

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

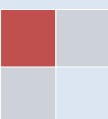
Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE HUACHO Provincia de Huaura – Departamento de Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

**Lima – Perú
2014**



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE HUACHO

Provincia de Huaura – Departamento de Lima

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

Ejecución del Proyecto: ¹Isabel Bernal
²Juan Carlos Gomez
¹Hernando Tavera

Análisis e Interpretación: ¹Eliana Vizcarra
¹Fabiola Rosado
²Abraham Gamonal

Software SIG: ¹Rider Navarro
²Mariana Vivanco

Trabajos de Campo: ¹Henry Salas
¹Fabiola Rosado
¹Hernán Chávez
¹Dario Dueñas
¹Katia Vila
¹Rider Navarro
¹Luz Ojeda
²Robert Carrillo
²Viviana Vivanco
²Segundo Ortiz
²Abraham Gamonal

Sismología: Patricia Guardia
Cristóbal Condori

Simulación Tsunamis: Julio Martínez

Instrumentación Sísmica: David Portugal

¹Sísmica y Geofísica

²Geología y Geotecnia

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 Huacho, distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima. 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. Asimismo, se propone los posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de inundaciones por crecidas del río Huaura y por tsunamis.

Los resultados obtenidos para la Ciudad de Huacho han permitido identificar, según el procedimiento establecido en la Norma E-030, la existencia de tres (3) zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Huacho 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

3.1.- Fotointerpretación Multitemporal

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- CONDICIONES MECÁNICAS – DINAMICAS DE SUELO: NORMA E030

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Peligro Sísmico

7.2.- Monitoreo Sísmico

7.3.- Estudio de Tsunamis

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y TSUNAMI

8.1.- Sismicidad Regional

8.2.- Peligro Sísmico

8.3- Tsunamis

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Pendientes

9.1.2.- Unidades Geomorfológicas

9.2.- Geología

9.2.1.- Rocas Volcánicas

9.2.2.- Rocas Intrusivas

9.2.3.- Depósitos Cuaternarios

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

9.3.2.- Procesos Erosivos

9.3.3.- Inundación Fluvial

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

10.2.- Capacidad Portante

10.3.- Nivel Freático Superficial

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Periodos Dominantes

11.3.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Eventos Geodinámicos

ANEXO 2: Zonas Susceptibles a Inundación

ANEXO 3: Fichas y Perfiles de Calicatas y Exploración Manual

ANEXO 4: Mapas

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 2013 el Proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica” y como parte del mismo, las Direcciones de Sismología y Geodinámica Superficial desarrollan 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 Chimbote, distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Ancash.*
- *Ciudad de Huarney, distrito de Huarney, provincia de Huarney, departamento de Ancash.*
- *Ciudad de Barranca, distrito de Barranca, provincia de Barranca, departamento de Lima.*
- *Ciudad de Huacho, distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima.*

De acuerdo a la historia sísmica de Perú, la región central 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 área urbana (Silgado, 1978). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones presentes en cada área urbana

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 áreas urbanas 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 la construcción de estructuras adecuadas para cada

tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

a.) **Buenos Planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica.

b.) **Buenos Profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.

c.) **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras sean bien construidas.

Estos tres aspectos permitirán tener la confiabilidad de que las estructuras sean sismorresistentes a un nivel determinado de sacudimiento del suelo.

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.

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 Huacho ubicada en el distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima (Figura 1). Asimismo, es de interés del presente estudio que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo de sus proyectos sobre la gestión del riesgo ante sismos y tsunamis, 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 Huacho

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El historiador Arnaldo Arámbulo señala que Huacho proviene de dos vocablos, “Gua”, amigo y “Chus”, peces; “Amigo de los Peces”. Asimismo, se debe tomar en consideración y como punto importante, que la Diosa de los humedales era Urpay Huachac y que de su nombre deriva el vocablo "Huacho". En la sierra, correspondiente a los valles de la costa central, existió también el culto a Urpay Huachac, llevado quizá por los pescadores en sus trueques de pescado seco. Entre los habitantes de la sierra y las quebradas de Lurín y Lima, eran adoradas las cinco hermanas de Pachacámac, siendo una de ellas Urpay Huachac.

Huacho fue fundada con el nombre de *San Bartolomé de Huacho* el 24 de agosto de 1571. Posteriormente, la Asamblea Constituyente, del recién creado Congreso decide reconocer la participación del pueblo de Huacho a la causa de la Independencia del Perú otorgándole la categoría de *Fidelísima Villa*, el día 16 de abril de 1828, bajo la presidencia de don José de La Mar. Durante el gobierno del presidente Manuel Pardo, el 10 de noviembre de 1874 el Congreso de la República decide elevar a Huacho a la Categoría de Ciudad y ratificarla como capital de la Provincia de Chancay (hoy Barranca, Huaura y Huaral), haciéndola coincidir con el día del desembarco de José de San Martín en Huacho.

Huacho se mantuvo como capital de la provincia, aun cuando se separó de Chancay (hoy provincia de Huaral) y se creó la provincia de Huaura. Huacho es una ciudad en la costa central del Perú, capital de la provincia de Huaura y sede regional del Departamento de Lima, ubicada en una bahía formada por el Océano Pacífico a 150 km al norte de la ciudad de Lima, próxima a la desembocadura del río Huaura.

La ciudad de Huacho, está ubicada en la zona norte-centro del Perú (Figura 2). Su territorio es principalmente árido, con acceso al mar y elevaciones menores a 500 m.s.n.m.; es decir, es una ciudad costera con relieve llano. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, es la decimonovena ciudad más poblada del Perú y albergaba en el año 2007 una población de 173.585 habitantes. Huacho limita por el Oeste con el Océano Pacífico, por el Norte con el Distrito de Hualmay, por el Sur con la Provincia de Huaral a la altura de la quebrada de Río Seco, y por el Este con el distrito de Santa María.

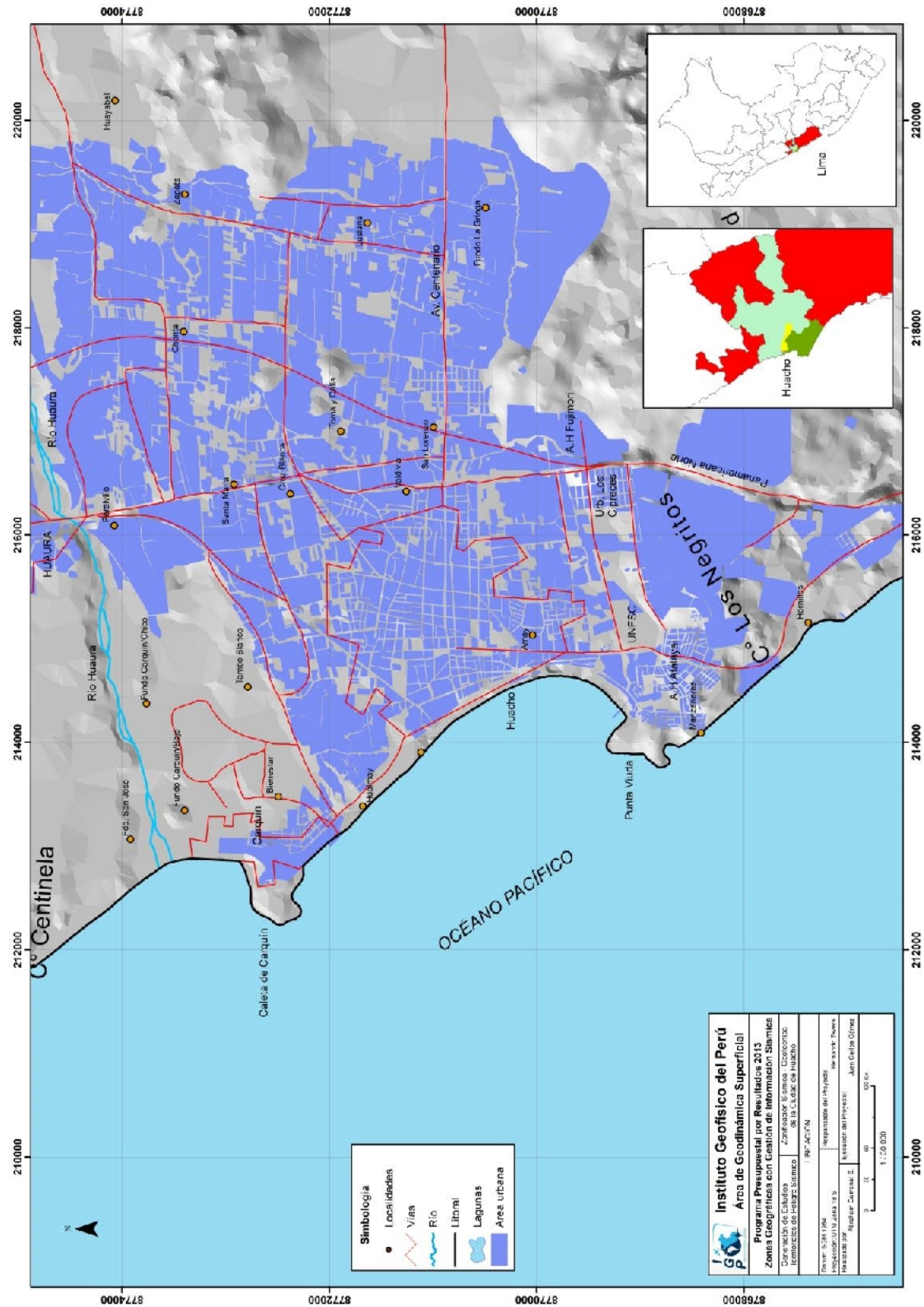


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Huacho, distrito de Huacho y provincia de Huaura, Departamento de Lima

3.1.- Fotointerpretación Multitemporal

El análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales es un método que se ha utilizado para identificar, de manera visual, las zonas de expansión urbana como resultado del crecimiento del área poblada a lo largo del tiempo. Este análisis permite conocer y delimitar las zonas de expansión territorial a fin de considerarlas como apropiadas para el asentamiento de viviendas e infraestructura proyectada. Esta información será cuantificada con los resultados que se obtengan de los estudios de zonificación sísmica-geotécnica.

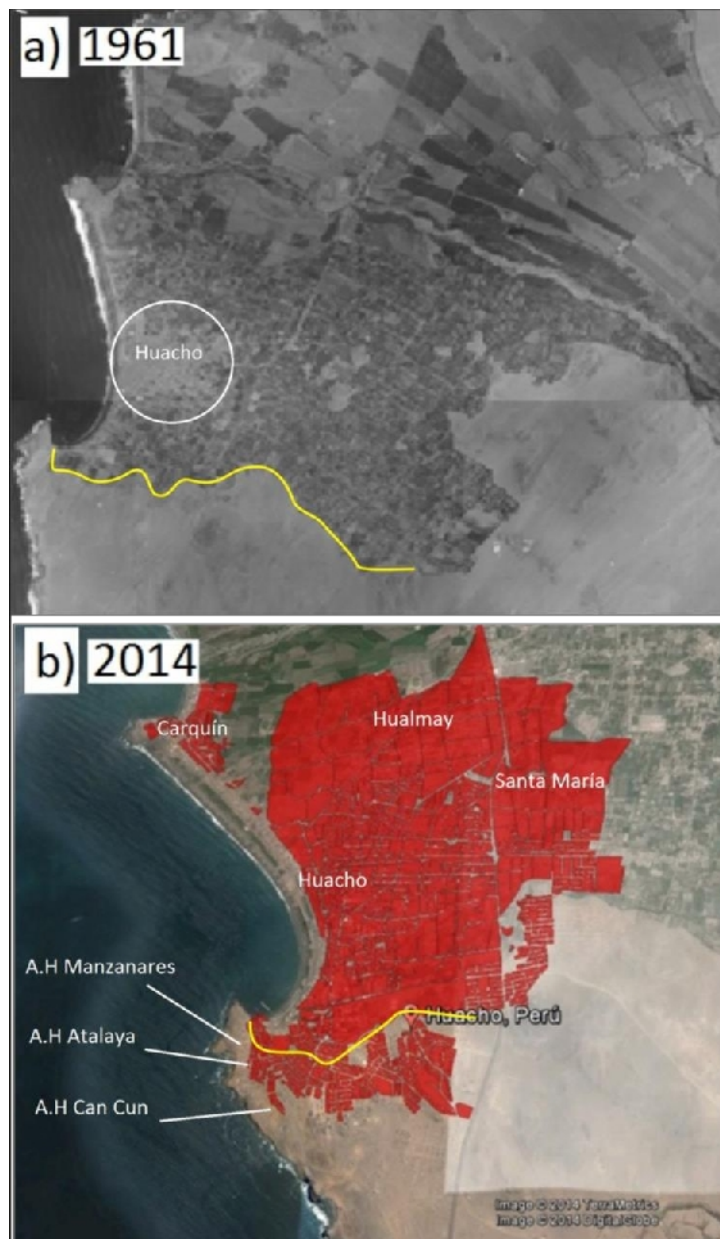


Figura 3.:a) Zona urbana de la ciudad de Huacho en el año 1961 (círculo) y .b) En la actualidad, la zona urbana ocupa toda la llanura aluvial con crecimiento en dirección Este.

Para la ciudad de Huacho, el análisis multitemporal, se realizó en base a fotografías aéreas del año 1961 (Instituto Geográfico Nacional), mapa catastral de la ciudad del año 2014 e imágenes del servidor Digital Globe (Figura 3).

En la ciudad de Huacho, entre los años 1961 y 2014 (53 años) se ha visto un crecimiento acelerado de la zona urbana de la ciudad. El año 1961, gran parte de la llanura aluvial era destinada para actividades agrícolas (90 %); mientras que, solo un 10 % lo constituía el sector urbano. Actualmente, esta relación ha cambiado drásticamente, pues se estima que un 70 % de la llanura aluvial es ocupada por el sector urbano, y el restante es destinado a la agricultura y ganadería.

