo en este caso, la máxima

profundidad de observación de 2.4 metros y la mínima de 0.2 metros (ver Anexos). Los resultados obtenidos indican que en la ciudad de Acarí, los suelos están conformados principalmente por gravas arenosas.

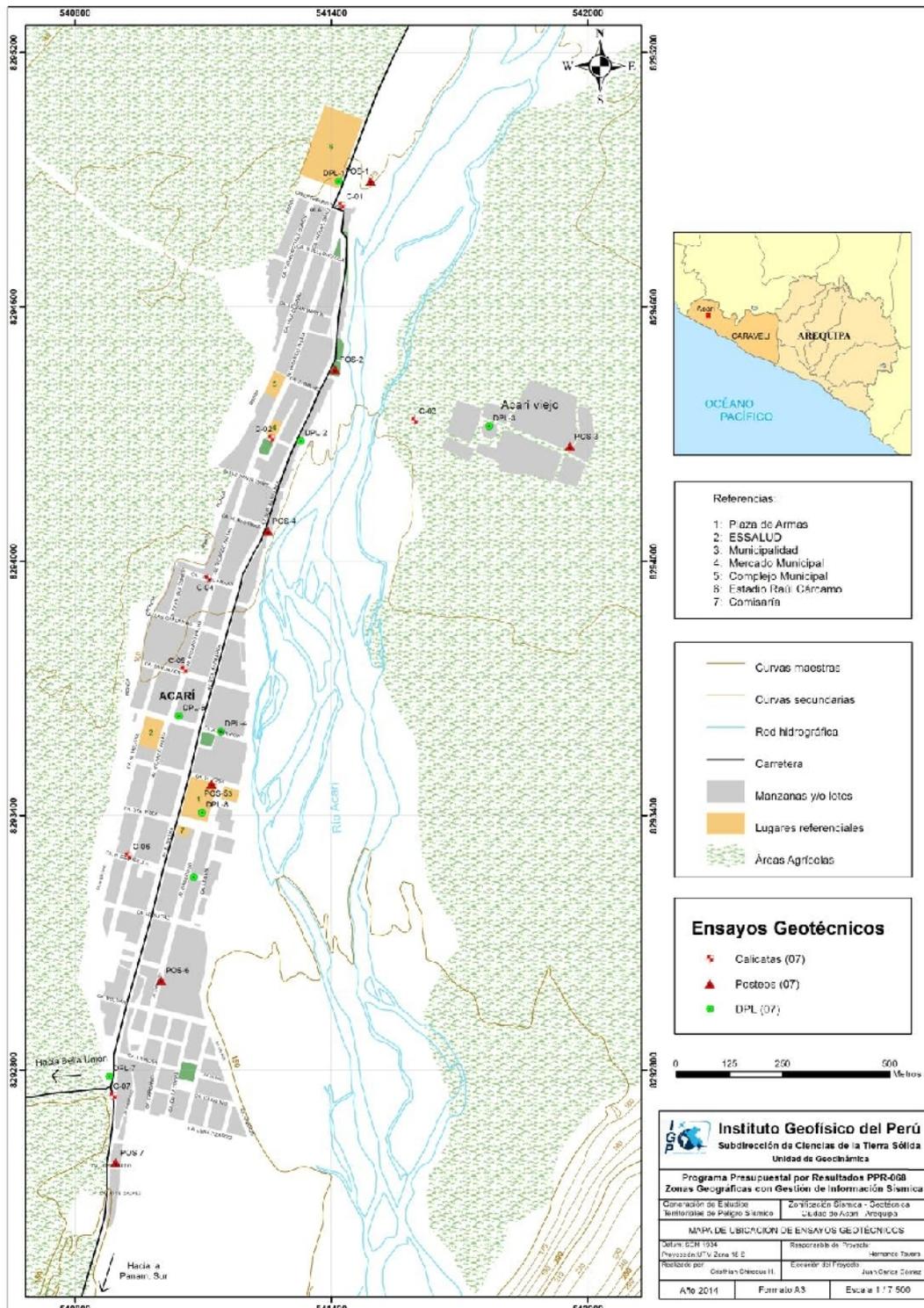


Figura 45: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Acarí

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

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

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

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
POS-01	541492	8294897	170	0.40
POS -02	541408	8294453	165	0.20
POS -03	541958	8294271	165	2.40
POS -04	541251	8294072	165	1.00
POS -05	541119	8293475	160	0.60
POS -06	541001	8293012	155	0.30
POS -07	540895	8292582	150	0.20

**.- 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 Acarí (Tabla 5). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 1.48 metros y mínima de 0.20 metros debido a que los suelos están conformados por gravas y arena; además de presentar ángulos de fricción promedio de 32° y 37°, propios de suelos granulares (ver Anexos).

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

DPL	UBICACIÓN			PROFUNDIDAD (m)
	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	ELEVACIÓN (m.n.s.m)	
DPL-01	541417	8294896	170	0.40
DPL-02	541328	8294284	165	0.60
DPL-03	541769	8294319	165	1.48
DPL-04	541141	8293598	160	0.08
DPL-05	541077	8293255	155	0.20
DPL-06	541043	8293635	160	0.06
DPL-07	540880	8292785	150	0.46
DPL-08	541097	8293407	160	0.30

.- **Ensayo de corte directo** (Norma ASTM D3080): Para conocer la resistencia de los suelos al corte, se procedió a enviar al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina las 7 muestras extraídas de campo y los resultados se muestran en la Tabla 6. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Acarí no presentan cohesión; mientras que, los ángulos de fricción interna superan los 37°, propios de suelos granulares como las arenas y gravas.

### 10.1.- Capacidad de Carga Admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad de carga admisible. De los ensayos de corte directo se hace uso los datos del ángulo de fricción y la cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3 definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Acarí, 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. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7 y en la Figura 46.

Según los resultados obtenidos, la ciudad de Acarí se asienta sobre suelos con capacidad portante alta ( $<3 \text{ km/cm}^2$ ), registrándose el máximo en la Calle San Javier (extremo NE de la plaza de Armas, Calicata 05) con valores de  $4.99 \text{ km/cm}^2$ . La clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 8.

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

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Densidad húmeda (tn/m <sup>3</sup> )	Densidad seca (tn/m <sup>3</sup> )	Humedad %
ACA-01	37.59	0.00	1.95	1.92	3.93
ACA-02	37.80	0.00	1.96	1.70	10.27
ACA-03	37.31	0.00	1.95	1.54	7.83
ACA-04	35.32	0.00	1.84	1.27	3.55
ACA-05	37.59	0.00	1.95	1.73	1.84
ACA-06	37.74	0.00	1.95	1.53	1.57
ACA-07	37.22	0.00	1.95	1.35	1.47

Tabla 7: Rangos establecidos para la capacidad portante en la ciudad de Acarí

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
ACA-01	137.20	3.43
ACA-02	139.61	3.49
ACA-03	185.65	4.64
ACA-04	184.34	4.61
ACA-05	199.63	4.99
ACA-06	142.18	3.55
ACA-07	183.09	4.58

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

Capacidad de Carga Admisible Kg/cm <sup>2</sup>	DENOMINACIÓN
<1.0	Muy Baja
1.0 – 2.0	Baja
2.0 – 3.0	Media
>3.0	Alta

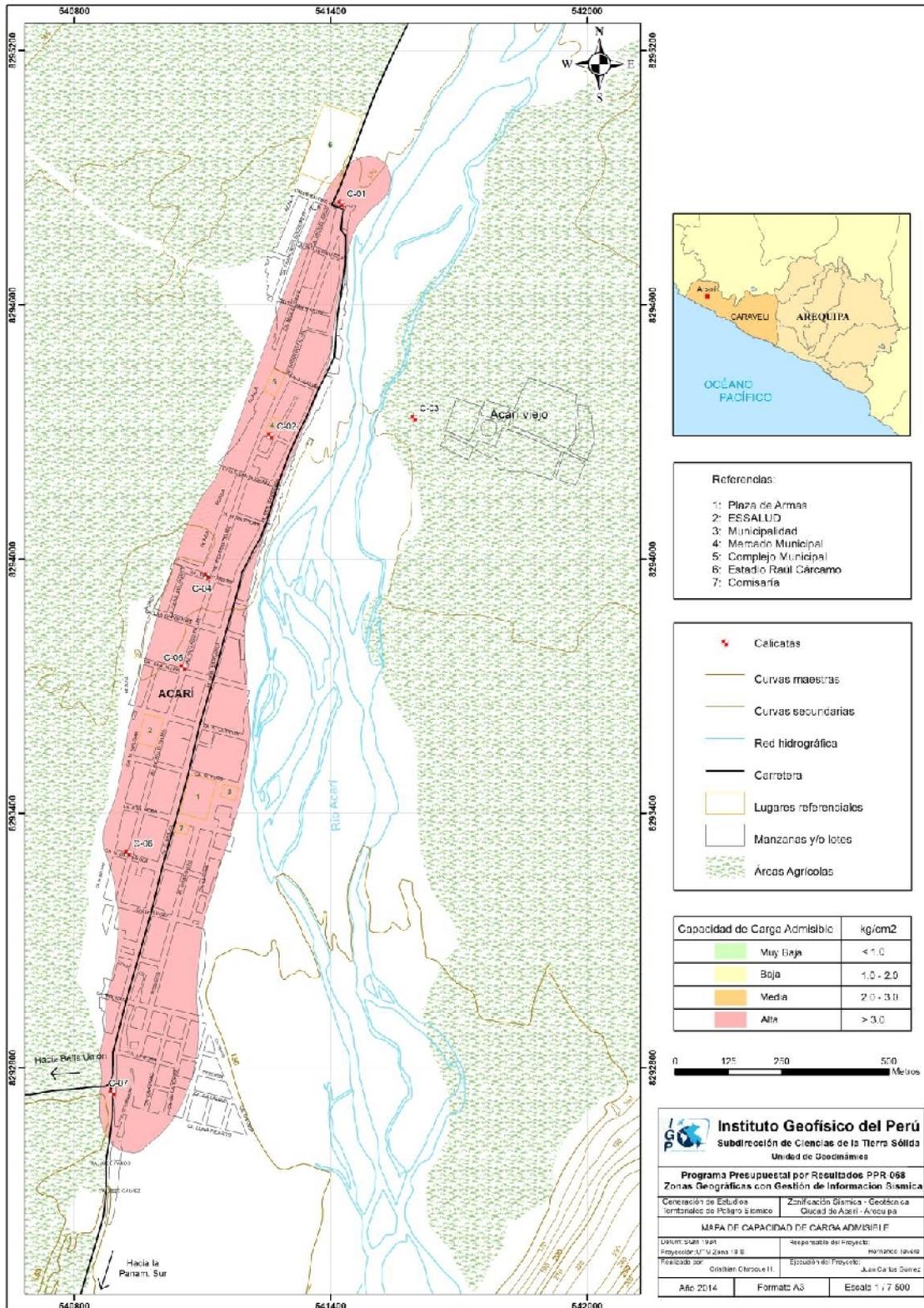


Figura 46: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Acarí y alrededores

## 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 Acarí. Se ha identificado la existencia de 2 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 47):

*.- Suelos tipo GP: Estos suelos están conformados por gravas arenosas mal gradadas que caracterizan por presentar un contenido de humedad de 1% a 3%; además su permeabilidad es de media a alta y por ellos se les consideran como suelos compactos. No presentan plasticidad y su capacidad de carga admisible fluctúa entre 3.40 y 4.40 Kg/cm<sup>2</sup>. Los materiales granulares sobrepasan el 60% en promedio; mientras que, los finos no superan el 39%.*

*Estas gravas ocupan el 60 % de los suelos de la ciudad de Acarí. Han sido identificados en la mayor parte de la zona urbana: entrada hacia Acarí Viejo, El estadio Municipal y la I.E. 40262.*

*.- Suelos tipo SP: Los suelos están conformados por arenas mal gradadas con presencia de gravas. El contenido de humedad no supera el 4%, por lo que se consideran materiales con permeabilidad media a moderada, se presentan inconsolidados o sueltos y sin plasticidad. La capacidad de carga admisible es de 4.6 Kg/cm<sup>2</sup>.*

*Estos suelos abarcan el 20% de la ciudad de Acarí, por ejemplo en la calle Túpac Amaru (calicata 4).*

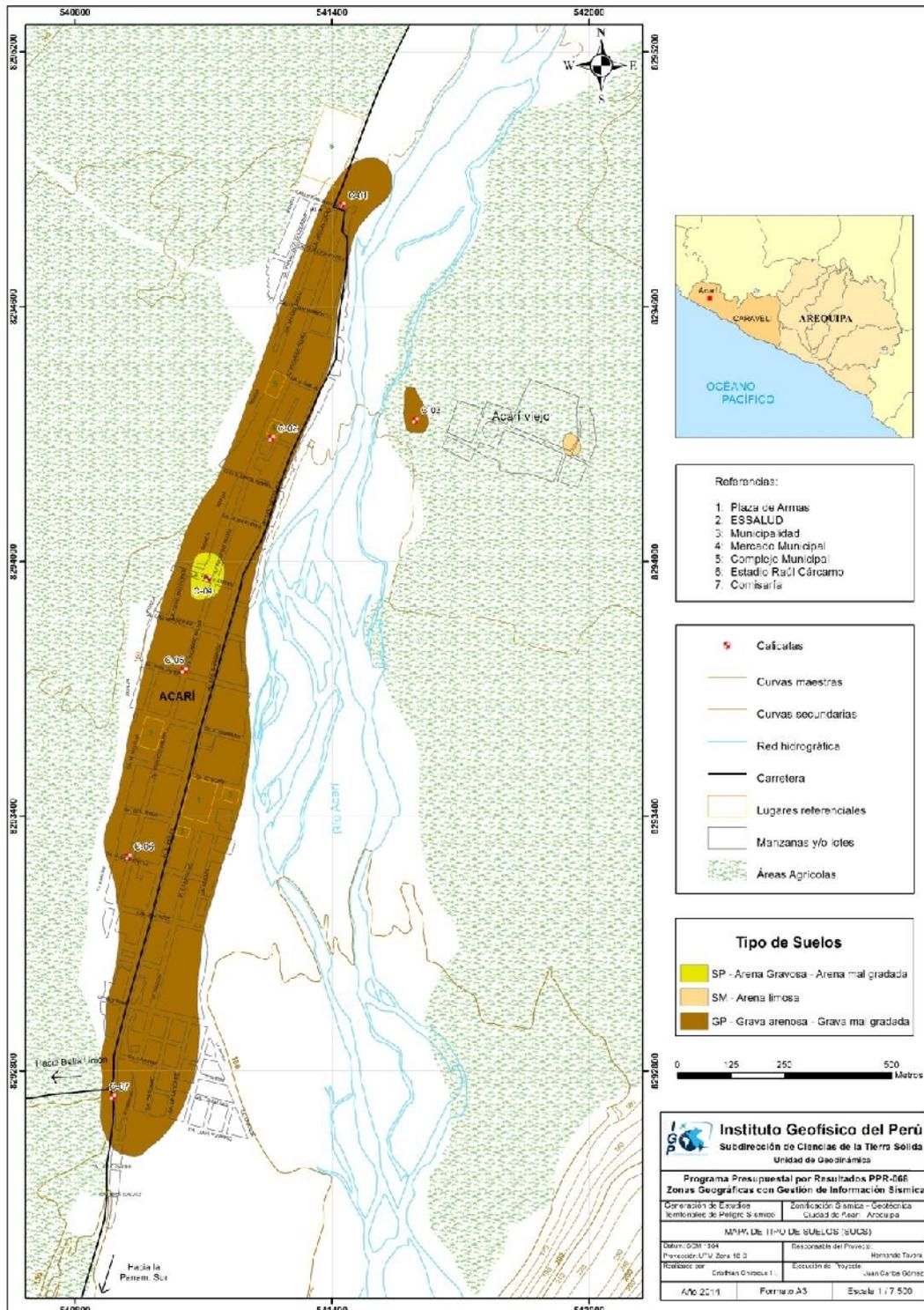


Figura 47: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Acarí y alrededores

## 11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos lineales (MASW) y tomografía eléctrica. Todos tienen como principal objetivo conocer las propiedades físicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.) a efectos de lograr su caracterización geofísica. A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos para la ciudad de Acarí.

### 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 Acarí, 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 48 se muestra la distribución espacial de los 92 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 49 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto AC-46. 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 a 7 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que a la frecuencia de 7 Hz la energía se irradia en dirección este-oeste. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

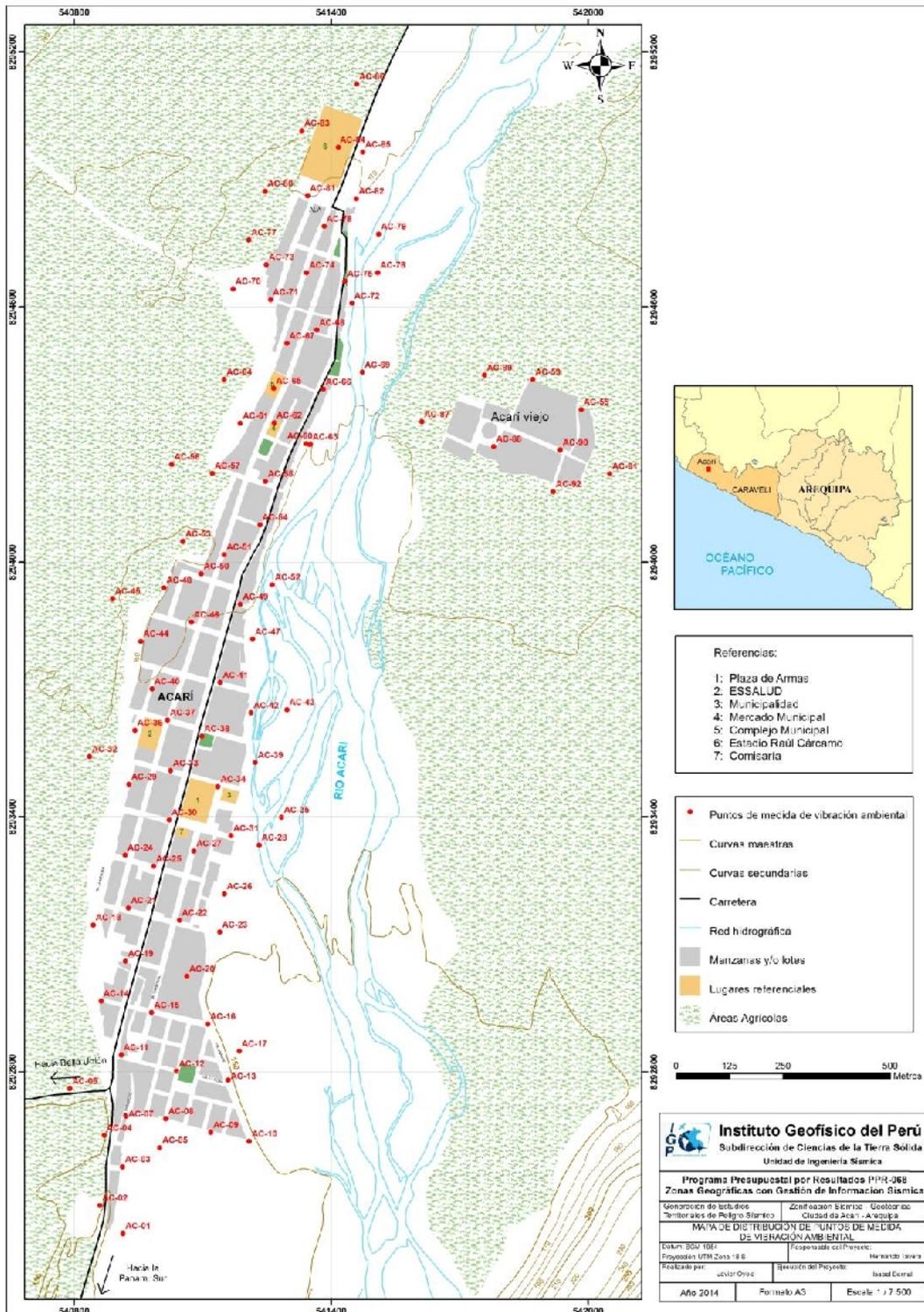


Figura 48: Mapa de la ciudad de Acarí y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

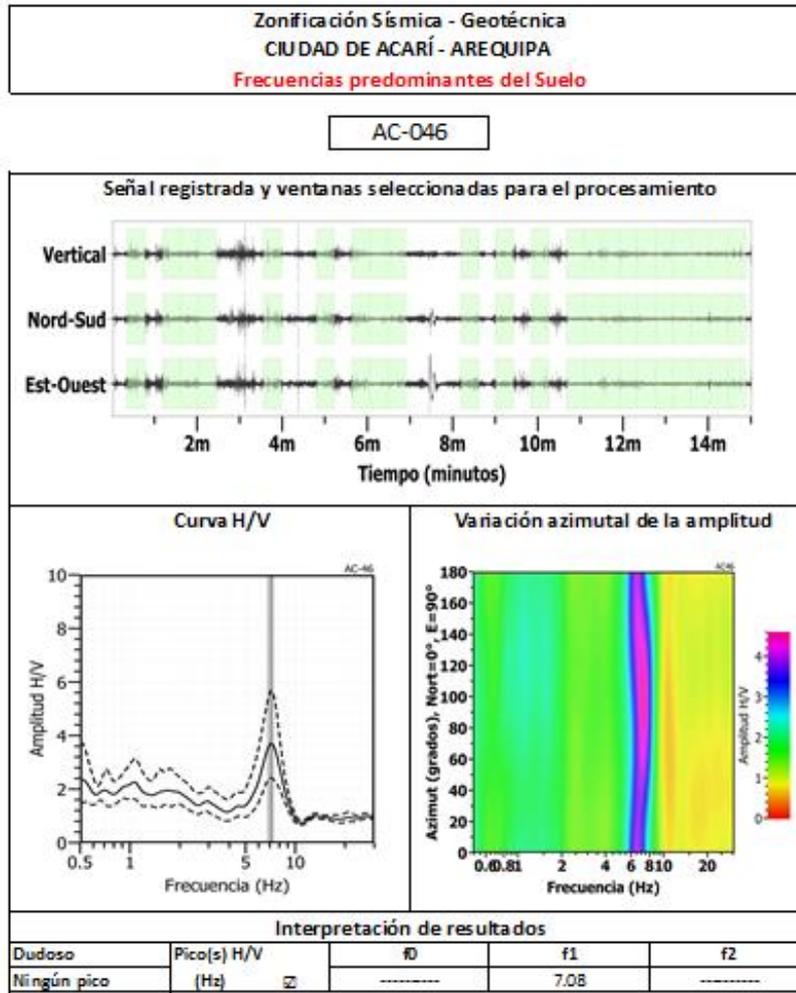


Figura 49: Ejemplo de la ficha H/V para el punto AC-46 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

**- 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 que valores similares para las frecuencias predominantes se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere del análisis detallado para comprender su comportamiento dinámico.

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

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

La información obtenida de las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis tres rangos de frecuencia: Fo ( $F < 2.0\text{Hz}$ ), F1 ( $2.0 \geq F \leq 10\text{Hz}$ ) y F2 ( $F > 10\text{Hz}$ ), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Acarí.

***.- Frecuencias predominantes Fo:** Estas frecuencias se presentan en el 3 % de los puntos donde se recolecto información (Figura 50). Estas frecuencias se distribuyen de manera aleatoria, próximos al cauce del río Acarí. En la Figura 51, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos AC-13, AC-76 y AC-85, donde sobresalen las frecuencias de 1.1, 1.2 y 1.4 Hz con amplificaciones de hasta 3 veces. Estos resultados evidencia la gran flexibilidad de los suelos en este rango de frecuencia.*

***.- Frecuencias predominantes F1:** Este rango de frecuencias se presenta en la mayoría de puntos donde se recolecto información, agrupándose en la zona céntrica de la ciudad de Acarí, tal como se observa en la Figura 52. En el extremo NE y SO de la ciudad, las frecuencias se distribuyen de manera dispersa.*

*En la Figura 53, se muestra ejemplos de razones espectrales característicos para cada zona. En los puntos AC-31, AC-46 y AC-90, se identifica la presencia de un solo pico de frecuencia a 6.3, 7.0 y 8.6 Hz, con amplificaciones de 2.4, 3.7 y 4 veces respectivamente. En los puntos AC-07, AC-21 y AC-64 ubicados en el extremo sur de esta ciudad, sobresalen picos a 6.5, 6.4 y 4.7 Hz respectivamente, con amplificaciones máximas de al menos 2 veces. Los puntos AC-23, AC-35 y AC-43, ubicados próximos al cauce del río Acarí, muestran tres picos de frecuencias, el primero a 7.6, 6.4 y 7.8 Hz con amplificaciones de 5.0, 3.2 y 2.8 veces, y el segundo a 15.6, 16.8 y 16.8 Hz con amplificaciones de 3.8, 2.4 y 2.6 veces. Asimismo, la forma de la curva evidencia una migración o tendencia del primer pico al segundo, evidenciando inestabilidad en la respuesta dinámica de los suelos en cada una de las zonas.*