La expansión urbana de la ciudad de Huacho se ha visto impulsada en dirección Este (distrito de Santa María), debido a la presencia del trayecto de la nueva Panamericana Norte, pues las viviendas se han posicionado en ambas márgenes de dicha vía. Recientemente, se observa una nueva tendencia de expansión de la ciudad en dirección Sur, con respecto a la ciudad de Huacho (Figura 3). En este sector, en el año 1961 no se observan viviendas y en la actualidad han surgido los AA.HH Manzanares, Atalaya y Can Cun, por mencionar algunos

4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y 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 (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 por la población proveniente de las 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 y tsunamis, además de sus efectos secundarios. A estas condiciones, se suma el hecho de que las viviendas son construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la norma de construcción vigente (Norma E-030). 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, de este modo, 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 4). 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.

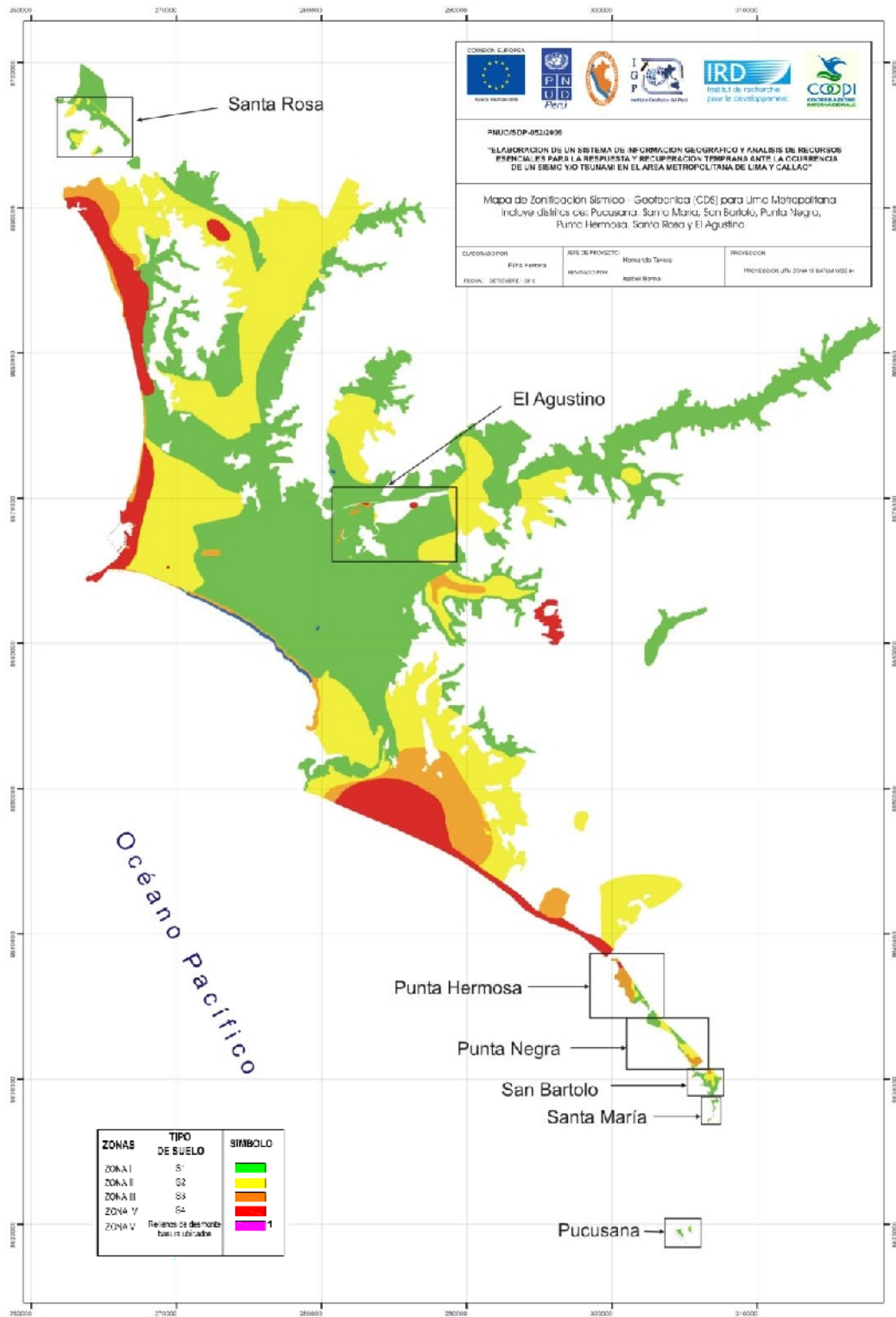


Figura 4: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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.

En el año 2013, el IGP realiza estudios similares en las ciudades de Chimbote, Huarney, Barranca y Huacho, a las cuales se añadió la componente de peligro de tsunamis por contar, todas estas ciudades, con zonas de playa y viviendas cerca de la zona costera. **Los resultados obtenidos para la Ciudad de Huacho son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Huacho”.**

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 condiciones geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas y geofísicas de las zonas en estudio y que en conjunto, controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un sismo.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado se constituye como una de las herramientas más importantes orientadas a minimizar los daños producidos por 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 de observaciones de campo y la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

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

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

6.- CONDICIONES MECÁNICAS-DINÁMICAS DE SUELOS: NORMA E-030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar las indicaciones contenidas en el Reglamento Nacional de Construcción o Norma E-030 (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. 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 180m/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 el Código de Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Construcciones (Norma E-030, 2003). 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 1500m/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 500m/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 180m/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 de las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

El periodo fundamental de las estructuras puede ser deducido de la fórmula propuesta por Rodríguez y Aristizabal (1998), donde $T = N/\lambda$ (T, Periodo de la estructura; N=Número de niveles en la edificación y λ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, para zonas firmes de la ciudad de México el valor de λ es igual a 10 (Muria y Gonzáles, 1993); mientras que, para Lima es de 25 (Guiller et al. 2014). 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 Huacho se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías cuyas características se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Peligro Sísmico

Considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso de tiempo. Para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2013), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al (1997) y de Sadigh et al (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007).

7.2.- Monitoreo Sísmico

Se ha realizado la instalación de 8 estaciones acelerométricas de tres componentes de registro y formato digital en las ciudades de Chimbote, Huarmey, Barranca y Huacho. De estas estaciones, en la ciudad de Huacho, se ha instalado una estación Acelerométrica en el local de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión (Figura 5). Esta estación está en operación y viene registrando importante información sísmica local y regional que permitirá conocer la respuesta del suelo ante la ocurrencia de sismos de magnitud moderada y alta. En la actualidad esta estación es parte de la Red Acelerométrica Nacional a cargo del IGP.



Figura 5: Estación Acelerométrica en el interior de Campes de la U. N. José Faustino Sánchez Carrión.

7.3.- Estudios de Tsunamis

Se caracteriza y cartografía el peligro relacionado con la ocurrencia de tsunamis asociados a un sismo de magnitud 8.5 Mw que pudiera afectar a la zona costera de la ciudad de Huacho (Figura 6). Conocido el modelo de fuente sísmica y obtenida las cartas de batimetría y topografía con alta resolución, el modelado numérico del tsunami se realiza con el algoritmo TUNAMI-N2 desarrollado por investigadores de la Universidad Tohoku de Japón. Los resultados obtenidos permiten conocer las zonas de inundación, el tiempo de llegada y la altura de la primera ola de tsunami, información que permitirá orientar las medidas de gestión del riesgo en la zona de estudio.



Figura 6: Vista panorámica de las zonas de playa de Huacho considerada en el modelado de tsunamis

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo, de diferentes tipos de información geológica, geomorfológica, geodinámica y de zonas susceptibles a deslizamientos y/o flujos. Las técnicas de análisis son:

.- **Técnica de Levantamiento Geológico y Geomorfológico.** Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características geológicas y geomorfológicas de carácter local (Figura 7), considerando bases de datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.



Figura 7: Imagen del terreno sobre el cual se ha realizado el trabajo geológico y geomorfológico en la ciudad de Huacho

.- **Técnica de 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 del río Huaura.

.- **Técnica de Análisis Geotécnico:** Se establece la construcción de 15 calicatas para la obtención de muestras de suelo a fin de realizar análisis como el granulométrico, límites de elasticidad, contenido de humedad y corte directo (capacidad portante). Las calicatas tuvieron dimensiones de 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m de profundidad máxima. Las muestras se obtuvieron de la capa más profunda y representativa del tipo de suelo en el sitio evaluado. Con la primera muestra de suelo obtenida se hicieron los análisis granulométricos, límites de elasticidad y contenido de humedad, y con ello se procedió a realizar la clasificación de los suelos haciendo uso del Código SUCS (Clasificación Unificada de Suelos) para el total de los puntos de muestreo.

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

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo, de diferentes tipos de información utilizando instrumental sísmico y geofísico, además de la aplicación de técnicas y metodologías orientadas a conocer el comportamiento dinámico del suelo y/o sus propiedades físicas.

.- **Técnica 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

del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen el comportamiento dinámico del suelo 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 8).



Figura 8: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 9, 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 HCH-134 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en HCH-34, 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 10), 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.

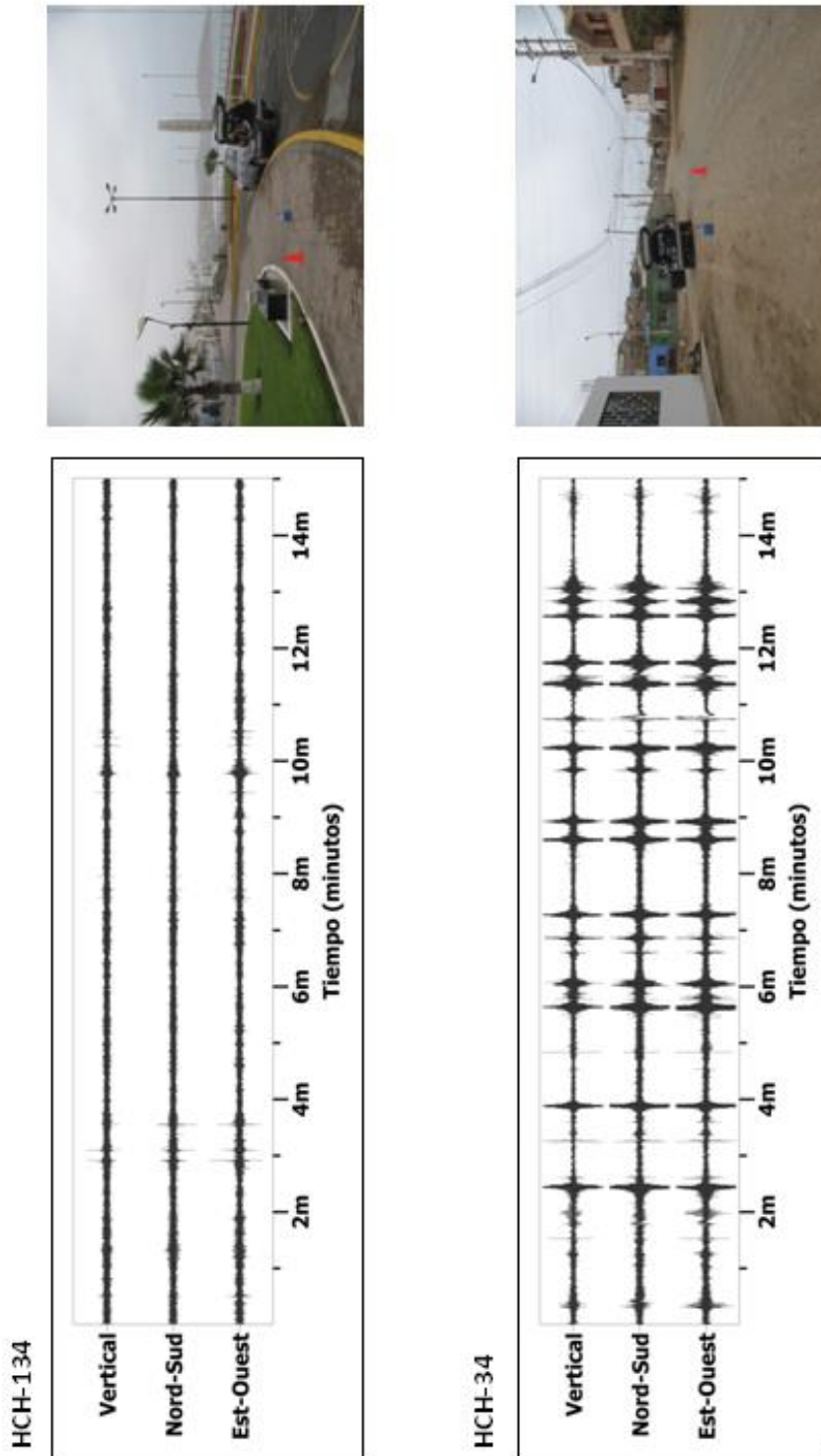


Figura 9: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona libre de ruidos de fondo (HCH-134) y otro con ruido aleatorio (HCH-34). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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 sus valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar (Figura 10). Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

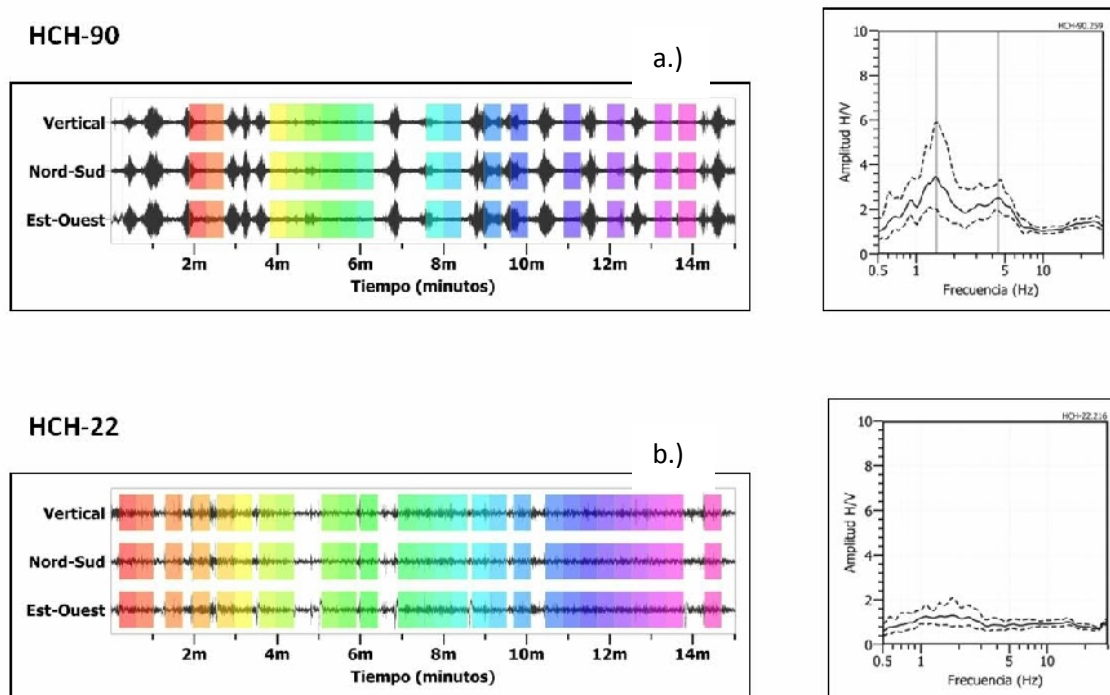


Figura 10: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. **a)** Registros y razones H/V donde se identifican frecuencias predominantes, **b)** Registros y razones H/V en los cuales no resalta ninguna frecuencia predominante. Las líneas 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.