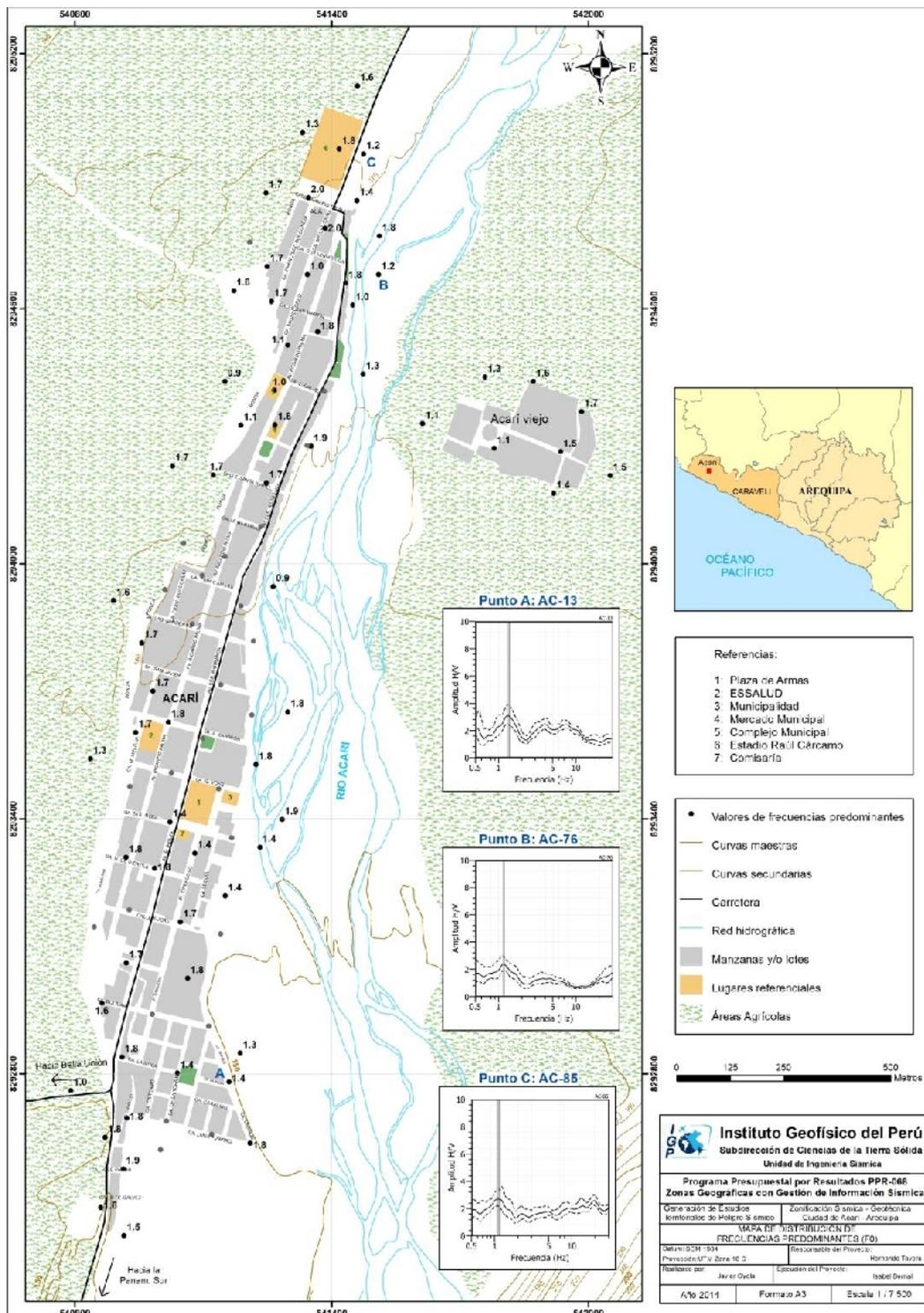
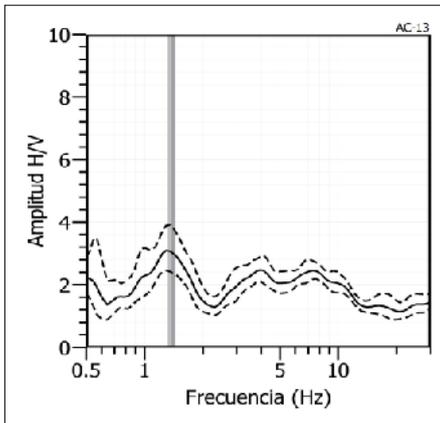
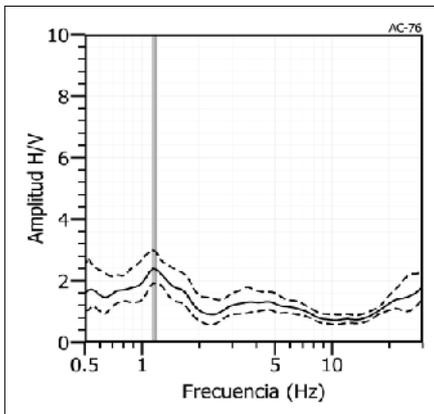


Figura 50: Mapa de la ciudad de Acarí y distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_0$  ( $F_p < 2.0$  Hz). Las letras corresponden a los puntos considerados como representativos para este rango de frecuencias.

**AC - 13**



**AC - 76**



**AC - 85**

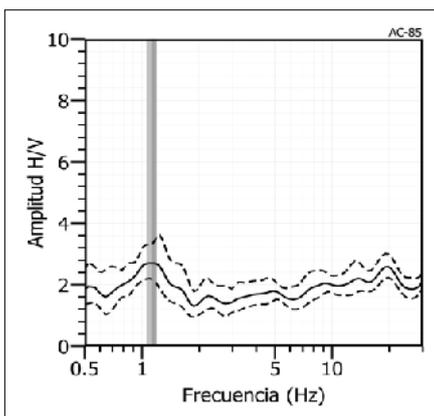


Figura 51: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F < 2.0\text{Hz}$ ): puntos AC-13, AC-76 y AC-85, todos ubicados próximos al cauce del río Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

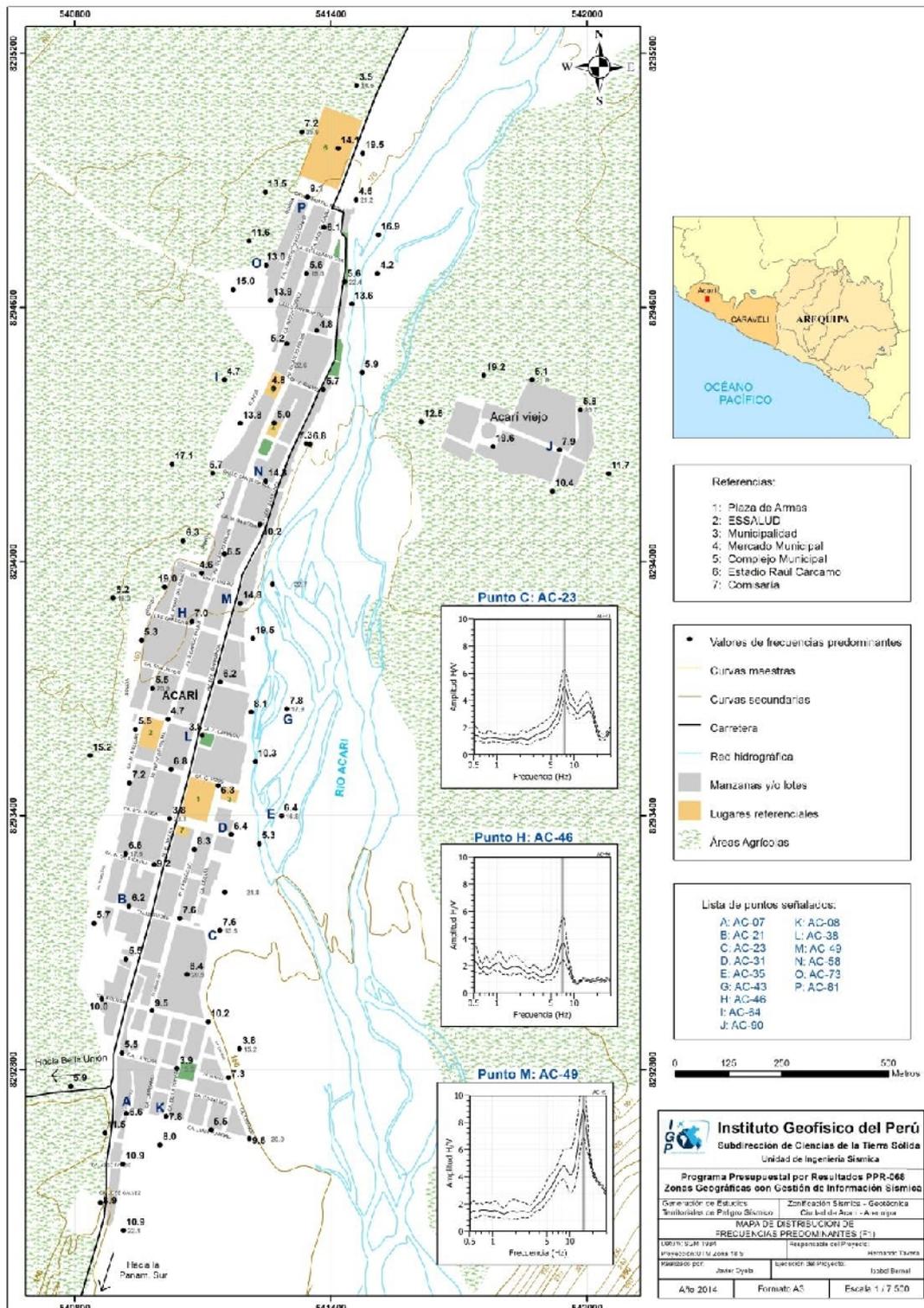
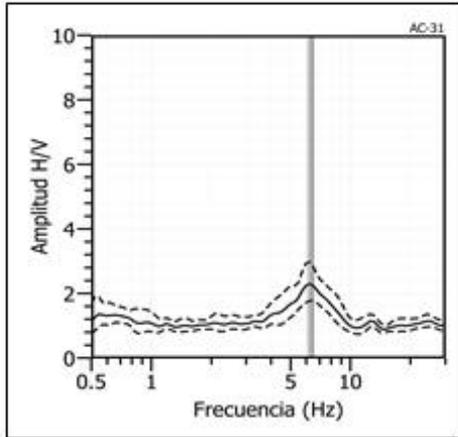
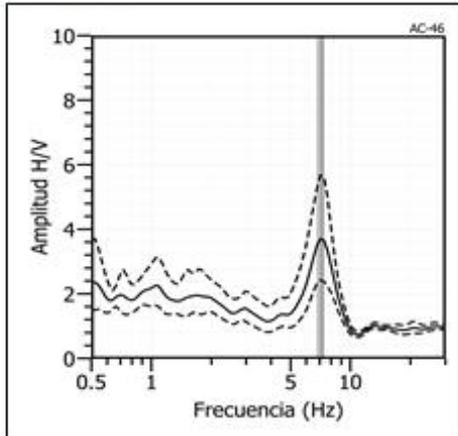


Figura 52: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F1$  ( $2.0 \geq F \leq 10.0 \text{ Hz}$ ) y  $F2$  ( $F > 10 \text{ Hz}$ ). Los valores de  $F1$  y  $F2$ , son diferenciados por su tamaño. Las letras corresponden a puntos considerados como representativos para las diversas zonas y cuyos gráficos se presentan en la Figura 51.

**AC - 31**



**AC - 46**



**AC - 90**

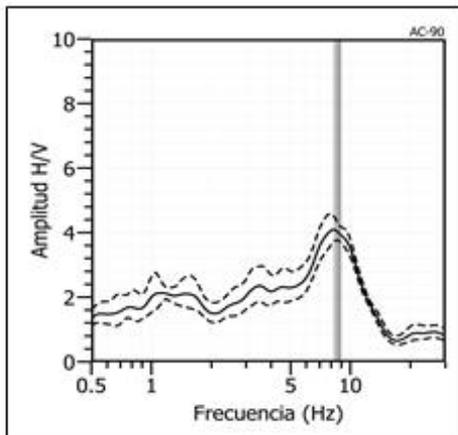
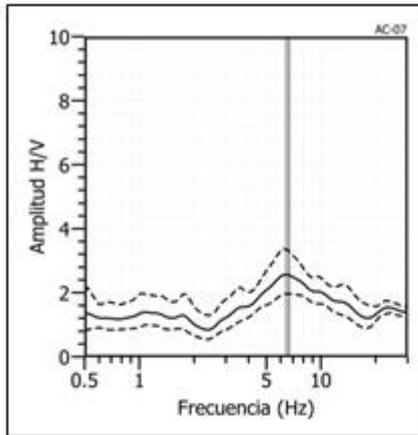
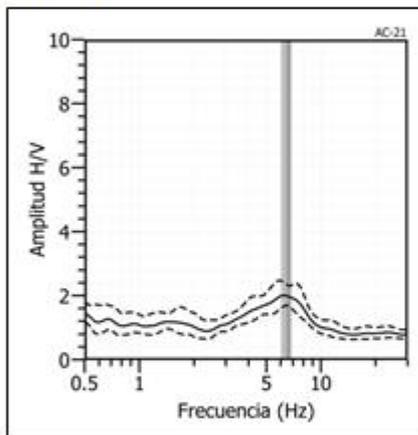


Figura 53: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \leq F \leq 10.0$ Hz): puntos AC-31, AC-46 y AC-90, todos distribuidos a lo en la ciudad de Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**AC - 07**