Figura 11: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica

.- **Técnica 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 11). 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 cambio de las propiedades físicas de

los materiales que la conforman, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte (V_s). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte (V_s) para el punto medio de cada línea de estudio. La aplicación de un nuevo cálculo iterativo inverso, permite conocer el periodo predominante teórico correspondiente al perfil de velocidades, el cual es correlacionado con el obtenido con la técnica H/V a fin de validar ambos resultados.

.- **Técnica de Prospección Eléctrica:** Tiene por objetivo determinar la distribución real de la 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 12).



Figura 12: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos

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, Vp: 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. Para construir secciones geoeléctricas, se hace uso de algoritmos matemáticos de inversión de datos y procesamiento de imágenes. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.

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

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

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

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

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

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

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

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

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y TSUNAMI

La ciudad de Huacho se encuentra ubicada en el borde occidental de la región central 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. Asimismo, es necesario conocer los posibles escenarios a presentarse en la zona costera ante la ocurrencia de un tsunami de carácter local.

8.1.- Sismicidad Regional

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 central 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 13). Una de estas ciudades es Huacho y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1940 (8.0Mw), 1966 (7.5Mw), 1970 (7.7Mw) y 1974 (7.5Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en construcciones precarias de adobe y quincha, además de algunos escenarios de licuación de suelos. En la Figura 14, se presenta el mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de Mayo de 1940, el de mayor magnitud ocurrido en los últimos 100 años en el borde occidental de la costa central del Perú. La máxima intensidad evaluada en la ciudad de Huacho fue de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Los otros sismos importantes produjeron en la ciudad intensidades entre V y VII (MM), con daños y efectos puntuales en viviendas de adobe y quincha. Los tsunamis producidos por estos eventos sísmicos no causaron daños importantes en la zona costera, básicamente debido a la poca altura de sus olas (<3 metros) y a la escasa población allí existente en los años en los cuales ocurrieron.

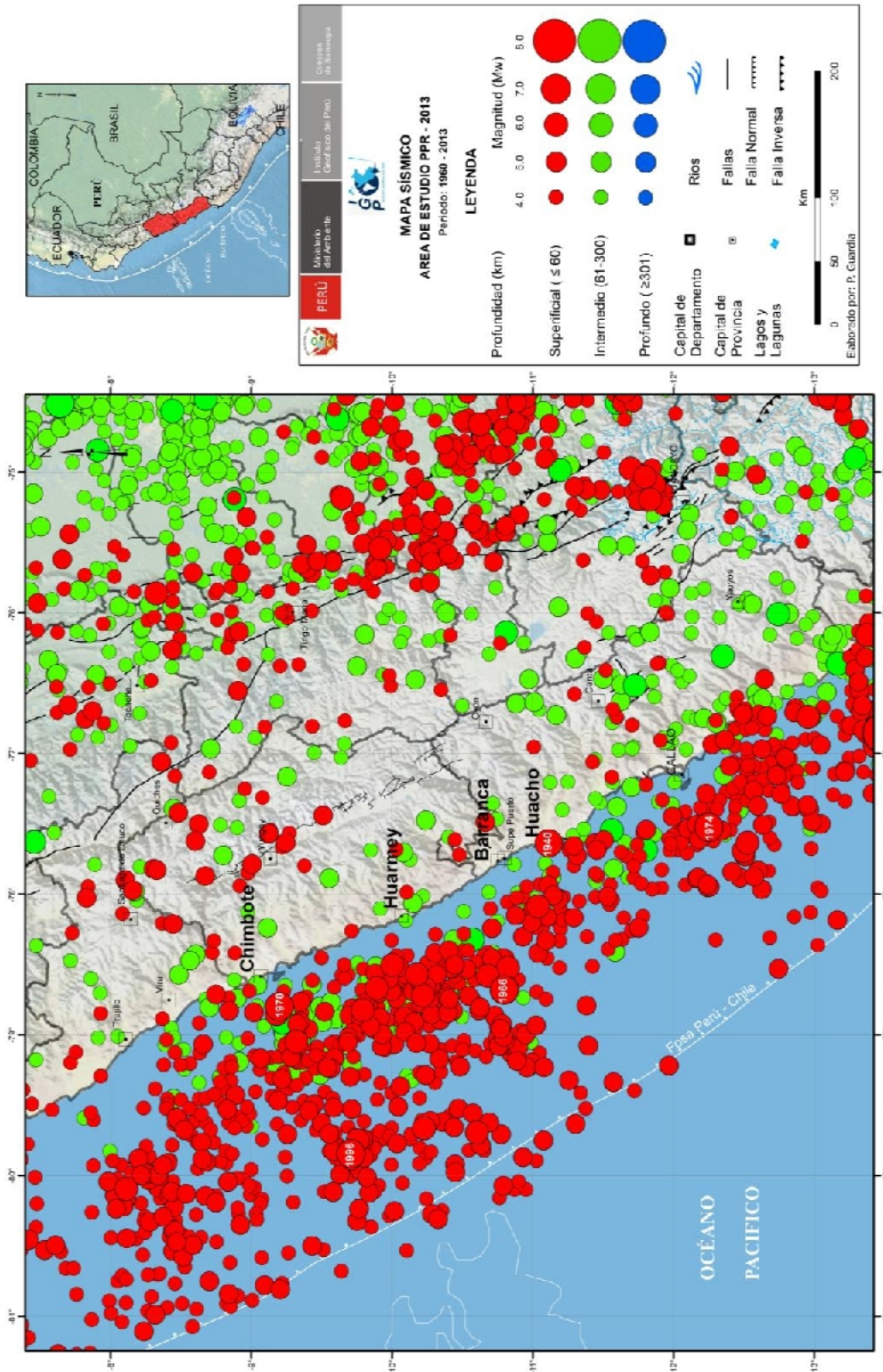


Figura 13: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región central del Perú. Los sismos de mayor magnitud están indicados por el año de ocurrencia dentro de los círculos mayores.

Es importante remarcar que en los años en que ocurrieron los sismos y tsunamis antes indicados, la situación geográfica y demográfica de la ciudad de Huacho fue menor y a la fecha, debido a su crecimiento acelerado, la población se ha asentado sobre terrenos agrícolas y en las cercanías del río Huaura y zonas de playa, lo cual ha incrementado su riesgo ante la posible recurrencia de sismos y tsunamis.

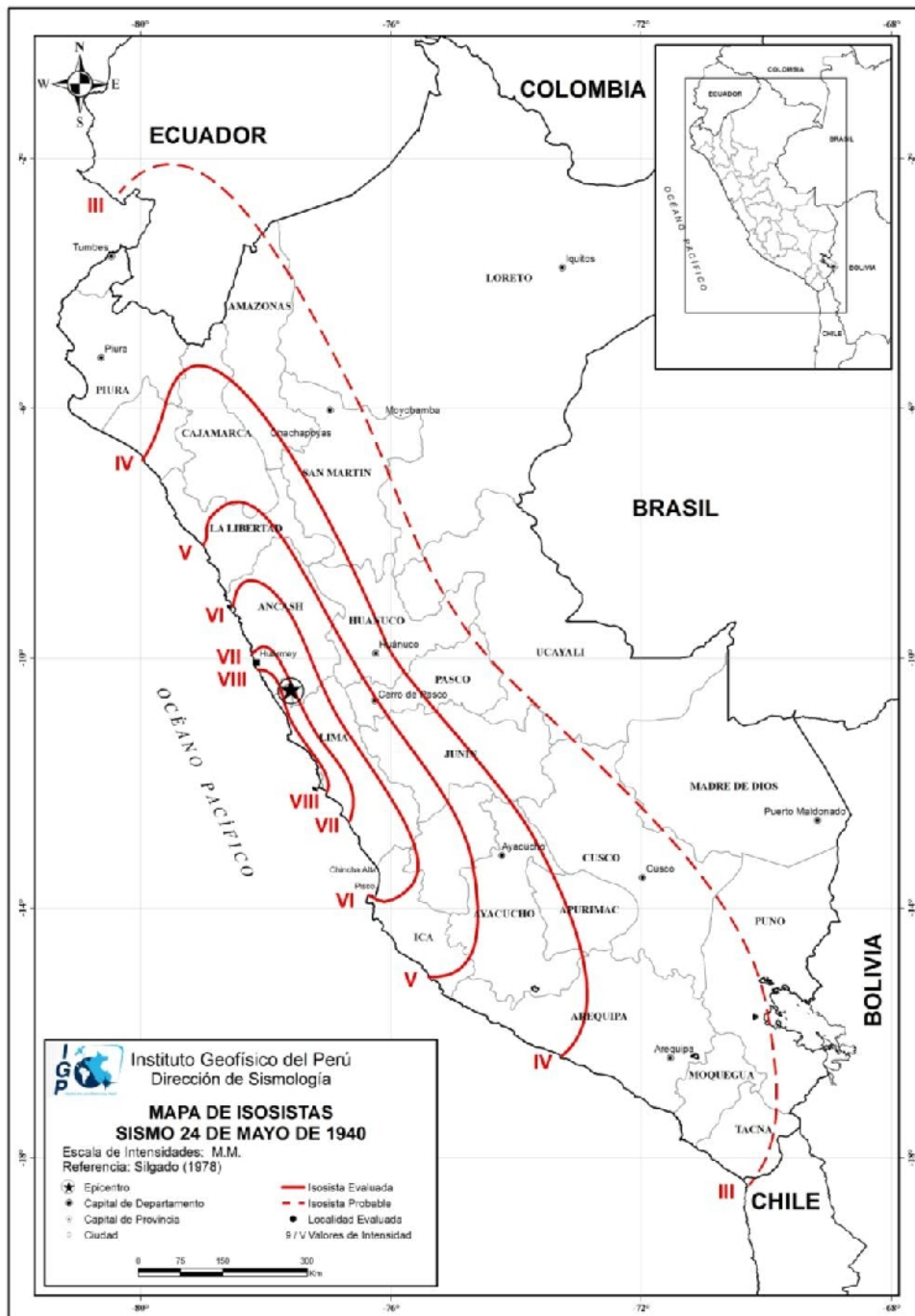


Figura 14: Mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de mayo de 1940 (8.0Mw). En la ciudad de Huacho las intensidades fueron el orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada.

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, 2012), 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 de estudio se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 360 a 420 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 en la ciudad de Huacho.

8.3.- Tsunamis

La información histórica sobre tsunamis ocurridos en la región central del Perú y que afectaron, en diferente grado, a las zonas costeras es bastante numerosa. En la Tabla 1 se presenta la relación de sismos que produjeron tsunamis contenidos en el catálogo sísmico del Perú. Estos sismos presentaron magnitudes superiores a 7.0 Mw y produjeron niveles de intensidades en la zona epicentral del orden de VII (MM) a más. En general, los tsunamis afectaron a la zona costera del Callao con olas de hasta 7 metros de altura. Para el caso del tsunami del año 1687, olas de 10 metros de altura causaron efectos importantes en los puertos y localidades de Callao, Chancay y Chimbote. Por otro lado, el tsunami de 1746, con olas de hasta 24 metros causó destrucción en Callao y puertos de Chancay y Huacho dejando muchas embarcaciones varadas; además de daños en edificaciones aledañas a la zona costera. El tsunami de 1974, con olas del orden de 3 a 4 metros, inundó varias fábricas en las bahías de Chimú, Chancay y Tortugas al norte de Lima, destruyendo muelles y zonas de cultivos. La copiosa información histórica no señala daños en la zona costera de la ciudad de Huacho, debido probablemente a la no existencia de obras y/o poca población en sus cercanías para los años en que estos peligros se hicieron presentes.