**AC - 21**



**AC - 64**

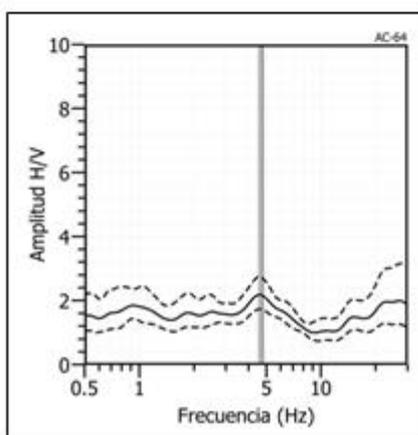
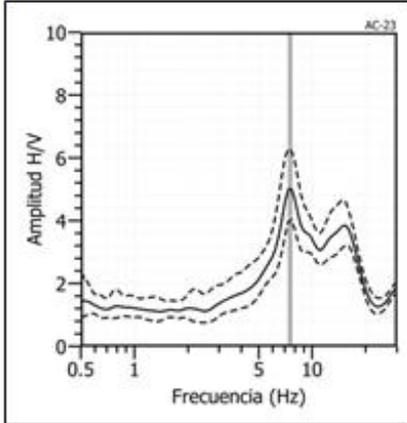
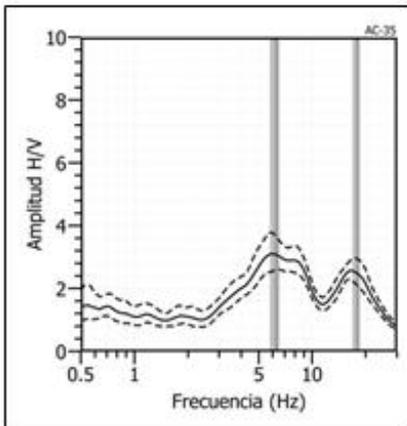


Figura 53: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \geq F \leq 10.0$ Hz): puntos AC-07, AC-21 y AC-64, todos distribuidos sobre el extremo sur de la ciudad de Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AC - 23



AC - 35



AC - 43

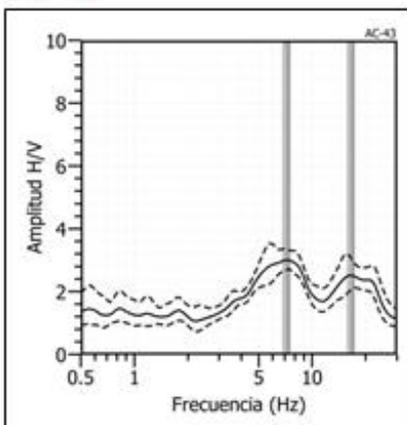
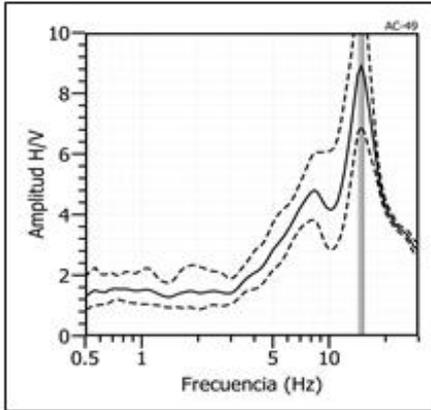


Figura 53: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \leq F \leq 10.0$ Hz): puntos AC-23, AC-35 y AC-43, todos ubicados próximos al cauce del río Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

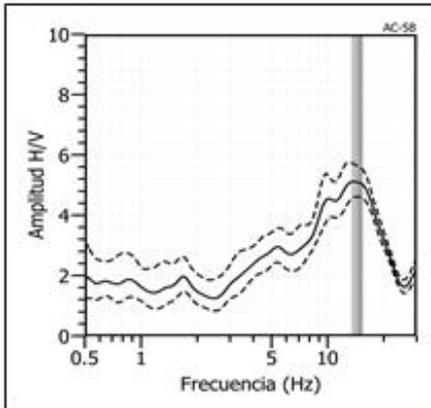
**.- Frecuencias predominantes F2 ( $F > 10\text{Hz}$ ):** Este rango de frecuencias se presenta en un 30% del total de puntos en donde se recolectó información. Estos valores se agrupan de manera preferencial en el extremo NE de la ciudad, y de manera dispersa en dirección SO (Figura 52).

En la Figura 54, se muestran ejemplos de razones espectrales para los puntos AC-49, AC-58 y AC-73, todos ubicados en la zona céntrica y extremo NE de la localidad de Acarí, en ellos sobresalen las frecuencias de 14.8, 14.4 y 12.7 Hz con amplificaciones de 8.8, 5.1 y 5.9 veces. Para los puntos AC-08, AC-38 y AC-81, todos ubicados en la zona sur, centro y norte de la ciudad, no sobresalen ningún rango de frecuencias. Estos resultados evidencian la presencia de suelos superficiales poco compactos y la distribución espacial de los valores, la heterogeneidad horizontal de los suelos en la ciudad de Acarí.

AC - 49



AC - 58



AC - 73

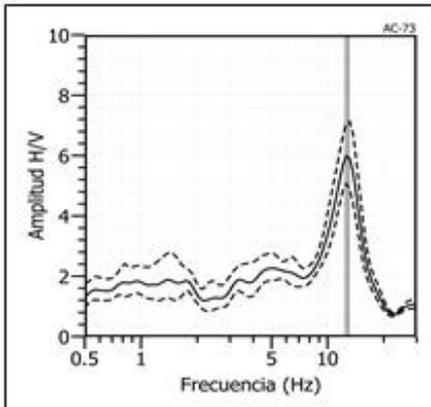
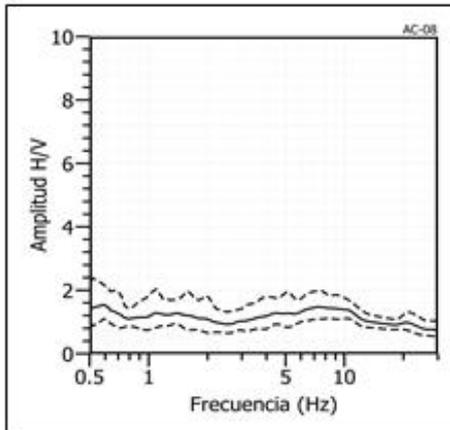
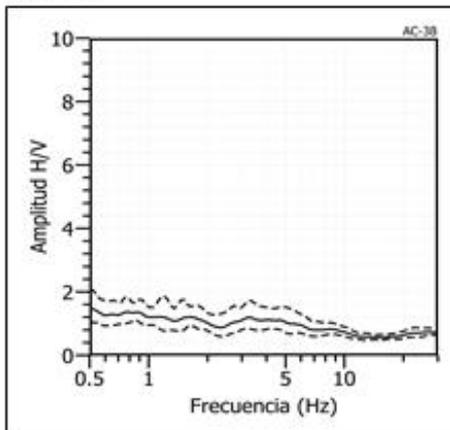


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F2 ( $F > 10\text{Hz}$ ): puntos AC-49, AC-58 y AC-73, todos ubicados de la zona céntrica y extremo NE de la ciudad de Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AC - 08



AC - 38



AC - 81

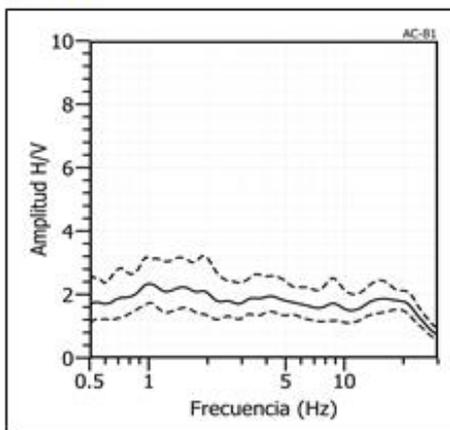


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos AC-08, AC-38 y AC-81, todos ubicados en la zona sur, centro y norte de la ciudad de Acarí, donde no sobresale ningún rango de frecuencia.

## 11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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

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

En la Figura 55, se presenta el mapa de la ciudad de Acarí con la distribución espacial de 5 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-AC...., LR05-AC. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se considera la clasificación, que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte ( $V_s$ ):

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

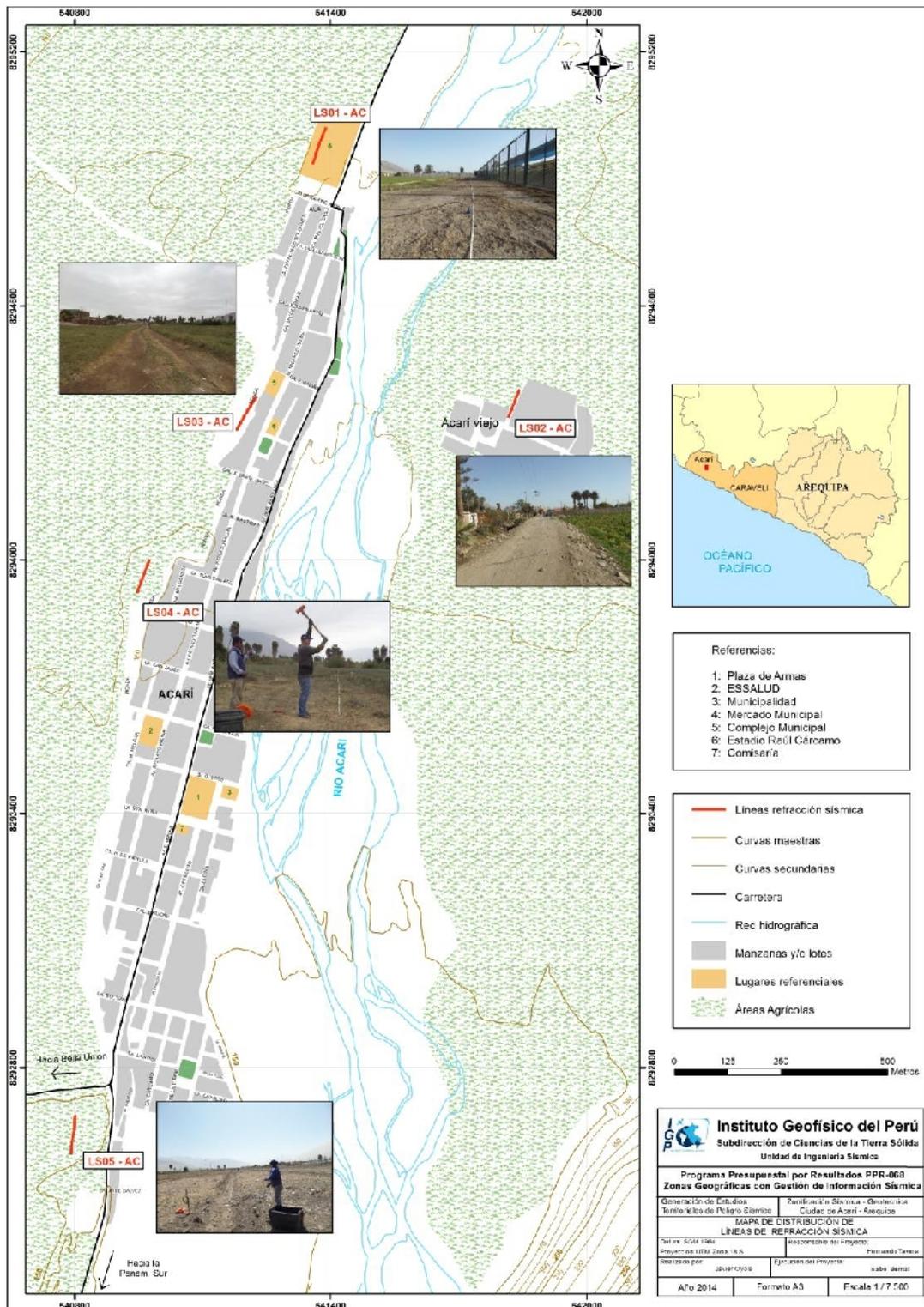


Figura 55: Mapa de la ciudad de Acarí y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-AC, ..., LR05-AC.

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 Acarí (Figura 56).

**Arreglo Lineal LR01- AC:** El arreglo se realizó en el estadio Acarino, ubicado en el extremo NE de la ciudad de Acarí. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades  $V_s$  de 350 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 16 metros y velocidades  $V_s$  de 650 m/s. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos duros a muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 1000 m/s y corresponden a rocas moderadamente duras (Figura 56a).