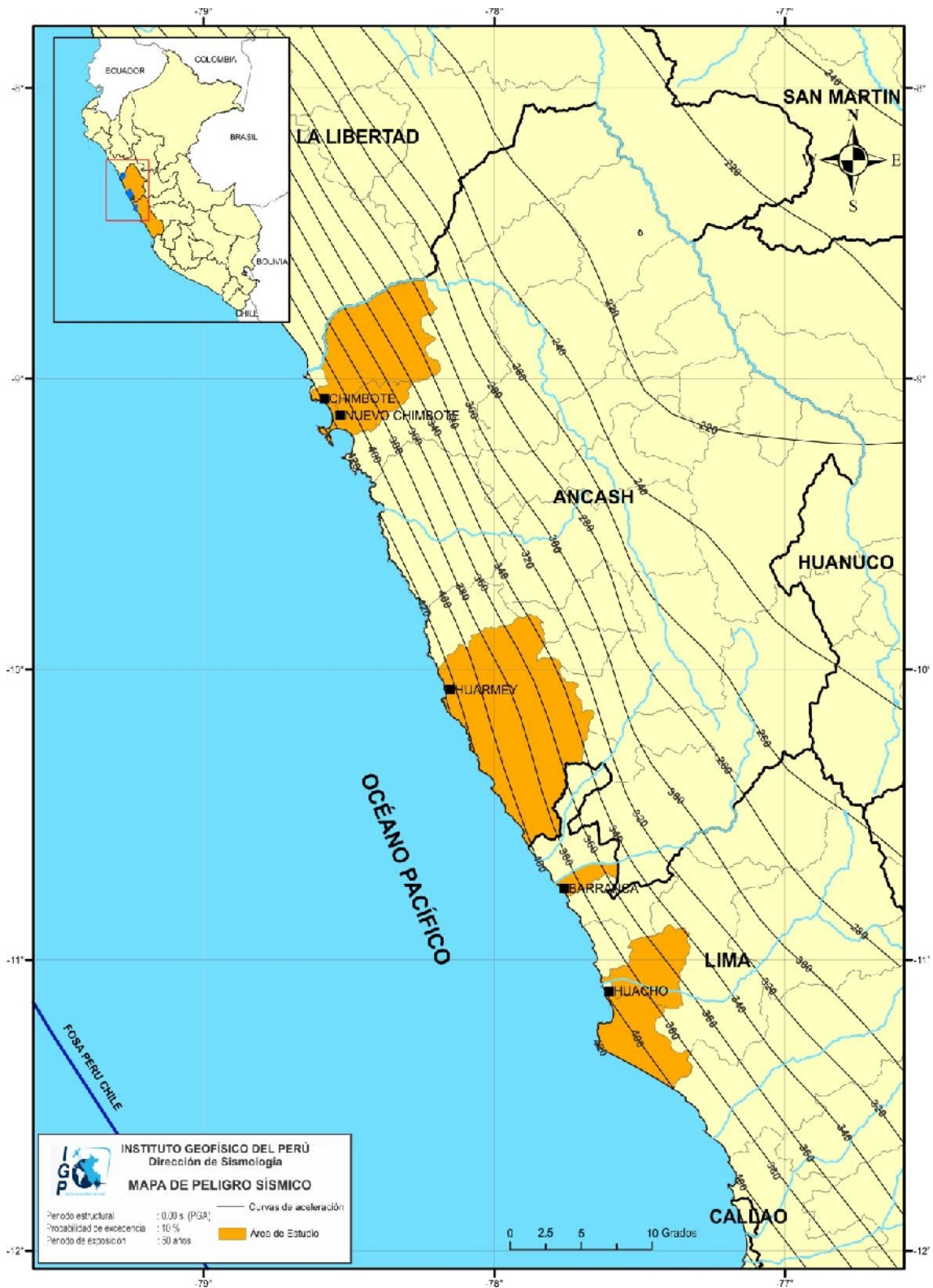


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Tabla 1: Parámetros epicentrales de los principales sismos tsunamigénicos que han afectado la costa de la región central del Perú (Silgado, 1987)

| Fecha | Hora Local | Latitud S | Longitud W | Magnitud Mw | Intensidad Mercalli |
|--------------|------------|-----------|------------|-------------|---------------------|
| 1586, Jul 09 | 19:30 | 12.1 | 77.0 | 8.6 | X |
| 1678, Jun 16 | 20:45 | 12.3 | 77.8 | 7.7 | IX |
| 1687, Oct 20 | 05:30 | 13.2 | 76.5 | 8.6 | X |
| 1690, Nov 20 | 13:30 | 12.6 | 77.0 | 7.2 | VI |
| 1746, Oct 28 | 22:30 | 12.0 | 77.2 | 9.0 | X |
| 1806, Dic 01 | - | 12.0 | 78.0 | - | VII |
| 1868, Ago 13 | 17:46 | 18.3 | 70.6 | 8.6 | VII |
| 1974, Oct 03 | 09:21 | 12.3 | 77.5 | 8.1 | IX |

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

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de la carta 2212 adquirida en la Dirección de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú (DHN), siendo su muestreo de 30 metros. La topografía local fue construida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) Aster GDEM obteniéndose una resolución espacial de 30 metros.

.- Modelo de fuente sísmica: Se considera como escenario un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a la zona costera de Huacho y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del promedio de los valores correspondientes a los sismos de 1966 y 1974. Otros parámetros, como las dimensiones del área de ruptura fueron estimadas utilizando las relaciones de Papazachos (2004).

.- Modelado numérico de tsunamis, TUNAMI-N2: El proceso de modelado numérico requiere tener el conocimiento sobre los procesos físicos asociados a las tres fases principales de un tsunami: generación, propagación e inundación. Para el modelado de tsunami se utiliza el algoritmo TUNAMI-N2, desarrollado por

investigadores de la Universidad de Tohoku en Japón (Goto y Ogawa, 1992). Para una determinada condición de la fuente sísmica, el modelo TUNAMI-N2 simula la generación, propagación e inundación del tsunami con una exactitud bastante alta (comparación con muchos tsunamis históricos). Así mismo, proporciona información sobre el tiempo de arribo de la primera ola y su altura en una determinada región costera, además de los niveles de inundación horizontal.

En la Figura 16 se muestra los resultados obtenidos para la zona costera de la ciudad de Huacho y ellos indican que la primera ola del tsunami llegaría en un tiempo entre 18 a 20 minutos después de ocurrido el sismo. Esta ola tendría alturas del orden de 9 metros en la playa Centinela; de 7 metros en el río Huaura, caleta Carquín, Bahía de Huacho y playa Chica; de 6 metros en la playa Chorrillos y en el puerto de Huacho; y de 5 metros en las playas Hornillos y El Colorado.

Por otro lado, en la Figura 17 se presenta el mapa de niveles de inundación horizontal, tierra adentro con respecto a la línea de costa, y en ella se observa que el tsunami alcanzaría distancias de 1,400 metros a lo largo del río Huaura; 600 metros a la altura de la caleta Carquín; de 300 a 200 metros en las playas Centinela y Chorrillos, además de la Bahía y el puerto de Huacho. Distancias de inundación menores a 150 metros se presentarían en las playas Chica, Hornillos y El Colorado.

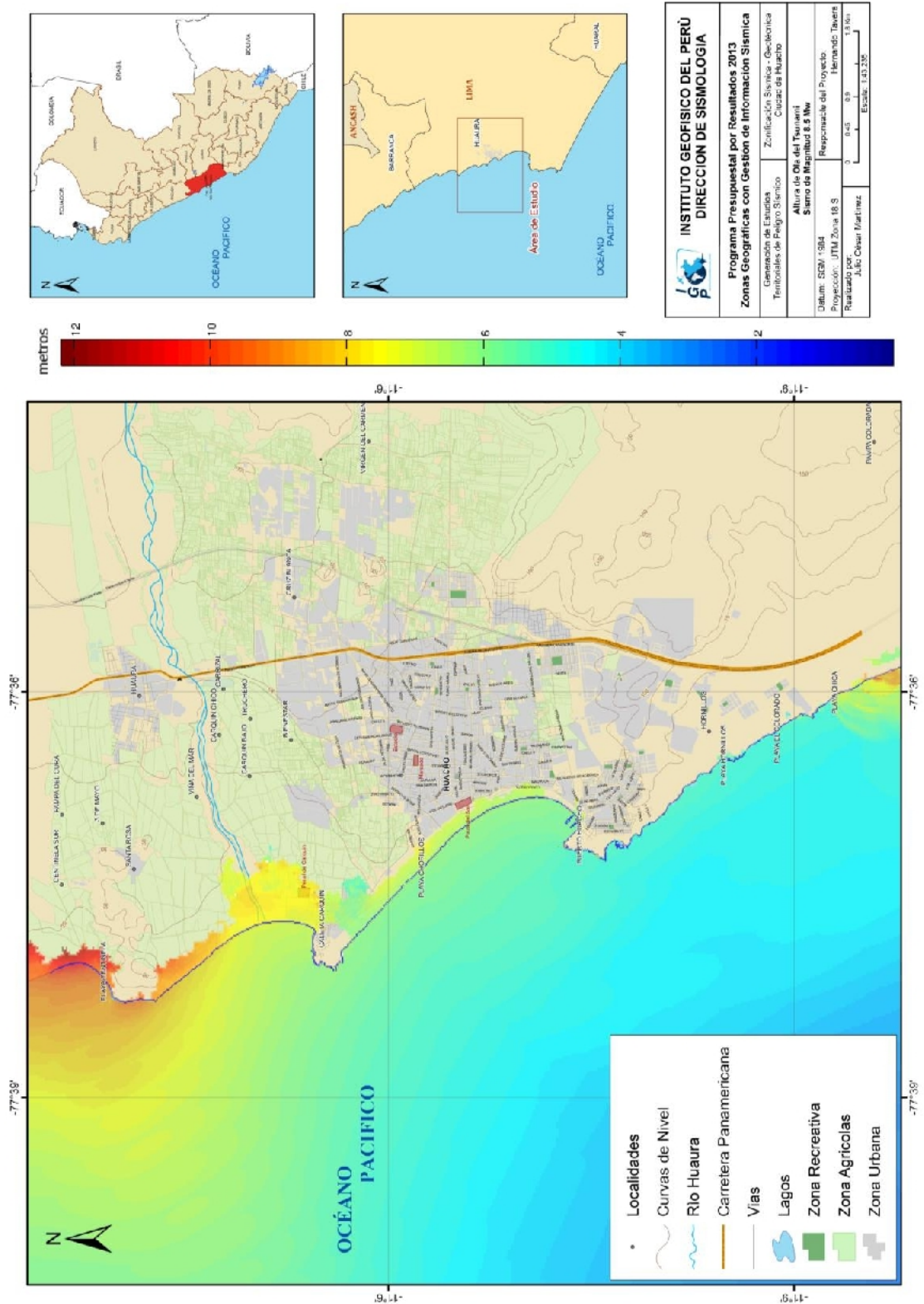


Figura 16: Mapa de altura de ola de tsunami en la zona costera de la ciudad de Huacho

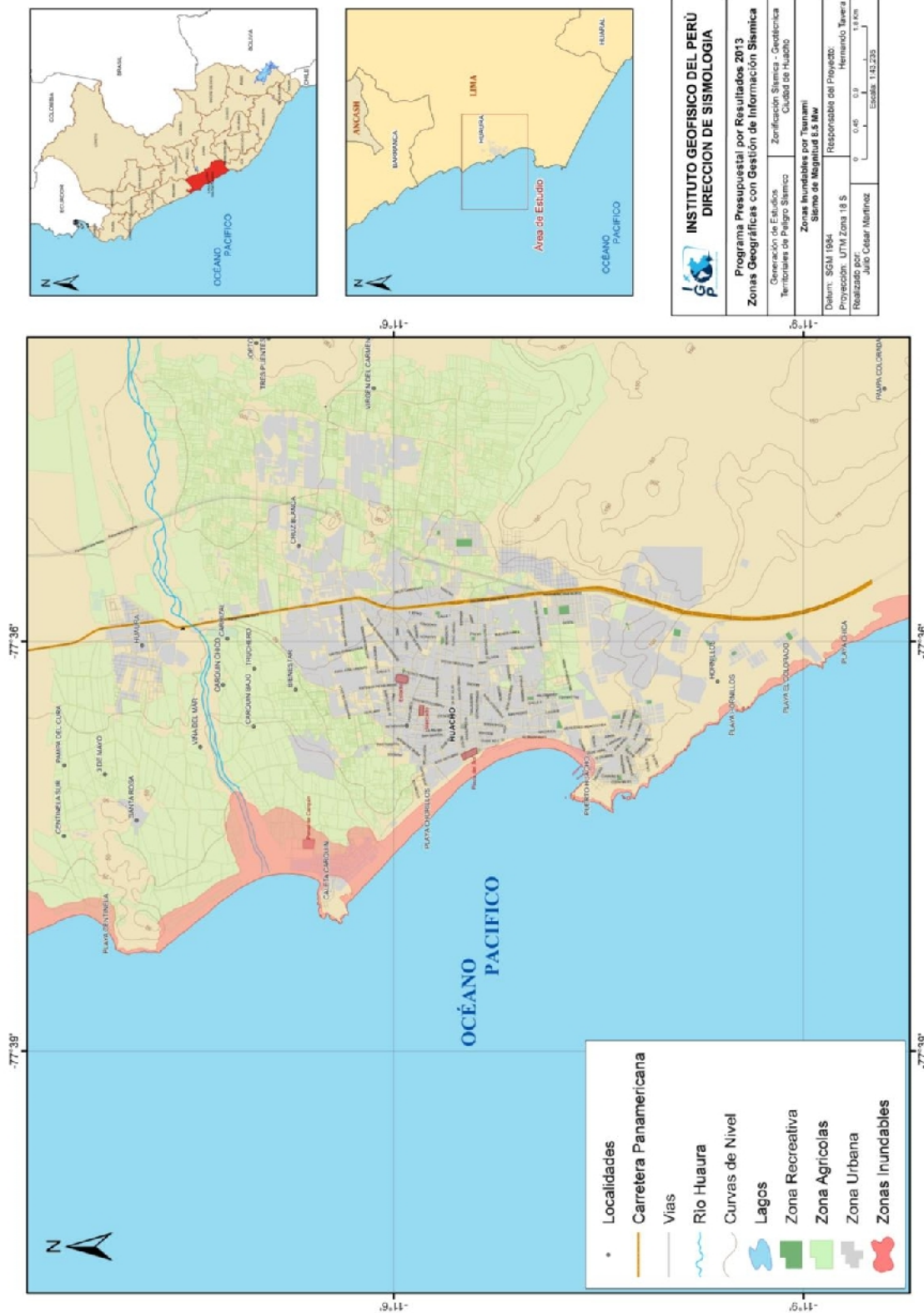


Figura 17: Mapa de niveles de inundación horizontal en la zona costera de la ciudad de Huacho

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

Para los estudios geomorfológicos, geológicos y geodinámicos, se ha hecho uso de la base topográfica digital a escala 1/100,000 adquiridos del Instituto Geográfico Militar (IGN), la misma que fue complementada con la topografía digital obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación (MED) con una resolución de 30 metros (www.astergdem.com). La información es georeferenciada en el SIG considerando el sistema UTM y datum WGS 84, Zona 18-S.

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en el área de estudio son el resultado del modelado geológico causado por eventos tectónicos y procesos de geodinámica superficial. Para la identificación de las distintas geoformas presentes en el área de estudio se ha considerado el Modelo Digital del Terreno (MDT) y el mapa de pendientes. En base al MDT, la ciudad de Huacho se asienta sobre una superficie que tiene variantes topográficas que van de 0 metros hasta los 250 m.s.n.m, estando las zonas de menor elevación ubicados en dirección Oeste y las de mayor elevación hacia el Este, por ejemplo Cerro Colorado (Figura 18).