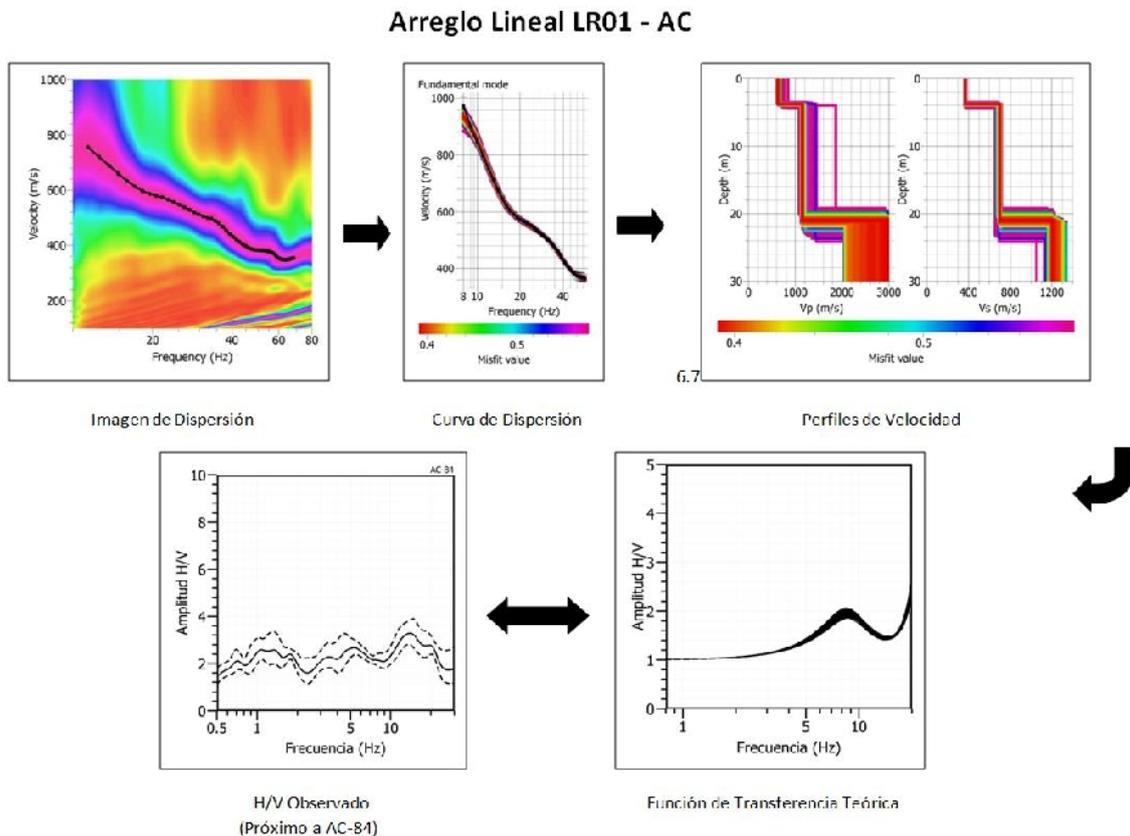


Figura 56a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR01 - AC.

**Arreglo Lineal LR02- AC:** El arreglo se realizó en el museo de Acarí Viejo, ubicado en la margen izquierda del río Acarí. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 6 metros y velocidades  $V_s$  de 320 m/s. La segunda capa presenta un espesor de

20 metros y velocidades  $V_s$  de 600 m/s. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos duros a muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 900 m/s y corresponden a rocas moderadamente duras (Figura 56b).

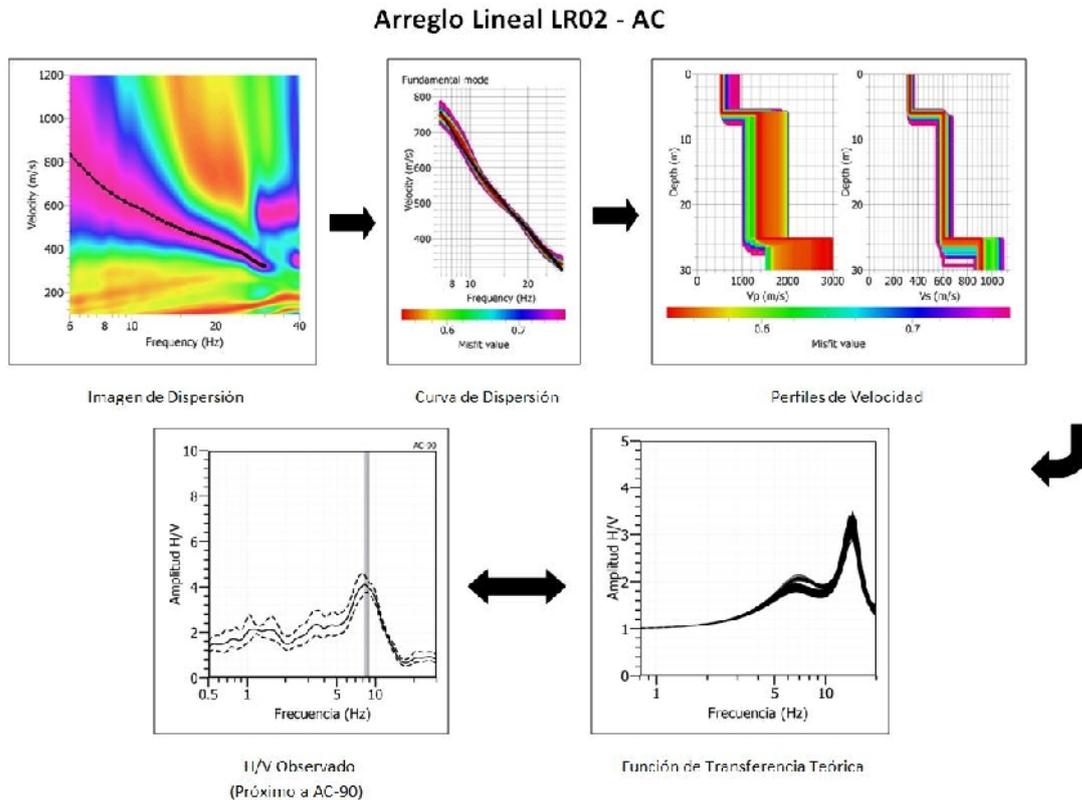


Figura 56b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR02-AC.

**Arreglo Lineal LR03- AC:** El arreglo se realizó próximo al Complejo Municipal de Acarí, en el extremo NO de la zona de la ciudad. Los resultados muestran la presencia de una capa de suelos blandos con un espesor de 3 metros y velocidades  $V_s$  menor a 180 m/s; mientras que, el contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 800 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 56c).

**Arreglos Lineales LR04- AC y LR05- AC:** Estos arreglos se realizaron en el extremo oeste de la ciudad de Acarí: LR04- AC próximo al Centro Parroquial San Martín de Porras y LR05- AC en el desvío de la carretera con destino a Bella Unión. Los resultados obtenidos muestran la presencia de suelos conformados por dos capas de similares espesores, pero con un ligero incremento en la velocidad  $V_s$ . La primera capa tiene un espesor de 4 metros y velocidades  $V_s$  de

150 y 230 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 7 a 9 metros y velocidades  $V_s$  de 350 y 480 m/s respectivamente. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos blandos a muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 1200 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figuras 56d y e).

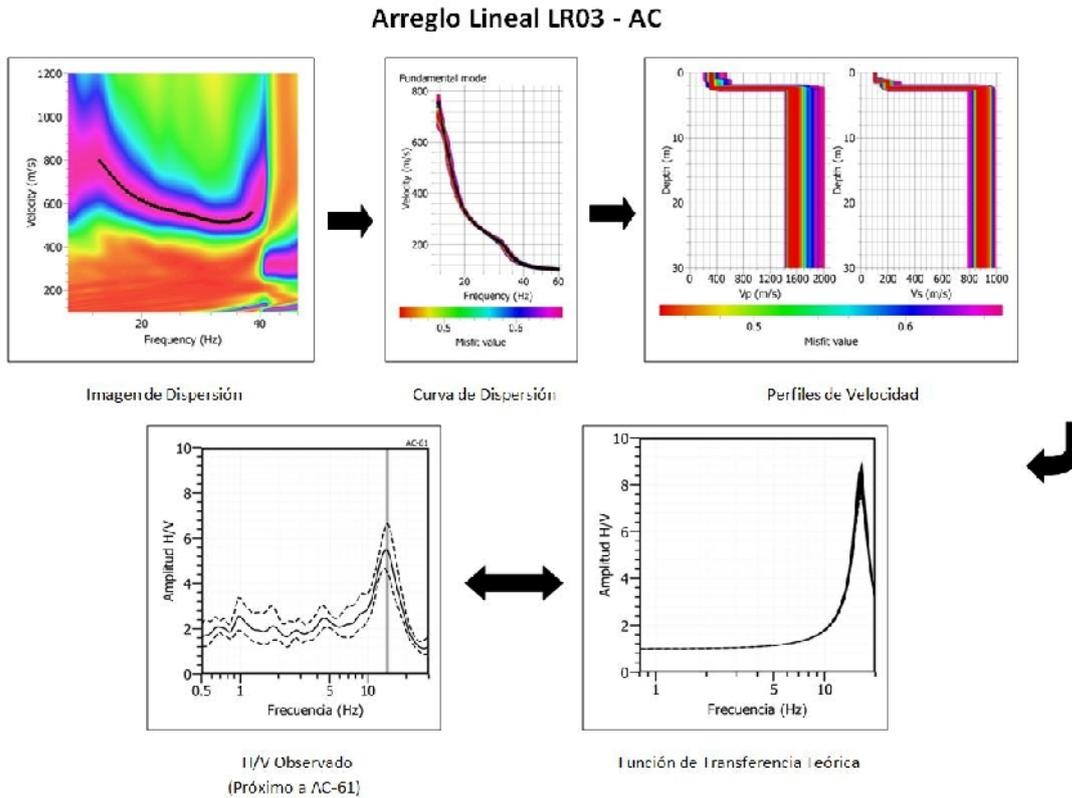


Figura 56c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR03-AC.

En resumen, se ha identificado suelos compuestos por dos capas cuyas características varían de NE a SO. La primera con espesor de 4 metros, presenta velocidades que hacia el extremo NE fluctúan alrededor de 350 m/s, en el centro de 150 m/s y al SO de 230 m/s. La segunda capa, hacia el NE presenta espesores entre 16 y 20 metros con velocidades del orden de 600 m/s, y hacia el SO espesores de 7 a 9 metros con velocidades de 350 a 480 m/s. Estos resultados evidencian la presencia de depósitos superficiales heterogéneos poco consolidados y espesor variable, depositados sobre materiales clásticos, que por su profundidad, presentan mayor cohesión y/o consistencia. Además, según el perfil LR03-AC, se identifica la presencia de estratos lenticulares de arena que generan la menor consistencia del suelo y en otras zonas, estratos lenticulares formados por cantos rodados de guijarro y gravas que le dan mayor consistencia al suelo.

### Arreglo Lineal LR04 - AC

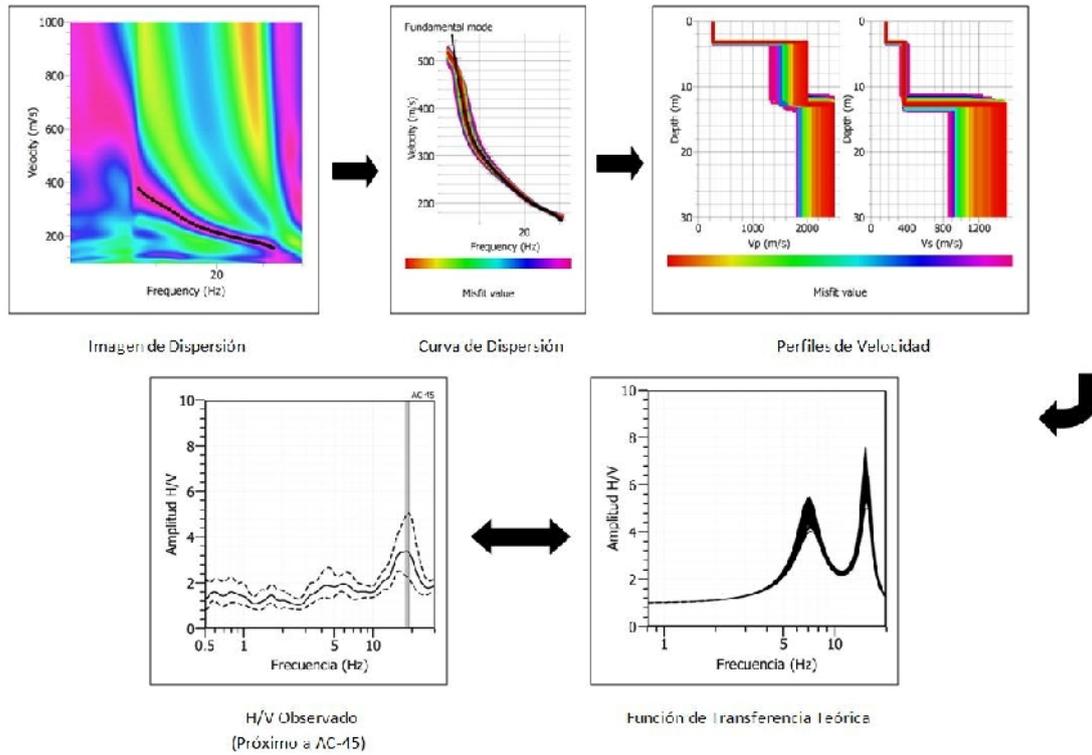


Figura 56d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR04-CH.