9.1.1.- Pendientes

El mapa de pendientes permite identificar las distintas geoformas presentes en el terreno en base a la aplicación del algoritmo Spatial Analyst del software SIG, usando como archivo fuente el MDT generado para el área de estudio. La ciudad de Huacho se encuentra asentada sobre una superficie de variadas pendientes, siendo en algunos sectores muy altos e incluso próximos a la vertical, como es el caso de los acantilados de Punta Viuda (Figura 19).

9.1.2. Unidades Geomorfológicas

El distrito y ciudad de Huacho se encuentra emplazado sobre una superficie de variada topografía al costado del mayor afluente hídrico de la zona, el río Huaura. En este escenario, es posible reconocer las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 20):

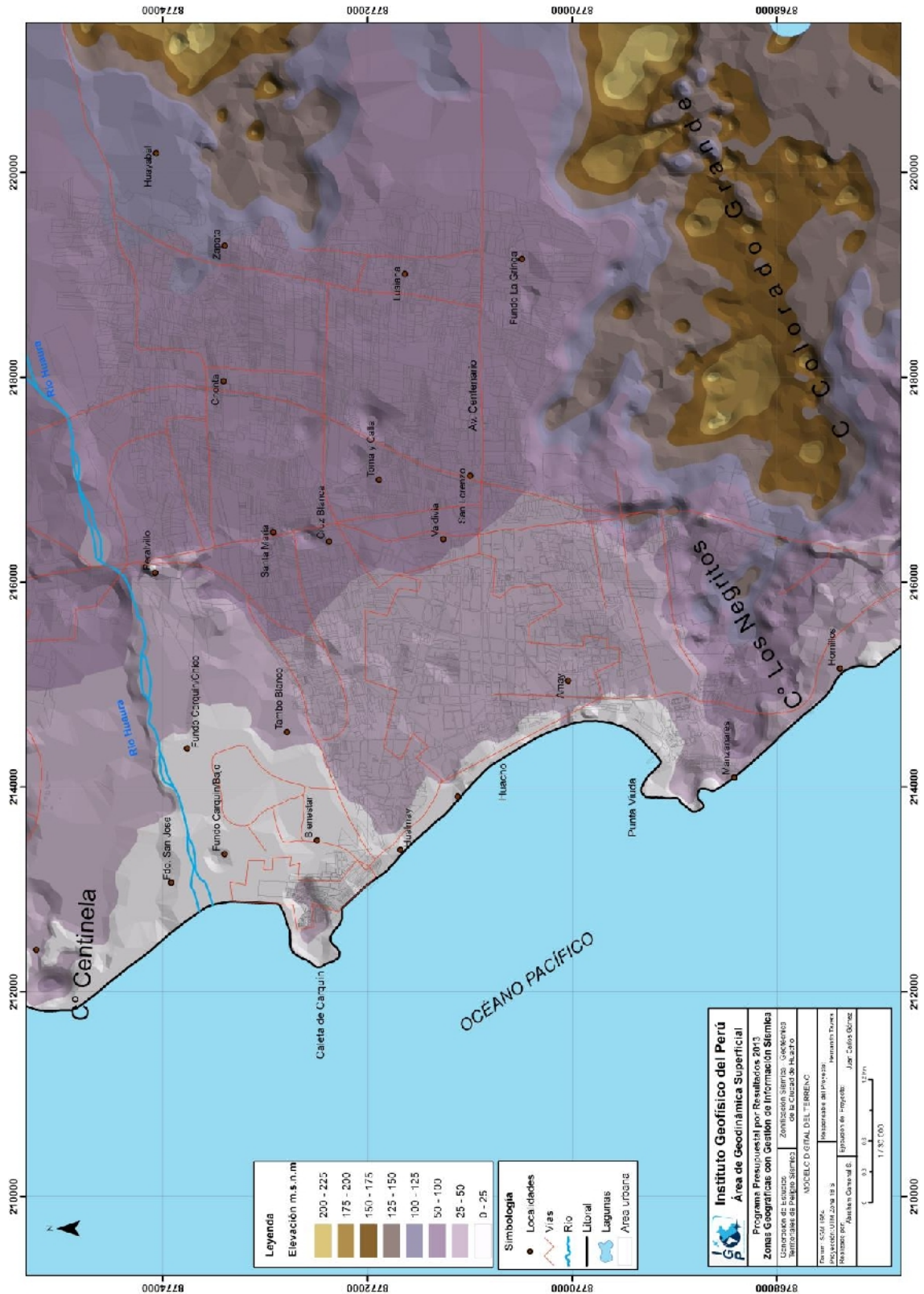


Figura 18: Mapa de modelo digital del terreno de la ciudad de Huacho

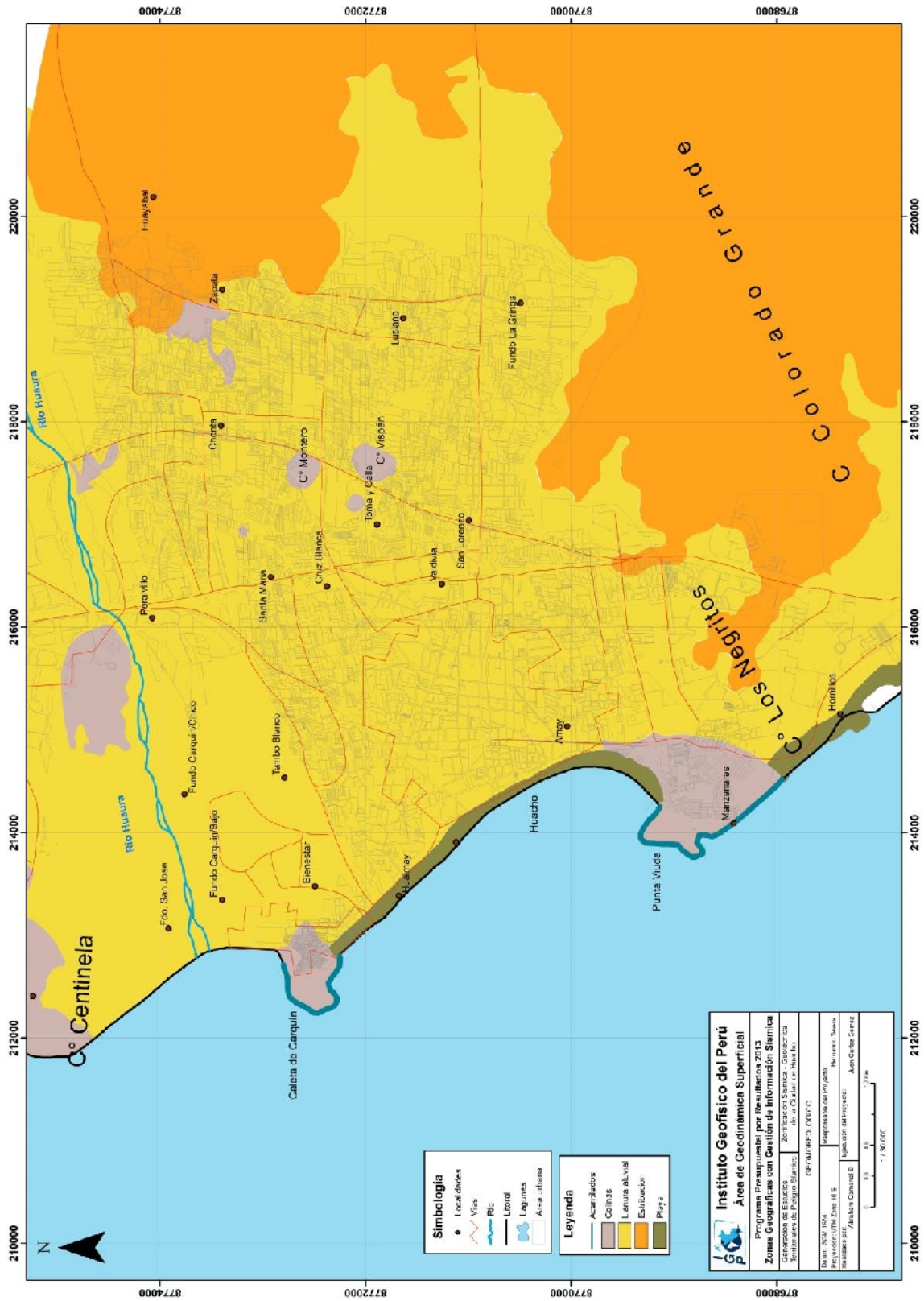


Figura 20. Mapa geomorfológico de la ciudad de Huacho

.- **Llanura Aluvial:** Esta unidad es representada por un relieve plano (pendientes menores a 5°) que ha sido formado por la acción fluvial del río Huaura. Espacialmente, abarca toda la zona de estudio y en mayor porcentaje, en la zona central de la ciudad. Sobre esta unidad se asientan las zonas urbanas de los distritos de Huacho, Hualmay y Santa María. Asimismo, alberga a campos agrícolas debido a que está formada por suelos limosos que suprayacen a materiales gravosos, Figura 21.



Figura 21: En la ciudad de Huacho, la actividad agrícola se desarrolla sobre la geoforma llanura aluvial.

.- **Colinas:** Corresponden a zonas cuya topografía presenta ondulaciones elevadas y formadas por estructuras rocosas soportaron los procesos de meteorización y erosión. De estos, el viento ha modelado los afloramientos volcánico-sedimentarios que sobresalen entorno a la ciudad con elevaciones, que en algunos casos, llegan a 100 m.s.n.m, Figura 22.

Actualmente, parte de estas áreas han sido ocupadas por asentamientos humanos, principalmente sobre las colinas Vispán y Montero, ubicados al Este del área de estudio, en el distrito de Santa María.

.- **Acantilados:** Son geoformas que se caracterizan por presentar pendientes de inclinación subvertical a vertical. En el área de estudio, los acantilados se han formado como el resultado de la acción erosiva de las olas de mar sobre materiales competentes como lavas andesíticas, tal es el caso de Punta Viuda. En el extremo

Norte de la ciudad, en el distrito Caleta de Carquín, también se observa la presencia de este tipo de unidad geomorfológica, Figura 23.



Figura 22: Ciudad de Huacho. Colinas presentes en el extremo Este del área de estudio. Sobresalen las colinas Montero y Vispán



Figura 23: Ciudad de Huacho. Acantilado Punta Viuda (lavas andesíticas) con desnivel de 30 metros. La flecha indica la ubicación del A.H. Manzanares

.- **Estribaciones andinas:** Son cadenas de montañas de baja altitud, que para el área de estudio representan los sectores de mayor elevación. Están presentes en los extremos Sur y Sureste de la ciudad de Huacho. En el primer sector domina el cerro Negritos y en el segundo, el cerro Colorado Grande (Figura 24).



Figura 24: Estribación andina cerro Colorado Grande, destaca por ser el de mayor elevación



Figura 25: Playa León Dormido. La línea de color amarillo indica el límite de esta unidad

.- **Playa:** Son unidades formadas por la acción erosiva de las olas y posterior acumulación o acreción de sedimentos. En el área de estudio, estas geoformas están presentes a lo largo del litoral. En el extremo Sur de la ciudad se encuentran las playas Hornillos, Colorado, Chica y León Dormido; en el extremo Oeste (zona central), las playas Chorrillos y Huacho; y en el extremo Norte, la playa Carquín, Figura 25.

9.2.- Geología

Como información de base se consideró el Cuadrángulo Geológico de Huacho editado por INGEMMET a escala 1/100,000 (Hoja: 23-h). En general, se observa que las rocas más antiguas corresponden a la Formación Casma, de naturaleza volcánica; mientras que, los materiales más jóvenes están conformados por depósitos fluviales ubicados en ambos márgenes del río Huaura. Además, en el área de estudio afloran rocas intrusivas (diorita), depósitos marinos, eólicos y aluviales, estos últimos cubren aproximadamente el 60% de la extensión del área de estudio (Figura 26).

9.2.1.- Rocas Volcánicas

Unidad formada por secuencias volcano-clásticas y sedimentarias del Cretáceo Inferior. Están constituidas por andesitas basálticas con texturas porfiríticas en matriz afanítica. Estas rocas se intercalan con limolitas bien estratificadas que afloran al Sur del área de estudio (Punta La Viuda, AA.HH Manzanares y Atalaya), en donde se ha identificado un fallamiento inverso bien definido y que habría originado el plegamiento de las estructuras rocosas (Figuras 27 y 28). Afloramientos de esta unidad están presentes en el extremo Este de la ciudad de Huacho (distrito de Santa María), formando los cerros Montero y Vispán, por mencionar a los más importantes.