### Arreglo Lineal LR05 - AC

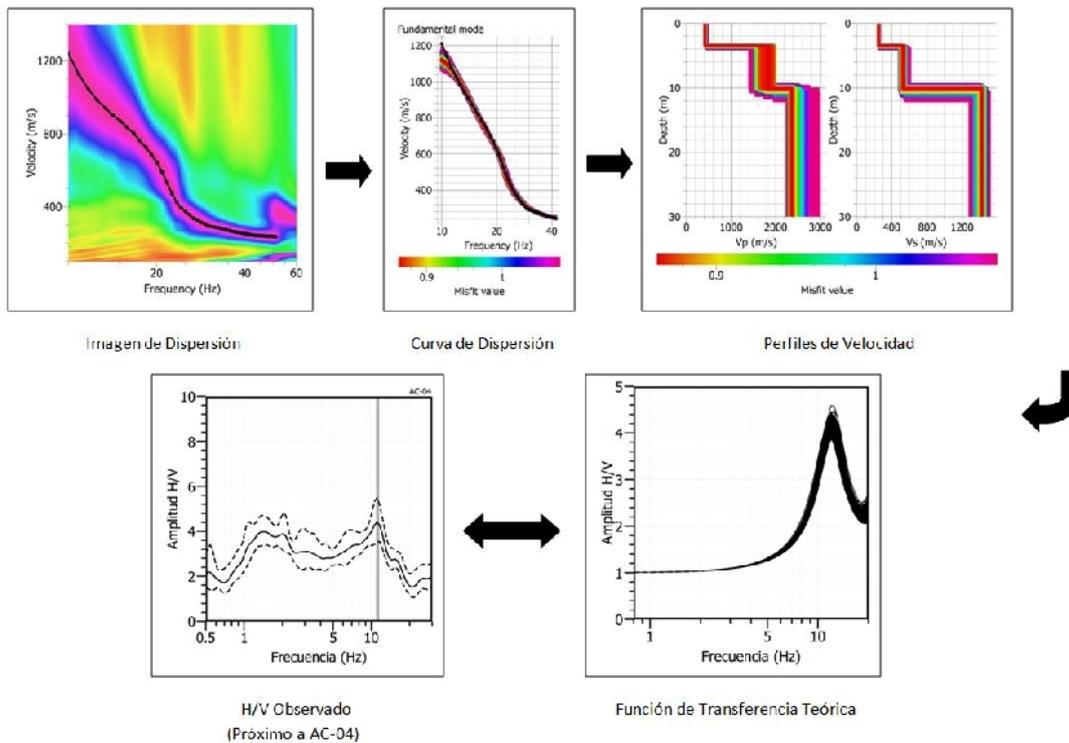


Figura 56e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR05-CH.

### 11.3.- Periodos Dominantes

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

En la Figura 57 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Acarí y los resultados obtenidos, permiten definir dos rangos de periodos que influyen en la respuesta dinámica de los suelos en la ciudad. Los periodos dominantes que controlan el comportamiento dinámico de los suelos fluctúan entre 0.1 y 0.2 segundos (Figura 57, valores en negro), además de un periodo secundario que varía entre 0.5 y 0.7 (Figura 57, valores en gris). De acuerdo al factor de amplificación, el comportamiento dinámico de los suelos varía a distancias cortas.

Los periodos dominantes sugieren la existencia de una capa relativamente uniforme y de poco espesor que sobreyace a otra de mayor espesor y consistencia, la cual influye en el comportamiento dinámico de los suelos de esta localidad.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Acarí están relacionados por sus condiciones físico - dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$  ( $T_0$ , periodo dominante; H, espesor del estrato y  $V_s$ , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo.

Asumiendo, una velocidad de 180 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 4.5 y 9 metros. Considerando velocidades de 320 m/s para estos mismos periodos, se estima espesores de 8 y 16 metros. Estos resultados son coherentes con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

*Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra que en la ciudad de Acarí se tiene dominio de suelos que responden a 0.1 y 0.2 segundos, y su variación a distancias cortas, junto a su factor de amplificación, evidencian la existencia de irregularidades en la respuesta de los suelos debido a su heterogeneidad y compactación.*

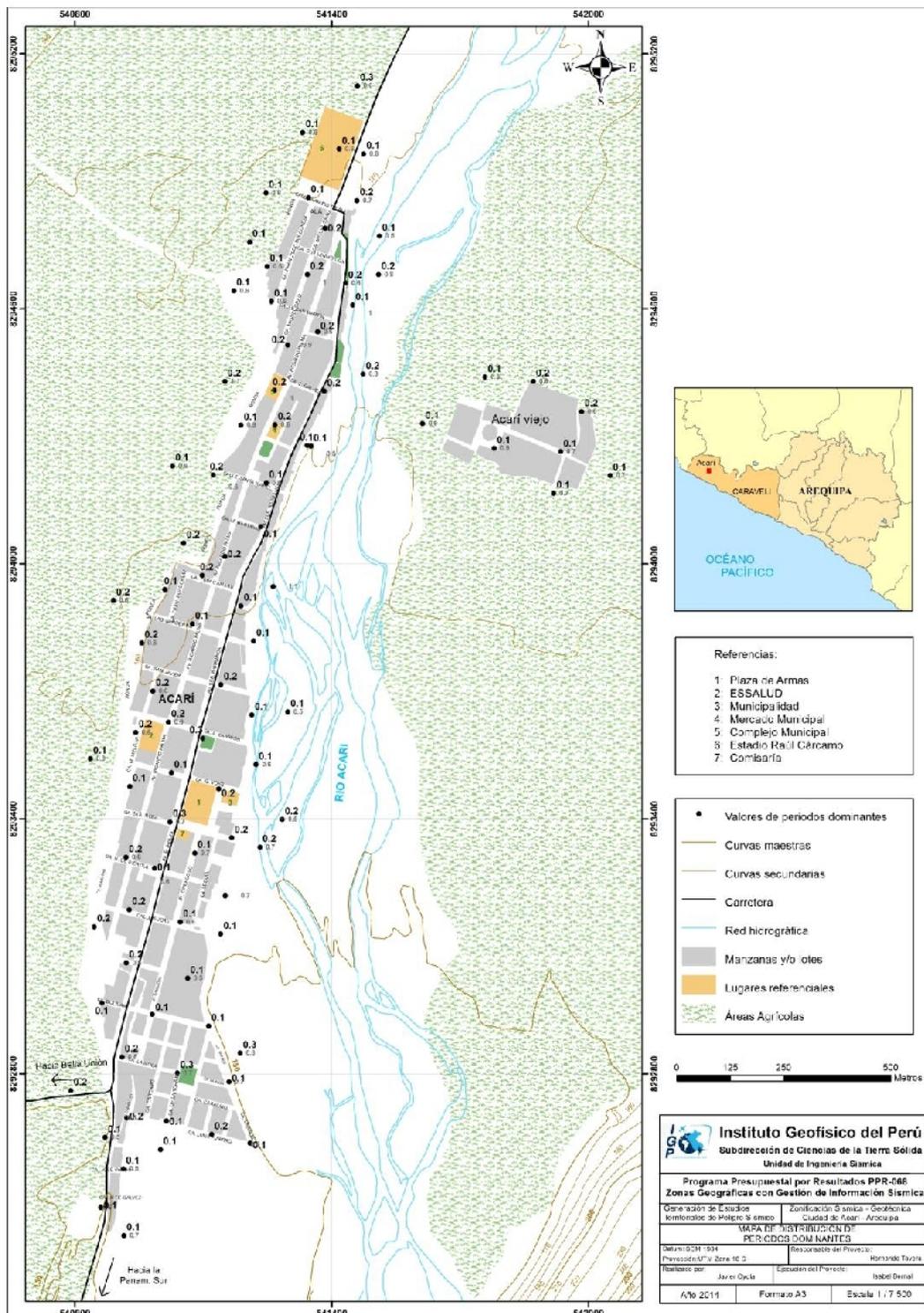


Figura 57: Mapa de la ciudad de Acarí y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes fundamentales y en gris los secundarios.

#### 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 Acarí se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo, la distribución de 25 electrodos con un espaciamiento de 10 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 39 metros (Figura 58).

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

**Sección geo-eléctrica L01-AC:** Sección realizada en el extremo norte de la ciudad de Acarí, entre el estadio y el río Acarí, estando el área cubierta de vegetación. Según la sección, se tiene el predominio de valores bajos a muy bajos de resistividad. En los primeros 5 metros de profundidad, los valores están entre 50 a 110 ohm.m a lo largo de todo el perfil, excepto cerca de los 150 metros de distancia desde el inicio del perfil, a estos niveles de profundidad se observa valores muy bajos de resistividad. A profundidades mayores, se tiene el predominio de valores bajos, entre 2 a 50 ohm.m. Los materiales que conforman la parte superficial de la zona de estudio son suelos de tipo arenoso, arcilloso con presencia de gravas. Se observa rasgos de humedad en el suelo y a mayor profundidad, el suelo está saturado (Figura 59a)

**Sección geo-eléctrica L02-AC:** Sección realizada en la margen izquierda del río Acarí, en el pueblo viejo de esta ciudad y sobre terreno de cultivo. En esta sección predominan valores bajos a muy bajos resistivos. Se observa la presencia de una capa muy delgada y superficial con valores que fluctúan alrededor de los 16 ohm.m, para luego a mayor profundidad llegar a 110 ohm.m. Los valores mayores se concentran, a mitad de la sección, entre los 10 y 20 metros de profundidad, mostrando una forma lenticular. Los valores de resistividad muy bajo a bajo, estarían relacionados al material saturado y los valores resistivos estarían asociados a la presencia de gravas (Figura 59b).

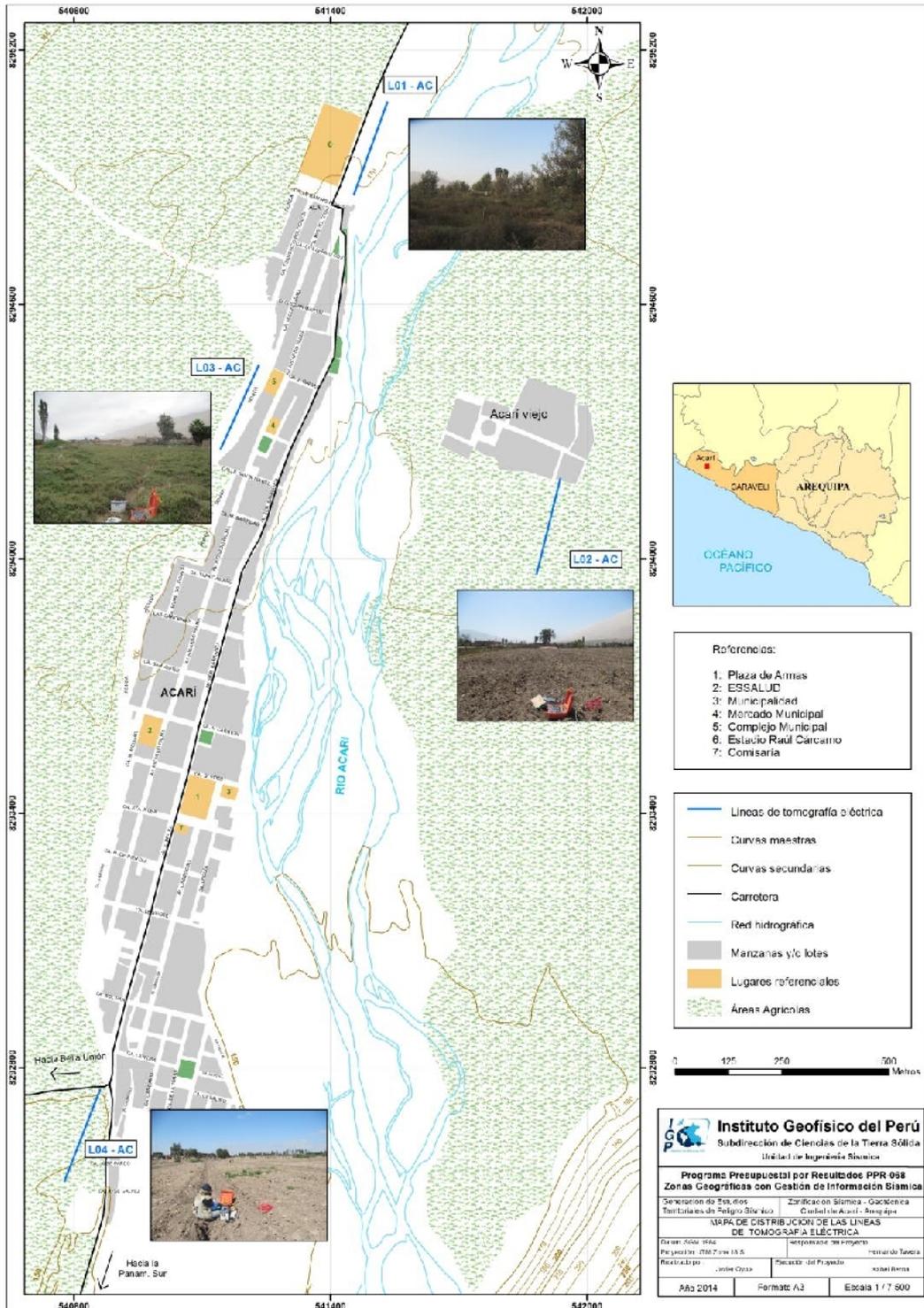


Figura 58: Mapa de la ciudad de Acarí y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica.