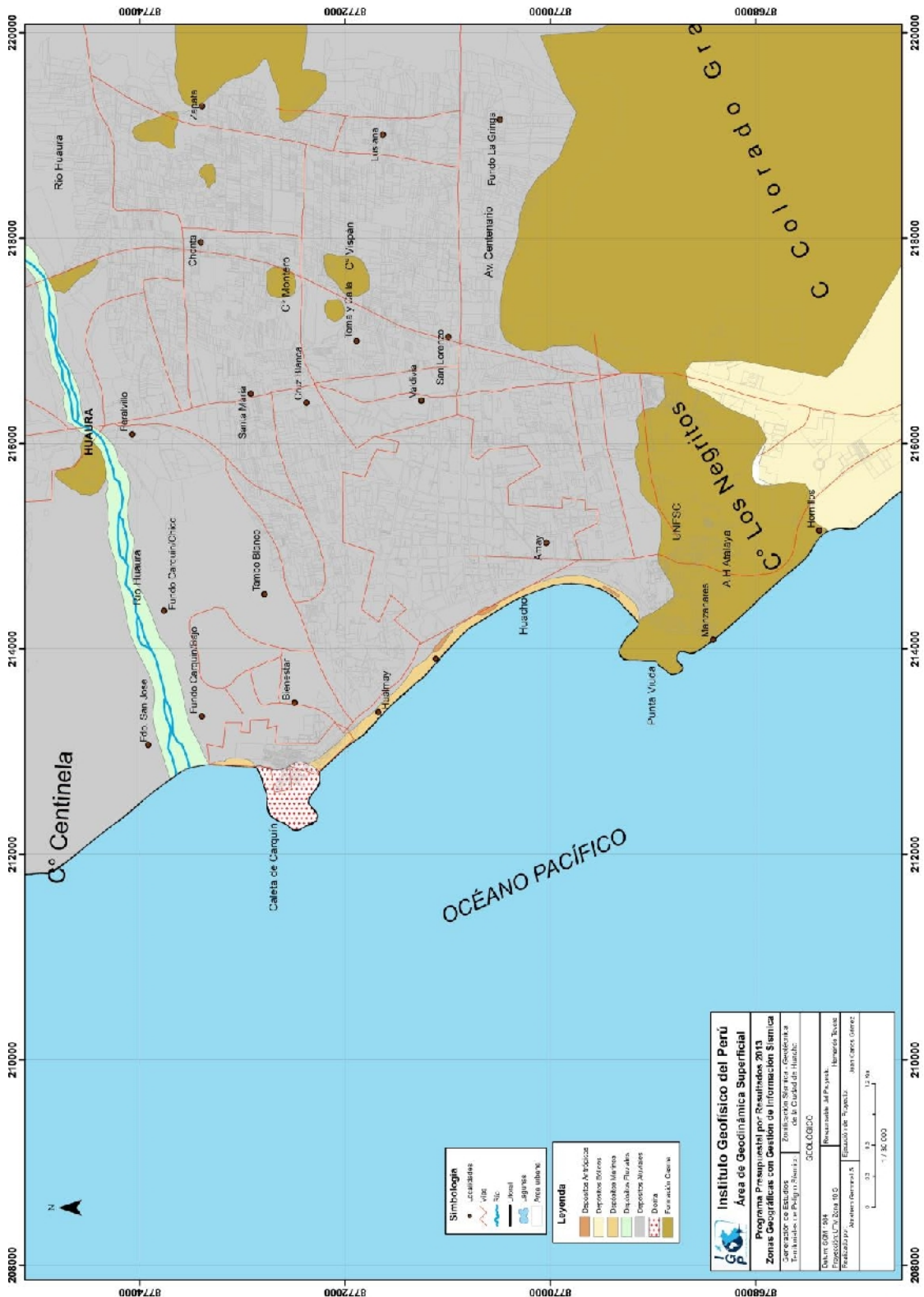


Figura 26: Mapa geológico de la ciudad de Huacho



Figura 27: Estrato de limolitas moderadamente fracturadas pertenecientes a la formación Casma

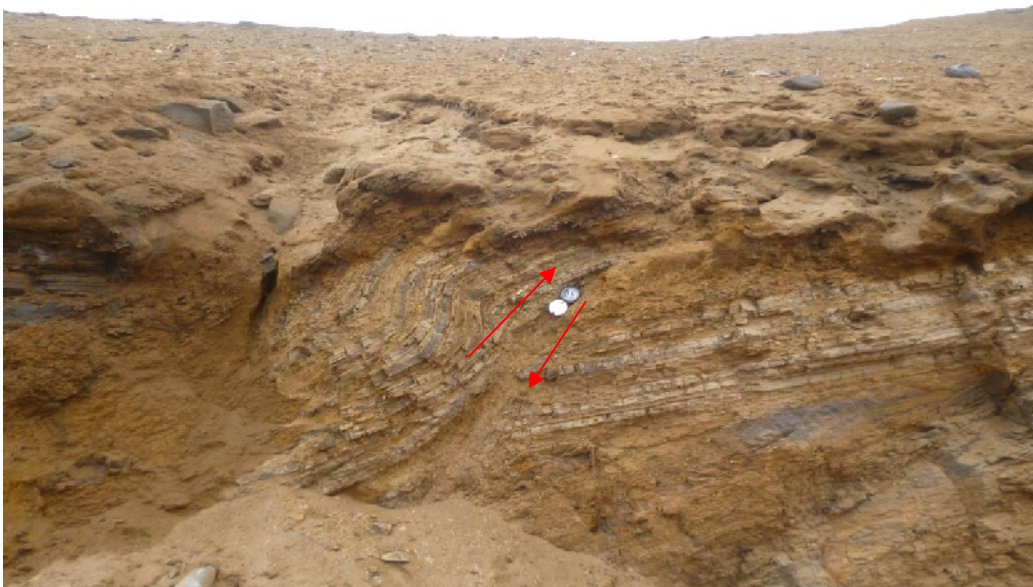


Figura 28: Traza de falla geológica de tipo inversa en estratos delgados de limolita, A.H. Atalaya

9.2.2.- Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas son del tipo diorita, resistentes a procesos erosivos, todas presentes en afloramientos que se encuentran en el extremo Norte de la ciudad de Huacho (distrito de Carquín). Ellas constituyen las superficies de mayor altitud presente en el área de estudio (Figura 29).



Figura 29: Afloramientos de diorita formando acantilados en el extremo Norte de la ciudad de Huacho.

9.2.3.- Depósitos Cuaternarios

.- **Depósitos marinos:** Se encuentran presentes a lo largo de todo el litoral, especialmente en las playas Hornillos, Chorrillos y Carquín. Consisten en arenas de grano medio a fino que se encuentran como materiales no consolidados, Figura 30.



Figura 30: Bancos de arena de grano medio ubicados en la playa Chorrillos.

.- **Depósitos Eólicos:** Están constituidos por arenas de grano fino y limos que han sido transportados y depositados por la acción del viento. Estos depósitos están presentes en los extremos Sur y Este del área de estudio cubriendo áreas elevadas, tal es el caso de los cerros Negritos y Colorado Grande.

.- **Depósitos Aluviales:** Se denomina así a los materiales que han sido transportados y depositados por acción del flujo del agua, pero a diferencia de los depósitos fluviales, presentan menor transporte. En el área de estudio se presentan como intercalaciones de limos y gravas, aunque es común observar bancos de gravas con escaso contenido de limos y arenas. Estos depósitos cubren gran parte del área de estudio y sobre ellos se han desarrollado diversas actividades agrícolas, Figura 31.



Figura 31: Intercalación de limos y gravas presentes en superficies cercanas al distrito de Hualmay.

.- **Depósitos Fluviales:** Corresponden a depósitos que han sido transportados y depositados por el río Huaura a lo largo de su cauce. En la margen derecha del río se muestran como terrazas altas; mientras que, en la margen izquierda conforman terrazas bajas, susceptibles a inundación. Los materiales que constituyen estos depósitos son gravas redondeadas y clasto-soportados con presencia de matriz areno-limosa (Figura 32).



Figura 32: Depósitos fluviales ubicados en las inmediaciones del puente Huaura

.- **Depósitos antrópicos:** Están compuestos por materiales, en diferentes proporciones, tipo escombros de construcción y maleza con bajo grado de consolidación y condiciones geotécnicas no adecuadas para fines ingenieriles, Figura 33.



Figura 33: Terraplén de 2 metros de espesor sobre el nivel natural del terreno

9.3.- Geodinámica

La geodinámica aborda todos los procesos denudativos que modelan el relieve de la superficie terrestre e incluye aquellos movimientos que se producen, ladera abajo, de una masa rocosa, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991), ver Figura 34. Asimismo, estudia los eventos de origen hidrometeorológico que generan cambios en la morfología del terreno, por ejemplo inundaciones.

9.3.1.- Movimientos en Masa

En la ciudad de Huacho, como movimientos en masa se tiene a los procesos de caída de rocas y derrumbes; mientras que, como eventos de origen hidrometeorológicos, se encuentran las inundaciones fluviales. Asimismo, es posible considerar a los procesos de asentamientos de tierra y erosiones marinas. En la ciudad de Huacho se distinguen los siguientes tipos de movimientos en masa:

.- **Caída de rocas:** Son eventos que involucran el desprendimiento de bloques de roca o tierra por efectos de la gravedad y que debido a su caída pueden rebotar produciendo el aumento o la disminución de su velocidad, situación que condiciona el grado de daño que pueden producir. Este tipo de movimientos se producen en el acantilado de Punta la Viuda, ubicado en el extremo sur de la ciudad de Huacho. La verticalidad del terreno y la meteorización que actúa sobre los materiales volcano-sedimentarios, predisponen el desprendimiento de bloques de rocas, Figura 35. Situación similar se presenta en los acantilados ubicados en el extremo Noroeste de la ciudad de Huacho, en el distrito Caleta de Carquín, así como en los cerros Montero y Vispán, ambos ubicados en el extremo Este del área de estudio, distrito de Santa María (Figura 36).

.- **Derrumbes:** Consiste en el desprendimiento súbito de una masa de roca o tierra sin presentar superficie de ruptura. A lo largo de la costa de la ciudad de Huacho, desde Punta Viuda hasta Caleta de Carquín, se observan derrumbes dispersos, en taludes conformados por depósitos aluviales, materiales que ceden debido a que se ha desestabilizado la base de los taludes (Figura 37).

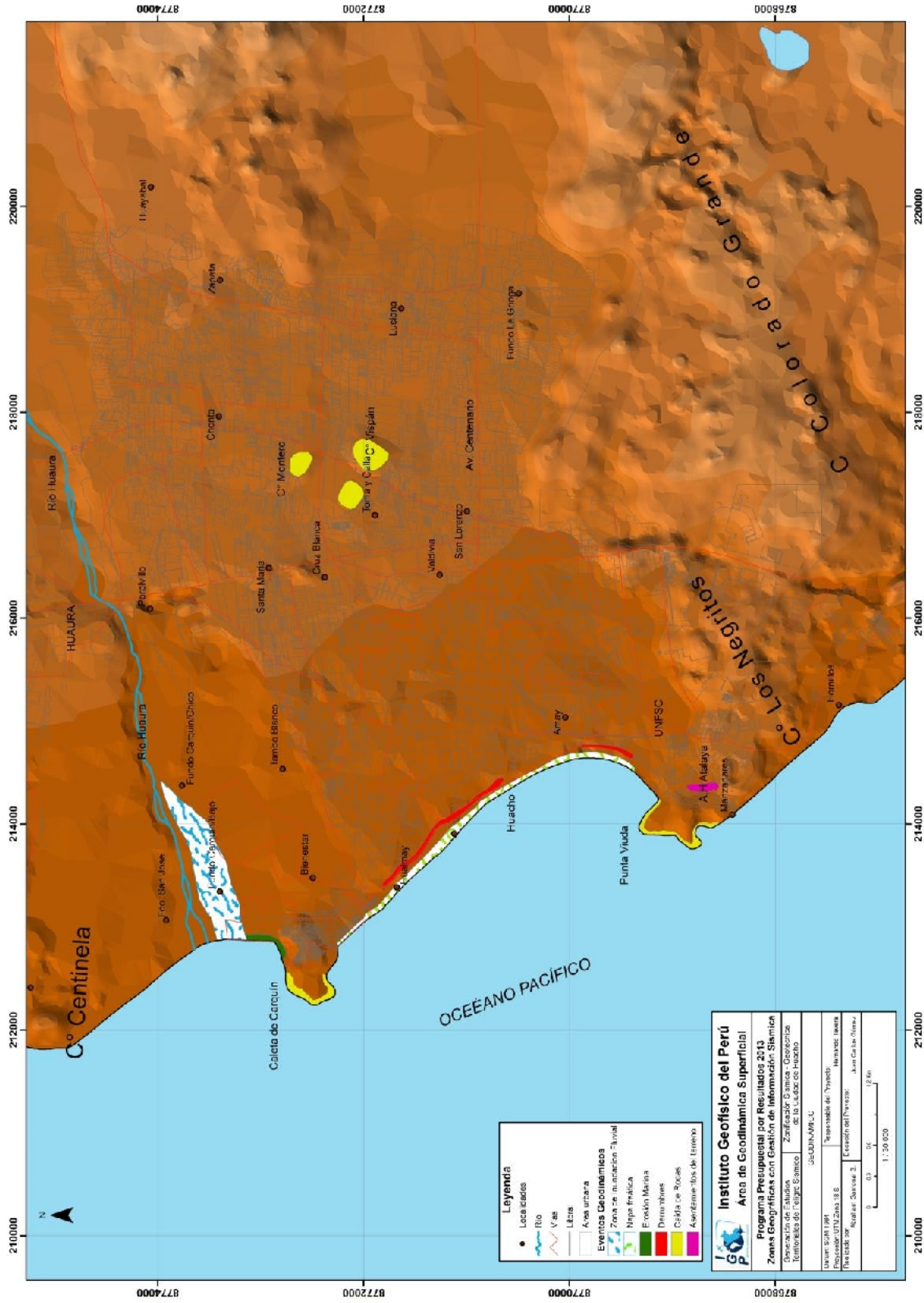


Figura 34: Mapa geodinámico para la ciudad de Huacho

En el A.H Manchurria, a 1.25 km al Sur de la ciudad de Huacho, se observan taludes inestables que presentan desprendimientos del terreno conformados por intercalaciones de arenas de grano fino color amarillento, limos y gravas. En esta zona los desprendimientos van a depender de la alta pendiente que presentan los taludes, así como por la carga de las construcciones asentadas sobre estos. Debido a esto, la zona es considerada como de alto peligro, debido a que son altamente susceptibles a colapsar ante la ocurrencia de un evento sísmico severo (Figura 38).



Figura 35: Bloques de piedras susceptibles a caer en los acantilados de Punta Viuda

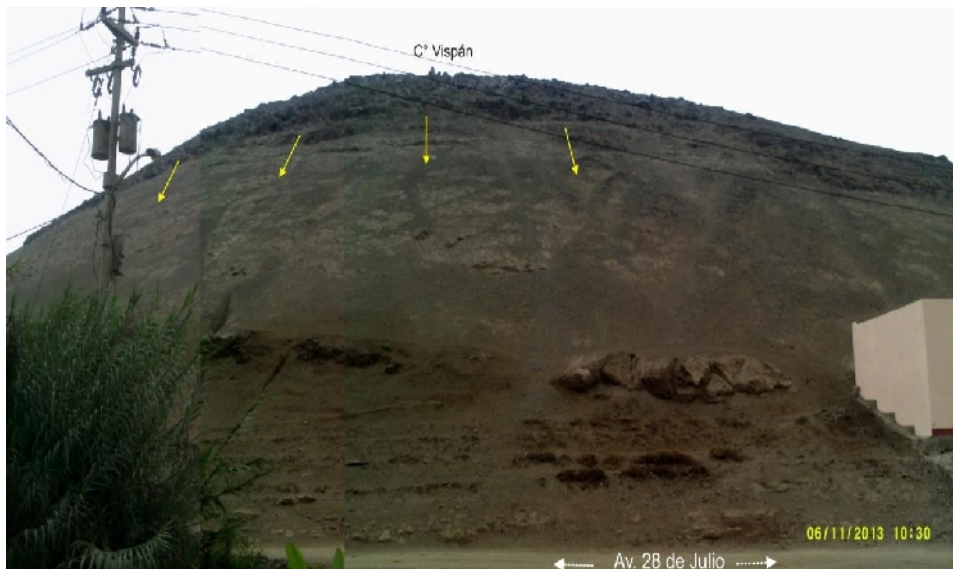


Figura 36: Rocas volcánicas que suprayacen a suelos sedimentarios conformando el cerro Vispán. Las flechas amarillas indican la dirección de caída de bloques inestables.