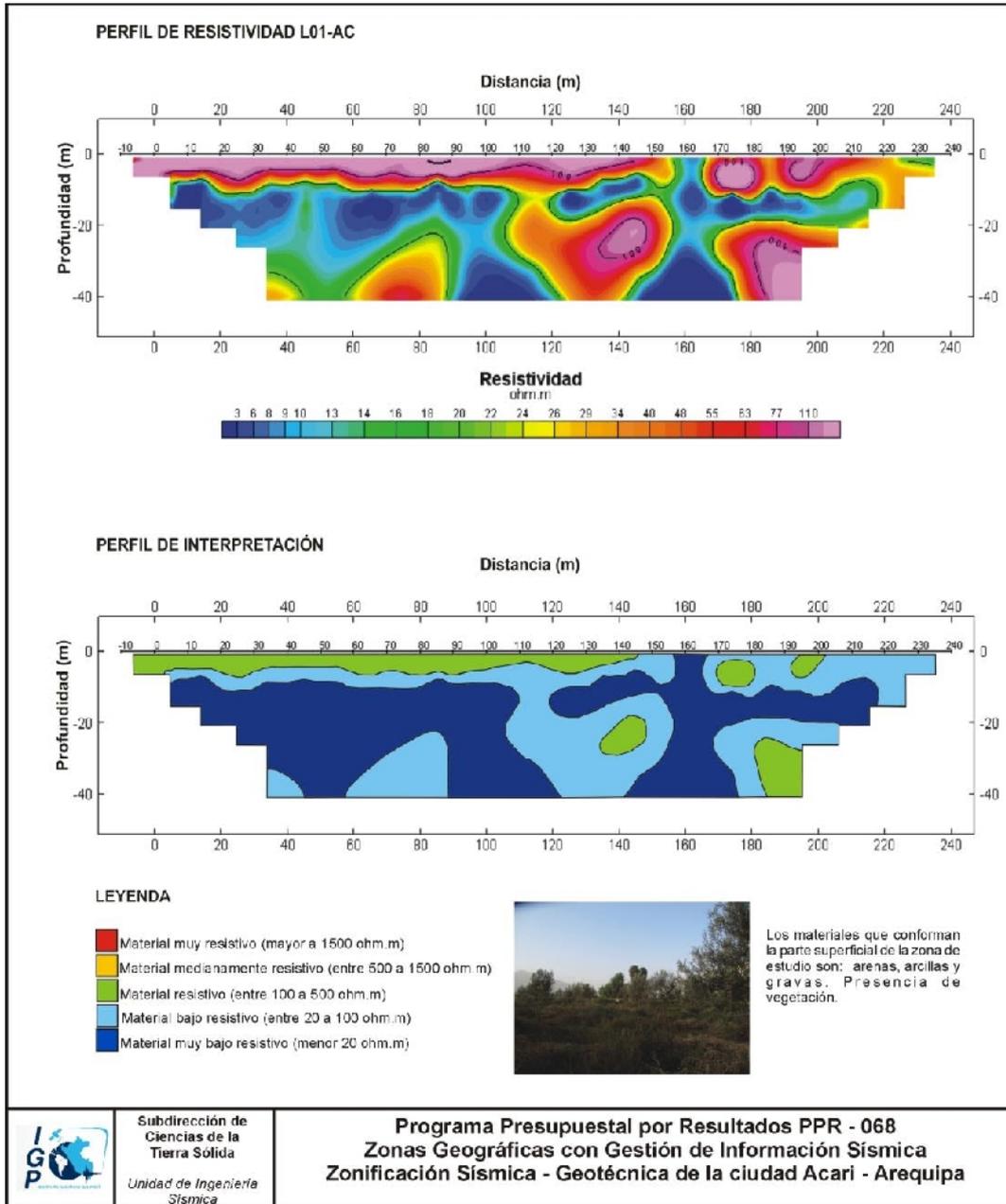


Figura 59a: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-AC.

**Sección geo-eléctrica L03-AC:** Sección realizada en el extremo oeste de la ciudad de Acarí, próximo a la Av. Ricardo Palma y sobre un área con vegetación. En esta sección predominan valores muy bajos a bajos resistivos, entre de 10 a 40 ohm.m., que se distribuyen a lo largo de la sección. Los valores altos se concentran en una franja entre los 4 y 16 metros de profundidad. Los materiales visibles que conforman la parte superficial de la zona de estudio son suelos de tipo arenoso y arcilloso. Se puede observar en superficie rasgos de humedecimiento del suelo (Figura 59c).

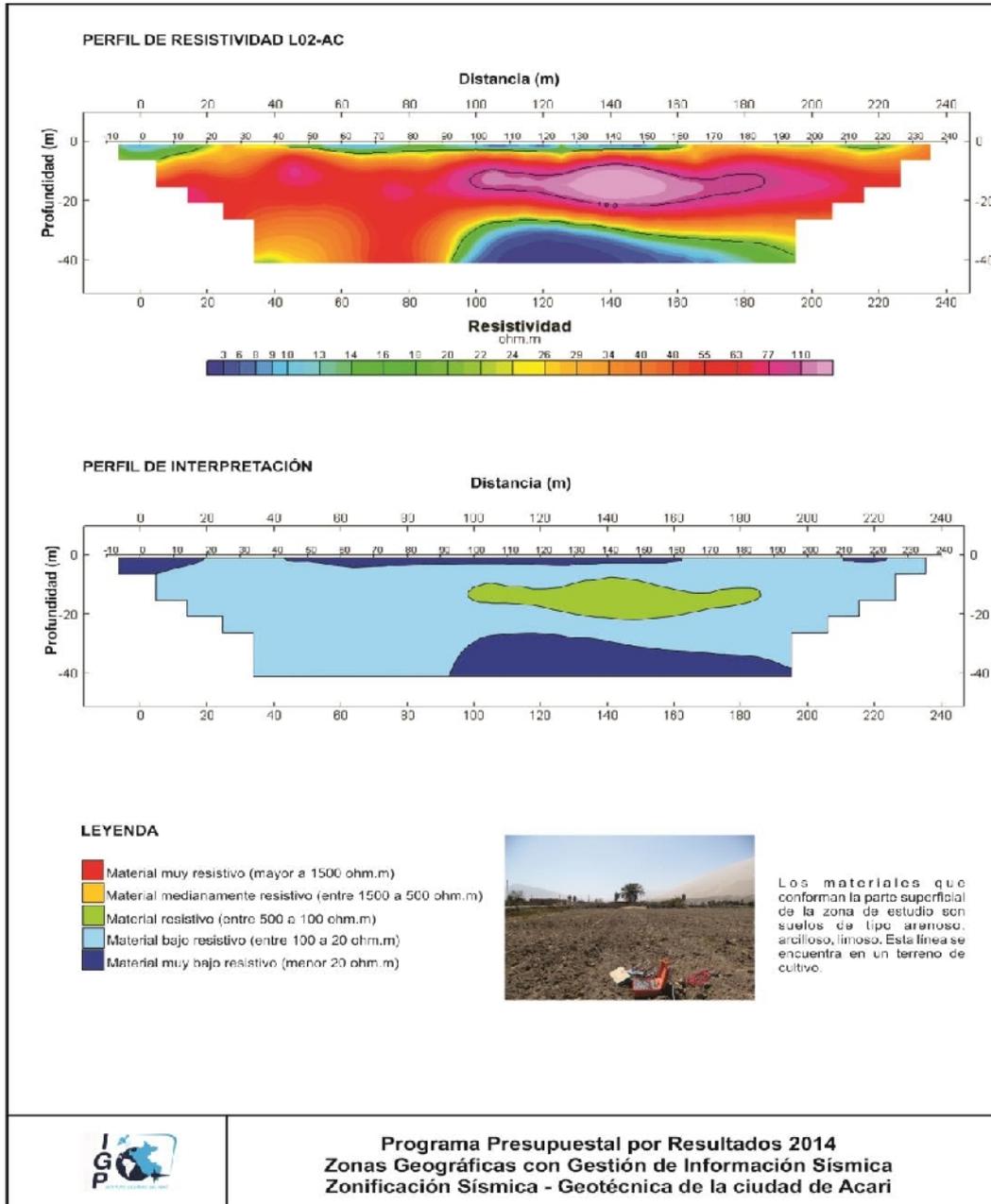


Figura 59b: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-AC.

**Sección geo-eléctrica L04-AC:** Sección realizada en el extremo SO de la ciudad de Acarí, próximo al cruce de Acarí y Bella Unión, sobre terreno de cultivo. En esta sección predominan valores bajos a muy bajos resistivos, entre 8 a 110 ohm.m.. A diferencia de la anterior sección, aquí los valores bajos se concentran en una franja angosta a lo largo de toda la sección, entre los 5 y 15 metros de profundidad. En el centro de la sección, a profundidades entre 20 y 30 metros, de manera lenticular se concentran los valores más altos (55 a 110 ohm.m). Los materiales visibles que conforman la parte superficial de la zona

de estudio son suelos de tipo arenoso, arcilloso, con presencia de gravas y suelos saturados (Figura 59d).

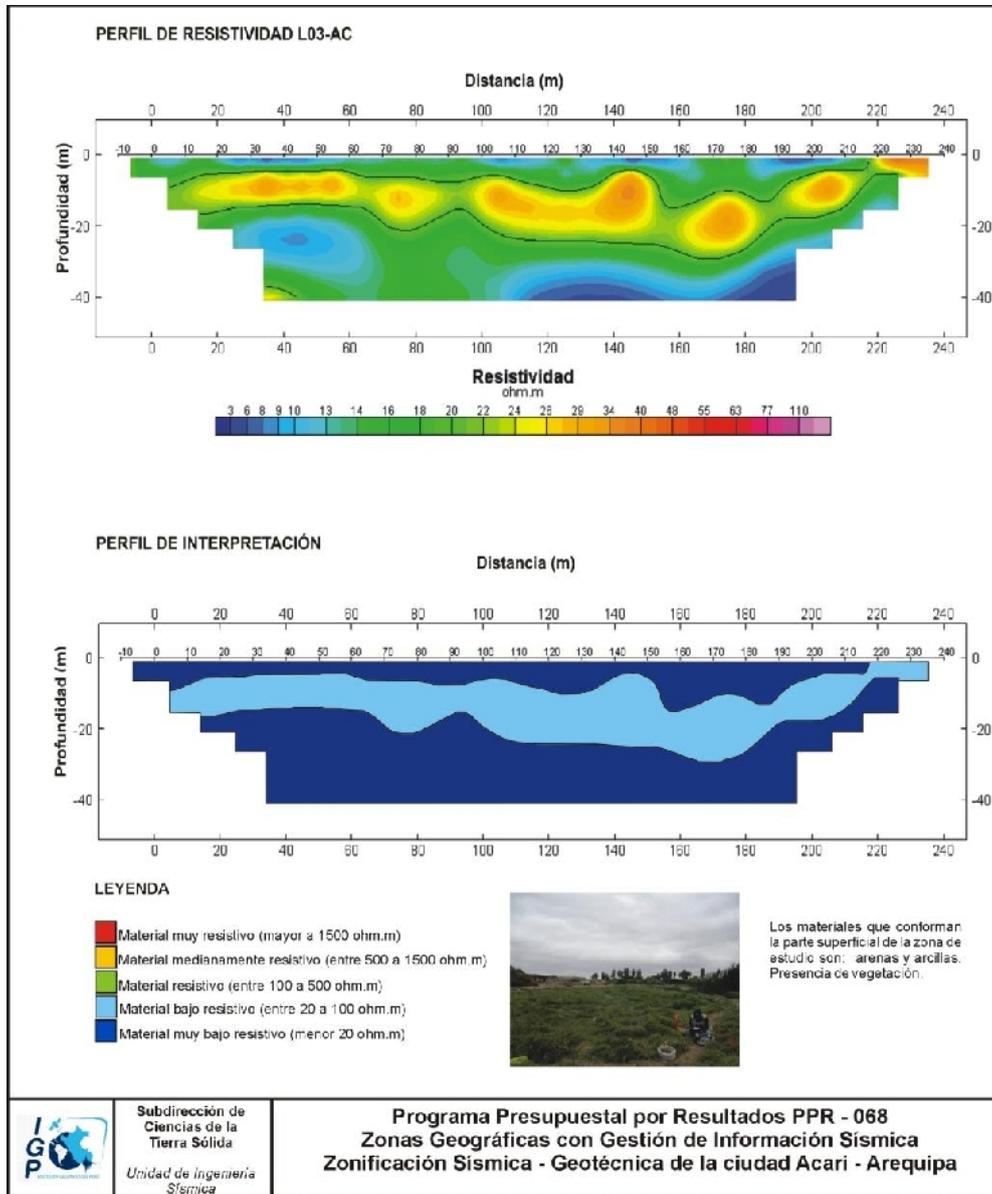


Figura 59c: ...Continuación... / Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-AC.