Figura 37: Derrumbes en taludes conformados por depósitos aluviales. Ellos se encuentran en el límite de los distritos de Caleta Carquin y Huacho.



Figura 38: Zona de alta susceptibilidad a la ocurrencia de derrumbes (flechas en blanco). Las flechas de color amarillo indica la zona de apuntalamiento de viviendas.

9.3.2.- Procesos Erosivos

La erosión, involucra varios procesos naturales que alteran la composición química y estructura física de las rocas que afloran sobre la superficie terrestre, ocasionando el desgaste y destrucción de las mismas. La erosión es el resultado de la acción combinada de factores como: temperatura, agua, viento, entre otros. Es la

responsable de los diferentes relieves que adopta la corteza terrestre. En la ciudad de Huacho, predomina la erosión marina por su proximidad al litoral.

.- **Erosión marina:** Evento geodinámico se presenta a lo largo del litoral, tal es el caso de la playa Carquín ubicada en el distrito del mismo nombre (Figura 39), donde el embate de las olas erosiona y socava el terreno. Es frecuente que las olas alcancen distancias de aproximadamente 50 m llegando hasta la Av. Industrial, Figura 40.



Figura 39: Erosión del litoral en la playa de Caleta Carquin



Figura 40: En playa Carquin, las olas llegan hasta la Av. Industrial

.- Asentamientos de terreno: Estos eventos se presentan en el A.H Atalaya con grietas de 5 cm en superficie y profundidad no estimada. En el informe "Mapa de Peligros de Huacho" (INDECI, 2007), se infiere que estos "fracturamientos" son debidos a una falla geológica bautizada como "falla de Atalaya". En este estudio, el trabajo de campo realizado ha permitido observar que el desnivel de terreno presenta un salto de 10 cm con una inclinación de $\sim 80^\circ$ a lo largo de 150 metros de longitud en dirección Norte-Sur. 85° . Esta información permite concluir que no existen evidencias geológicas ni tectónicas suficientes para afirmar que se trata de una falla geológica, por el contrario correspondería a un asentamiento de terreno (Figura 41).

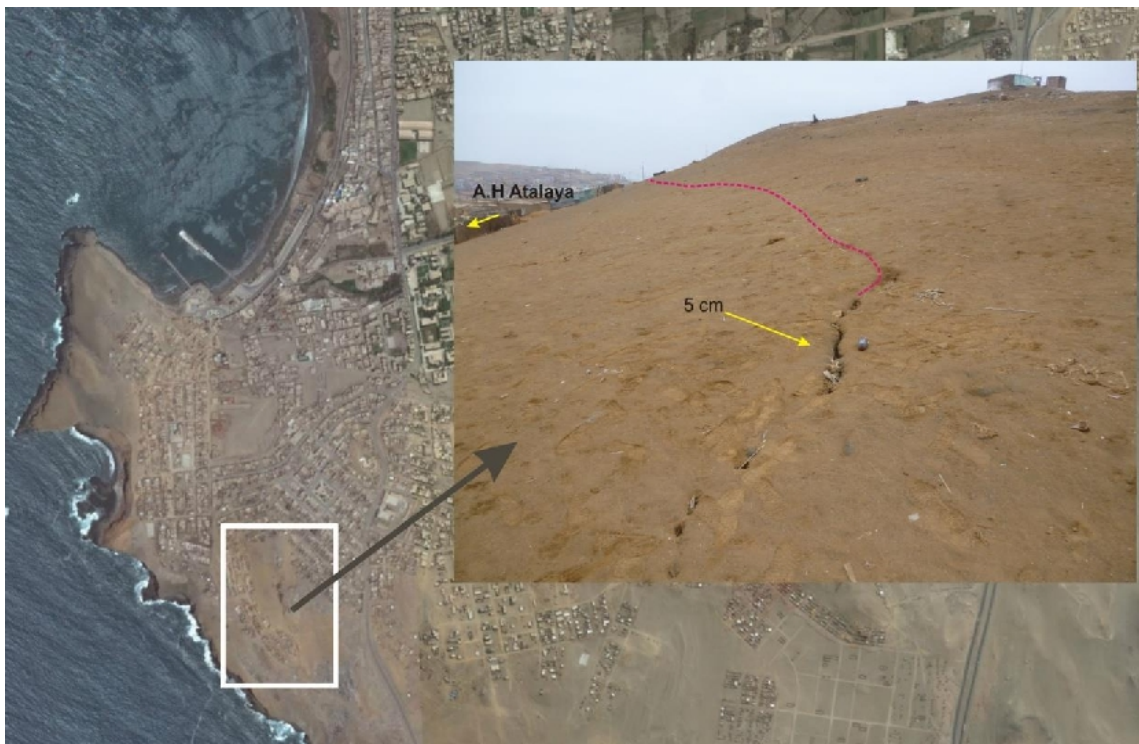


Figura 41: Evidencias del fracturamiento del terreno en el A.H. Atalaya debido al asentamiento del mismo.

9.3.3.- Inundación Fluvial

Las inundaciones son consideradas como peligros hidrometeorológicos y consisten en el desborde de un río de su cauce natural debido principalmente a precipitaciones extraordinarias y colmatación del mismo cauce. Estos eventos pueden ser repentinos y/o violentos y traen como consecuencia la destrucción de viviendas, terrenos de cultivo o en algunos casos pérdidas de vida.

En el área de estudio, el río Huaura es el principal colector hídrico. Fluye con dirección Noreste-Suroeste llegando a disminuir su cauce en el puente Huaura debido al afloramiento de rocas intrusivas resistentes a la erosión (Figura 42), para luego ensancharse aguas abajo conformando amplias terrazas de inundación hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (Figura 43). En épocas de estiaje discurre con delgados torrentes que forman dentro de su cauce, islotes conformados por gravas y arena. Cuando aumenta su caudal cubre la totalidad de su cauce llegando, en algunos sectores, a desbordarse (Figura 44).



Figura 42: Río Huaura cerca del puente Huaura. Sistemas de captación de agua para la agricultura.



Figura 43: Desembocadura del río Huaura en el Océano Pacífico

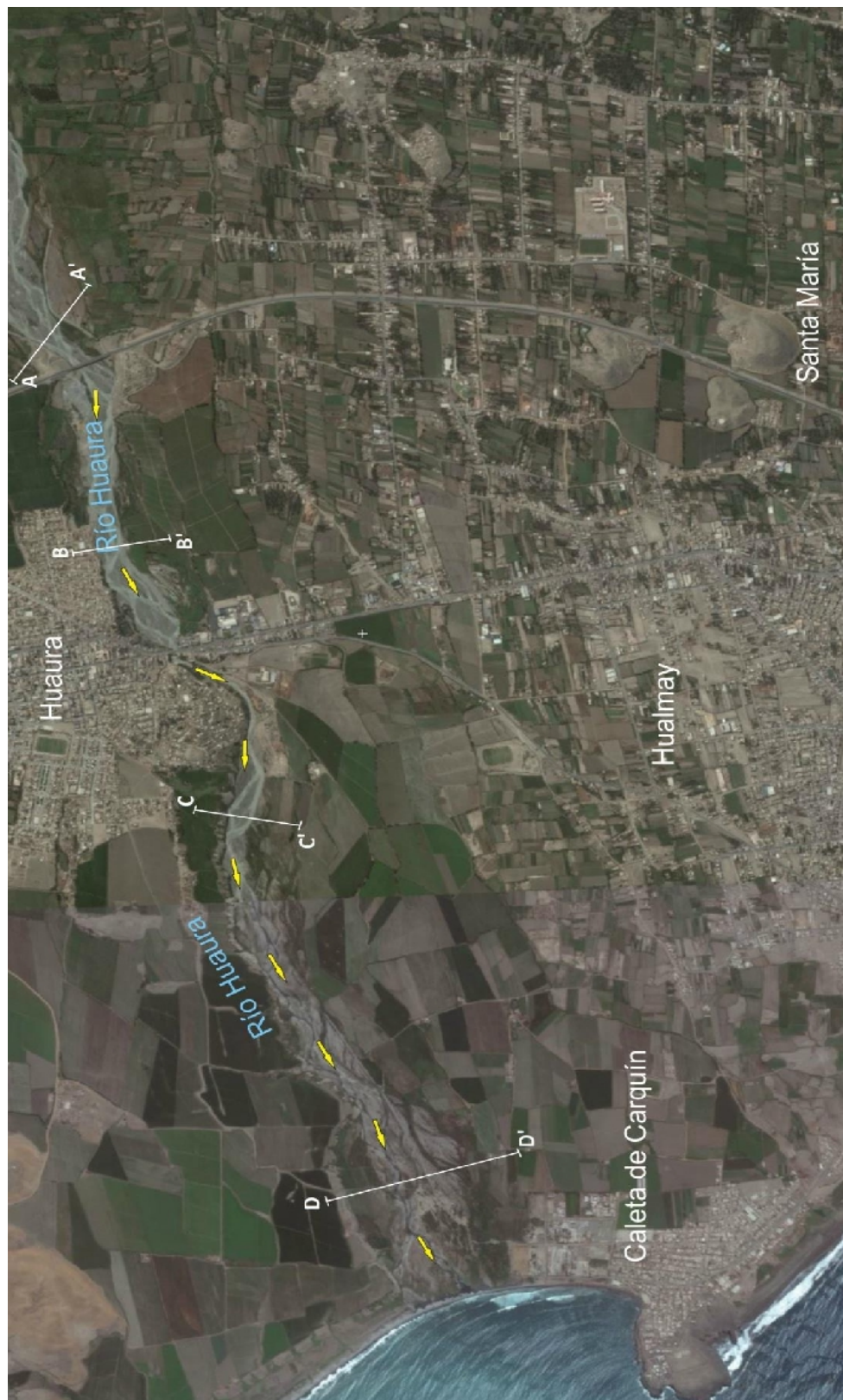


Figura 44: Vista en planta del río Huaura mostrando la geometría de su cauce y las zonas propuestas a inundación. Las flechas amarillas indican la dirección del flujo del agua. Las líneas en blanco indican la ubicación de los perfiles de la Figura 45.

Según la Figura 45, el desnivel topográfico existente entre la ribera derecha con respecto al margen izquierdo es notorio (> a 15 m en la sección C-C'), por lo que esta última es susceptible a inundaciones fluviales. Se acuerdo a la información de SENAMHI (2009), los caudales promedios llegan a ser mayores en los meses de marzo y abril, y menores en los meses entre julio y noviembre (Figura 46).

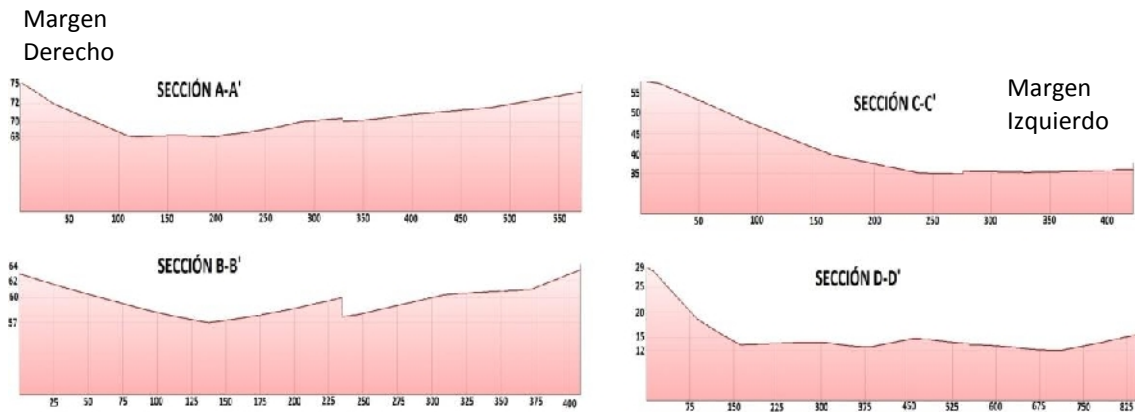


Figura 45: Secciones topográficas del cauce del río Huaura según la Figura 44. Observese el desnivel existente entre la margen derecha e izquierda del río.

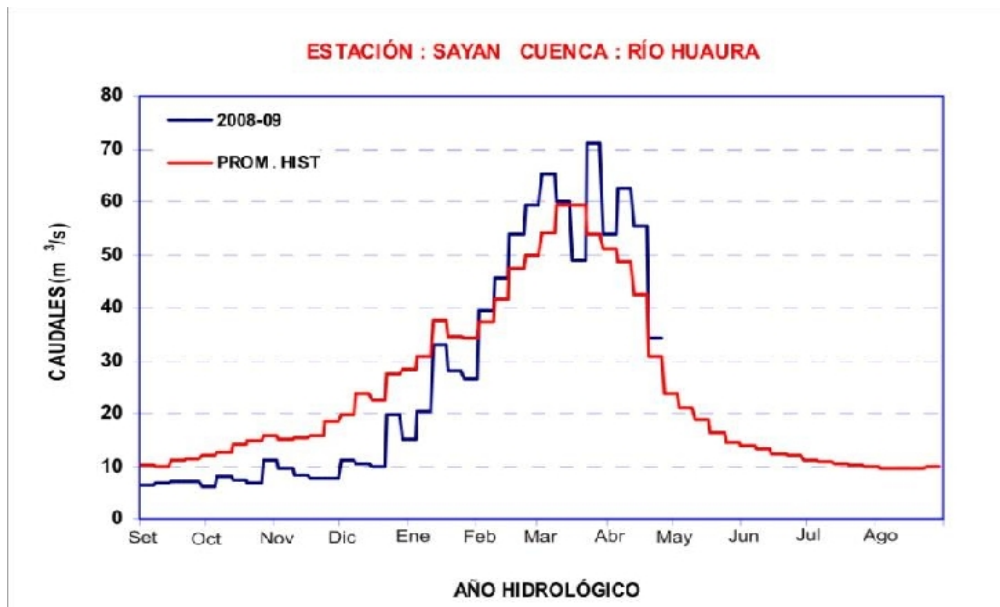


Figura 46: Variabilidad temporal de los caudales medios semanales del río Huaura con relación a sus correspondientes valores normales o promedio histórico (SENAMHI, 2009).