En la ciudad de Acarí, la distribución de los valores de resistividad, evidencian la existencia de dos capas con valores bajos a muy bajos resistivos, cuyo espesor para la primera capa fluctúa en 5 metros, y la segunda se encuentra a profundidades próximos a 15 metros. Hacia los extremos NE y SO de la ciudad de Acarí, los valores son más altos en la primera capa a diferencia de lo observado en las secciones ubicadas en los extremos Este y Oeste, donde los valores son más bajos. Estos

resultados se asocian a la consistencia de los suelos y a los materiales que conforman la capa superficial de la zona de estudio. En los extremos NE y SO, los suelos son de tipo arenoso y arcilloso con presencia de gravas que permiten obtener los valores más altos resistivos, respecto a lo observado a mayor profundidad que presentan rasgos de humedecimiento. Contrariamente, en los extremos este y oeste de las secciones, se evidencia la presencia de suelos de cultivo con alto nivel freático.

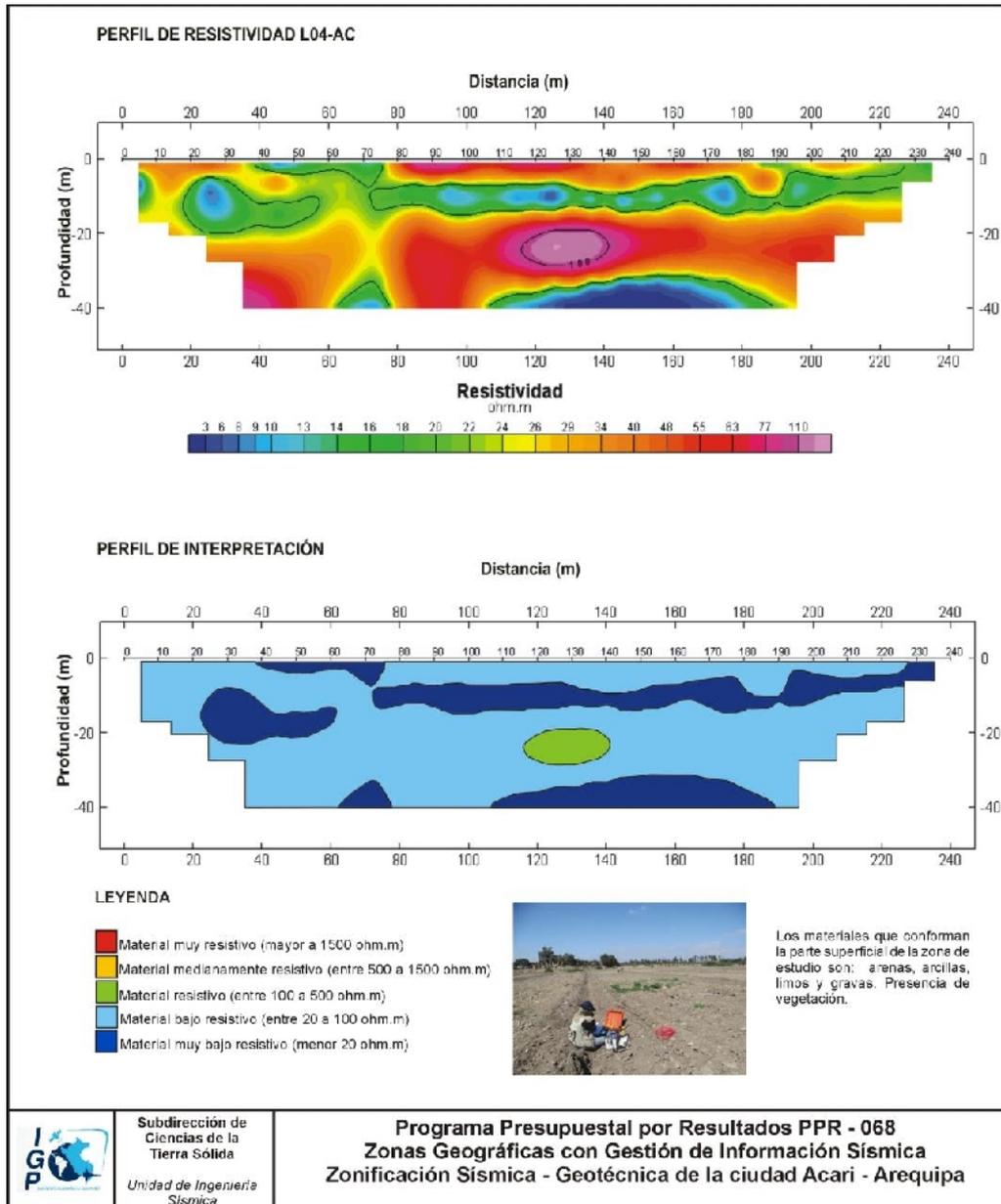


Figura 59d: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-AC.

## 12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

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

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

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

**ZONA I:** *Conformada por estratos de grava cubiertos por un manto areno-limoso poco consolidado y de poco espesor. En profundidad, el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la Norma Sismorresistente peruana. Los suelos presentan una capacidad portante alta, mayor a 3.0kg/cm<sup>2</sup>.*

*En esta localidad se observa variación en el factor de amplificación, asociada a la consistencias del material y debido a la irregularidad litológica, se puede encontrar estratos lenticulares formados por cantos rodados, guijarro y gravas: además de lentes de arena. La velocidad de las ondas de corte puede variar de 150 a 360 m/s para la capa superficial de poco espesor (aproximadamente 4 metros) y de 480 a 600 m/s, la capa más profunda (de 10 a 20 metros de espesor).*

*Por otro lado, se observa la presencia de zonas en las cuales los suelos producen mayor amplificación de ondas, indicadas en la Figura 60 con líneas inclinadas de color rojo. También se observa, que los suelos adicionalmente responden a periodos que fluctúan entre 0.6 y 0.8 segundos pero con menor amplificación.*

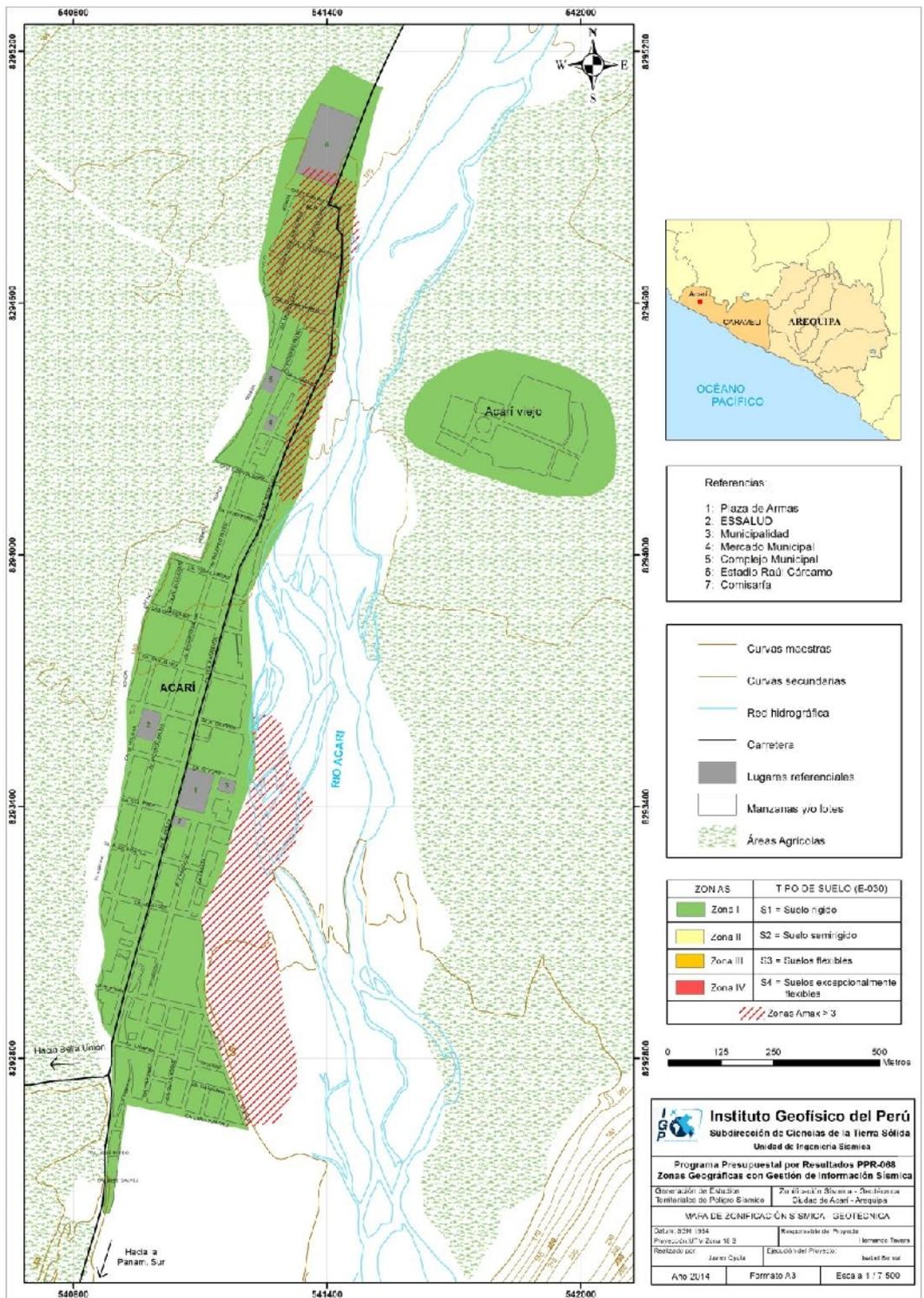


Figura 60: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Acarí.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

### CONCLUSIONES

En la ciudad de Acarí, la capacidad de carga admisible define la existencia de suelos con capacidad portante alta ( $>3 \text{ kg/cm}^3$ ); es decir, se cuenta con suelos compactados.

Del mismo modo, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que toda la ciudad de Acarí se encuentra sobre suelos Tipo S1; es decir, los correspondientes a la ZONA 1 según la Norma Sismorresistente Peruana. Estos suelos están conformados por gravas cubiertos por un manto areno-limoso poco consolidado y de poco espesor. En profundidad el suelo tiene un comportamiento rígido; sin embargo, en algunas áreas se observa la presencia de suelos que facilitan la amplificación de ondas, debiendo tener atención al momento de proyectar la ocupación con viviendas.

### RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales y regionales de la ciudad de Acarí 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 Acarí.

## BIBLIOGRAFÍA

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

- Casagrande, A. (1948): Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
- Cobbing, J. (1970). Geología de los cuadrángulos de Huacho (23h). Boletín N°26 , INGEMMET.
- Dale D. (1990). Mountain waves and Downslope Winds. Meteorological Monographs. 23:59 81
- Dorbath, L., Cistermas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- Escobar, D. 1993. Evolución climática y sinóptica de los vientos Paracas. Tesis Ing. Meteorólogo. Facultad de Ciencias, Dpto. Física y Meteorología. UNALM.
- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects. *Journal of Seismology*, 7, 449-467
- Goto, C. y Ogawa, Y. (1992): Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme. Translated for the TIME project by N Shuto.
- Guillier, B., J.-L. Chatelain . H. Tavera . H. Perfettini . A. Ochoa . B. Herrera (2014): Establishing empirical period formula for RC buildings in Lima (Peru): evidence for the impact of both the 1974 Lima earthquake and the application of the Peruvian seismic code on high-rise buildings (in preparation).
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). Geomorfología. Pearson Education, S.A., Madrid, 898 pp.
- Gutierrez, C. y S.K. Singh (1992): A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- HartzeU, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J.N. (1986). A sliding-consolidation model for flow slides, *Can.Geotech.J.*, 23, 115-126
- INADUR (2000): Mapa de peligros y plan de uso del suelo de la ciudad de Chimbote. Instituto Nacional de Desarrollo Urbano.
- INGEMMET (1970): Cuadrángulo Geológicos de Barranca. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.
- Knighton, A. (1998): *Fluvial Forms & Processes: a new Perspective* . Londres. Arnold
- Lachet, C. y P. Y. Bard (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.

- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b): Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- Loke MH (2001). Tutorial: 2 D and 3 D electrical imaging survey, Geotomo Software, Malaysia
- Morisawa, M. (1968). Streams: their dynamics and morphology. McGraw-Hill. New York, New York, USA.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1,25-33 pp.
- Norma E-30 (2003): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Pagador, C. (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la Cuenca del río Huaura. Autoridad nacional del agua.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.

- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- Tavera et al. (2013). Sismo de Acari-Yauca del 25 de setiembre de 2013 (7.0Mw). Aspectos Sismológicos.. Dirección de Sismología, IGP. Informe Técnico N°03-2013. 25 pags.
- Tavera, H. (2001). El terremoto de la región sur del Perú del 23 de junio de 2001. Instituto geofísico del Perú. Informe Especial, Dirección de Sismología. 422 pag.
- Tavera, H. (2008). EL terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto de 2007 (7.9 Mw). Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología. Informe Especial. 480 pags.
- Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.
- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes. Seism. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.

## MAPAS