Históricamente, los caudales máximos anuales del río Huaura medido en la estación Sayan de Puente Alco entre los años 1912 y 2006, indican que el mayor caudal se presentó en el año 1984 con 158 m³/seg y el valor mínimo en el año 1979 con 26 m³/seg (Tabla 2).

Tabla 2: Caudales máximos anuales del río Huaura. El máximo valor se indica con un recuadro rojo. Sistema de información Hidrológica, INRENA (2006).

| AÑO | Q.MAX.MENS. | AÑO | Q.MAX.MENS. | AÑO | Q.MAX.MENS. |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 1912 | 39.40 | 1946 | 94.50 | 1980 | 41.30 |
| 1913 | 87.20 | 1947 | 87.00 | 1981 | 98.40 |
| 1914 | 121.40 | 1948 | 57.80 | 1982 | 60.90 |
| 1915 | 71.60 | 1949 | 65.60 | 1983 | 60.70 |
| 1916 | 72.90 | 1950 | 45.80 | 1984 | 158.90 |
| 1917 | 44.60 | 1951 | 96.80 | 1985 | 136.50 |
| 1918 | 86.80 | 1952 | 98.60 | 1986 | 131.60 |
| 1919 | 59.10 | 1953 | 71.50 | 1987 | 117.00 |
| 1920 | 70.70 | 1954 | 102.90 | 1988 | 82.50 |
| 1921 | 61.00 | 1955 | 94.40 | 1989 | 135.60 |
| 1922 | 58.50 | 1956 | 62.00 | 1990 | 40.50 |
| 1923 | 58.00 | 1957 | 46.10 | 1991 | 128.20 |
| 1924 | 57.50 | 1958 | 56.30 | 1992 | 25.30 |
| 1925 | 65.30 | 1959 | 59.30 | 1993 | 38.00 |
| 1926 | 61.30 | 1960 | 35.30 | 1994 | 66.50 |
| 1927 | 78.80 | 1961 | 43.40 | 1995 | 35.40 |
| 1928 | 83.90 | 1962 | 67.00 | 1996 | 55.90 |
| 1929 | 106.80 | 1963 | 69.30 | 1997 | 45.10 |
| 1930 | 84.90 | 1964 | 72.80 | 1998 | 97.48 |
| 1931 | 42.50 | 1965 | 65.50 | 1999 | 76.90 |
| 1932 | 76.70 | 1966 | 38.30 | 2000 | 87.60 |
| 1933 | 87.80 | 1967 | 89.90 | 2001 | 84.10 |
| 1934 | 63.10 | 1968 | 37.50 | 2002 | 64.74 |
| 1935 | 65.90 | 1969 | 32.40 | 2003 | 58.97 |
| 1936 | 49.80 | 1970 | 63.10 | 2004 | 32.38 |
| 1937 | 36.50 | 1971 | 54.20 | 2005 | 37.02 |
| 1938 | 55.00 | 1972 | 111.50 | 2006 | 64.60 |
| 1939 | 73.90 | 1973 | 99.20 | | |
| 1940 | 71.80 | 1974 | 86.30 | | |
| 1941 | 84.20 | 1975 | 87.00 | | |
| 1942 | 62.20 | 1976 | 78.30 | | |
| 1943 | 79.50 | 1977 | 49.80 | | |
| 1944 | 72.70 | 1978 | 98.80 | | |
| 1945 | 62.50 | 1979 | 26.00 | | |

- Zonas susceptibles a inundaciones: Por sus condiciones topográficas, el río Huaura presenta un escenario favorable para inundaciones, sobretodo en su margen izquierda (Figura 47). A fin de evaluar e identificar las zonas susceptibles inundación se ha construido, a lo largo del río, 10 secciones topográficas separadas cada 500 metros, desde su desembocadura hasta 2 km aguas arriba por encima del puente Huaura (ver Tabla 3 y Figura 48).



Figura 47: El polígono de color celeste indica el área susceptible a inundaciones por desborde del río Huaura. Las flechas en blanco indican la dirección natural del agua y las amarillas, la dirección preferente del desborde.

Tabla 3: Caudales medidos a lo largo del río Huaura en el mes de noviembre, 2013

| | ESTE | NORTE | COTA | V MIN | V MAX | PROMEDIO (m/s) | ALTURA cm | ÁREA (m ²) | CAUDAL (m ³ /s) |
|------|--------|---------|--------|-------|-------|----------------|-----------|------------------------|----------------------------|
| P-01 | 215445 | 8774216 | 25.871 | 1 | 1.8 | 1.4 | 70 | 22.79745 | 31.91643 |
| P-02 | 214880 | 8774233 | 27.871 | 1.6 | 1.7 | 1.4 | 70 | 35.6208 | 49.86912 |
| P-03 | 214432 | 8774044 | 25.871 | 0.6 | 1 | 0.8 | 60 | 48.58785 | 38.87028 |
| P-04 | 214091 | 8773895 | 17.871 | 0.5 | 1.6 | 1.1 | 53 | 20.7079 | 22.77869 |
| P-05 | 213543 | 8773648 | 14.871 | 1.1 | 1.7 | 1.4 | 25 | 37.99855 | 53.19797 |
| P-06 | 217311 | 8774777 | 61.871 | 0.2 | 0.9 | 0.6 | 50 | 61.5934 | 36.95604 |
| P-07 | 216949 | 8774782 | 53.871 | 0.5 | 1.3 | 1.1 | 40 | 57.2459 | 62.97049 |
| P-08 | 216559 | 8774727 | 52.871 | 0.3 | 1.3 | 0.6 | 50 | 46.22585 | 27.73551 |
| P-09 | 218352 | 8775086 | 75.871 | 0.4 | 1.3 | 0.9 | 55 | 151.3015 | 136.17135 |
| P-10 | 217855 | 8775024 | 71.871 | 0.3 | 1.6 | 1 | 53 | 132.28955 | 132.28955 |



Figura 48: Distribución espacial de las 10 secciones topográficas realizadas en el río Huaura

Los caudales del río Huaura fueron evaluados en el mes de noviembre, periodo en el cual se inicia la temporada de lluvias en la parte alta de la cuenca. De acuerdo a las dimensiones del área inundada en cada sección, se estimó caudales mínimos de $22.78 \text{ cm}^3/\text{seg}$ y máximos de $136 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Tabla 3).

Para realizar el modelamiento numérico del cauce del río Huaura y conocer las zonas de inundación, se ha utilizado el software HEC-RAS y un caudal mínimo de $59.26 \text{ cm}^3/\text{seg}$ y un máximo de $300 \text{ m}^3/\text{seg}$. En la Figura 49 se muestra los resultados obtenidos para la sección o perfil P04 ubicado a una distancia de 1300 metros aguas arriba de su desembocadura en el Océano Pacífico. Los resultados obtenidos para un caudal mínimo indican que el agua se mantiene dentro de su cauce normal de flujo de agua.

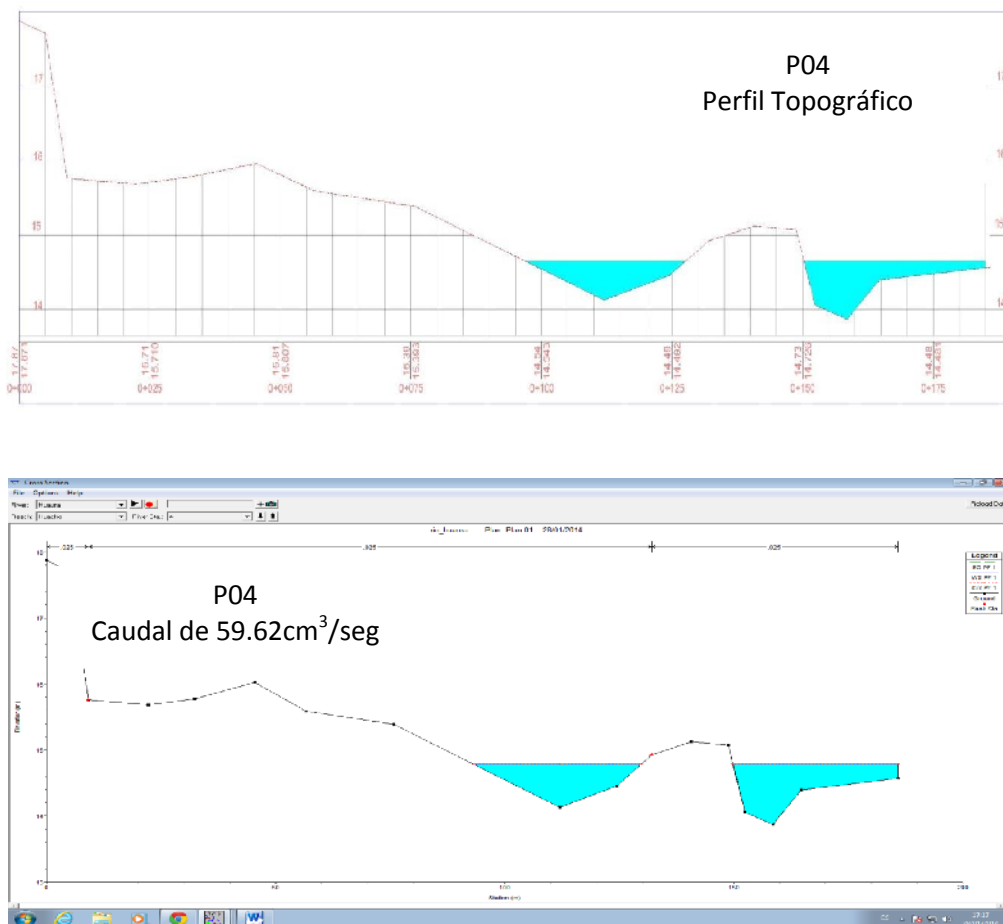


Figura 49: Perfil topográfico para la sección P04 (arriba) y modelado de inundación considerando un caudal mínimo de $59.26 \text{ cm}^3/\text{seg}$ (abajo).

Considerando el caudal máximo en la sección P04, el río Huaura se desborda completamente por su borde izquierdo, tal como se observa en la Figura 50.

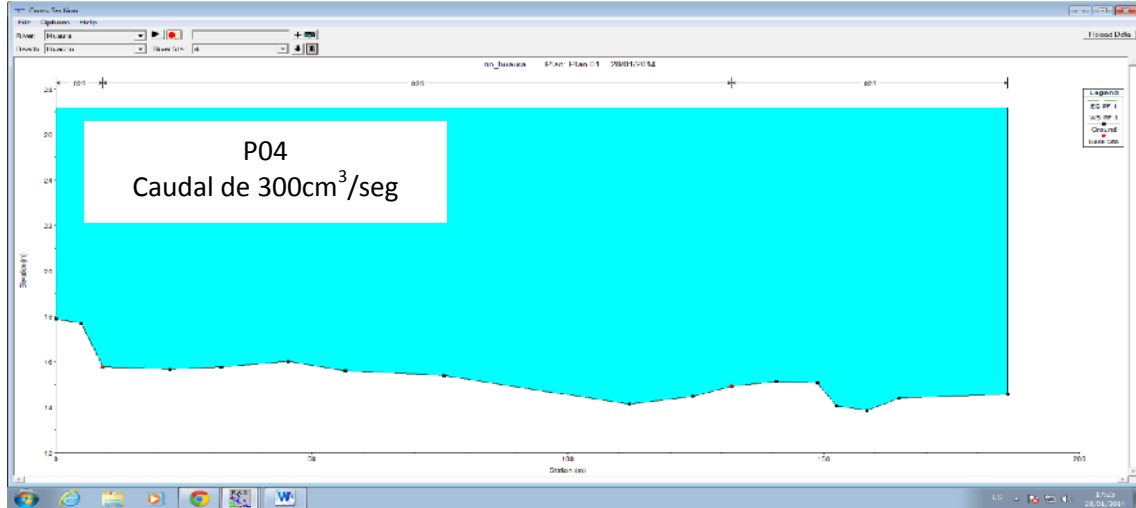


Figura 50: Modelado de inundación en el río Huaura considerando un caudal máximo de 300 m³/seg.

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 Huacho se construyeron 15 calicatas (Tabla 4 y Figura 51), siendo la profundidad máxima de observación de 3 metros y la mínima de 1.1 metros en el A.H. Costa Azul. A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 16 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Figura 51 y Tabla 5), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 3.75 metros y la mínima de 0.5 metros. Para ambos casos, el análisis en laboratorio permitió clasificar a los suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El total de la información geotécnica se presenta en el Anexo 2.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

| CALICATA | NORTE | ESTE | COTA | PROFUNDIDAD (m) | SUCS |
|----------|---------|--------|------|-----------------|-----------------|
| CH-01 | 8772517 | 213134 | 10 | 2.6 | GW |
| CH-02 | 8771517 | 214314 | 30 | 2.65 | GM con arena |
| CH-03 | 8772487 | 216063 | 77 | 2.6 | GP-GM con arena |
| CH-04 | 8772173 | 217878 | 87 | 3 | SM |
| CH-05 | 8771268 | 214954 | 21 | 2.7 | GM con arena |
| CH-06 | 8771315 | 215900 | 62 | 2.7 | GM con arena |
| CH-07 | 8771272 | 219149 | 94 | 2.9 | ML arenoso |
| CH-08 | 8770178 | 214850 | 25 | 3 | SM |
| CH-09 | 8770460 | 215910 | 55 | 2.7 | GM con arena |
| CH-10 | 8770502 | 217120 | 69 | 3 | SM |
| CH-11 | 8769720 | 215321 | 55 | 2.85 | ML con arena |
| CH-12 | 8769076 | 215911 | 55 | 2.2 | SP con grava |
| CH-13 | 8769685 | 217102 | 82 | 2.7 | SP |
| CH-14 | 8768676 | 214344 | 38 | 2.8 | SM |
| CH-15 | 8768090 | 215917 | 104 | 1.1 | SM |

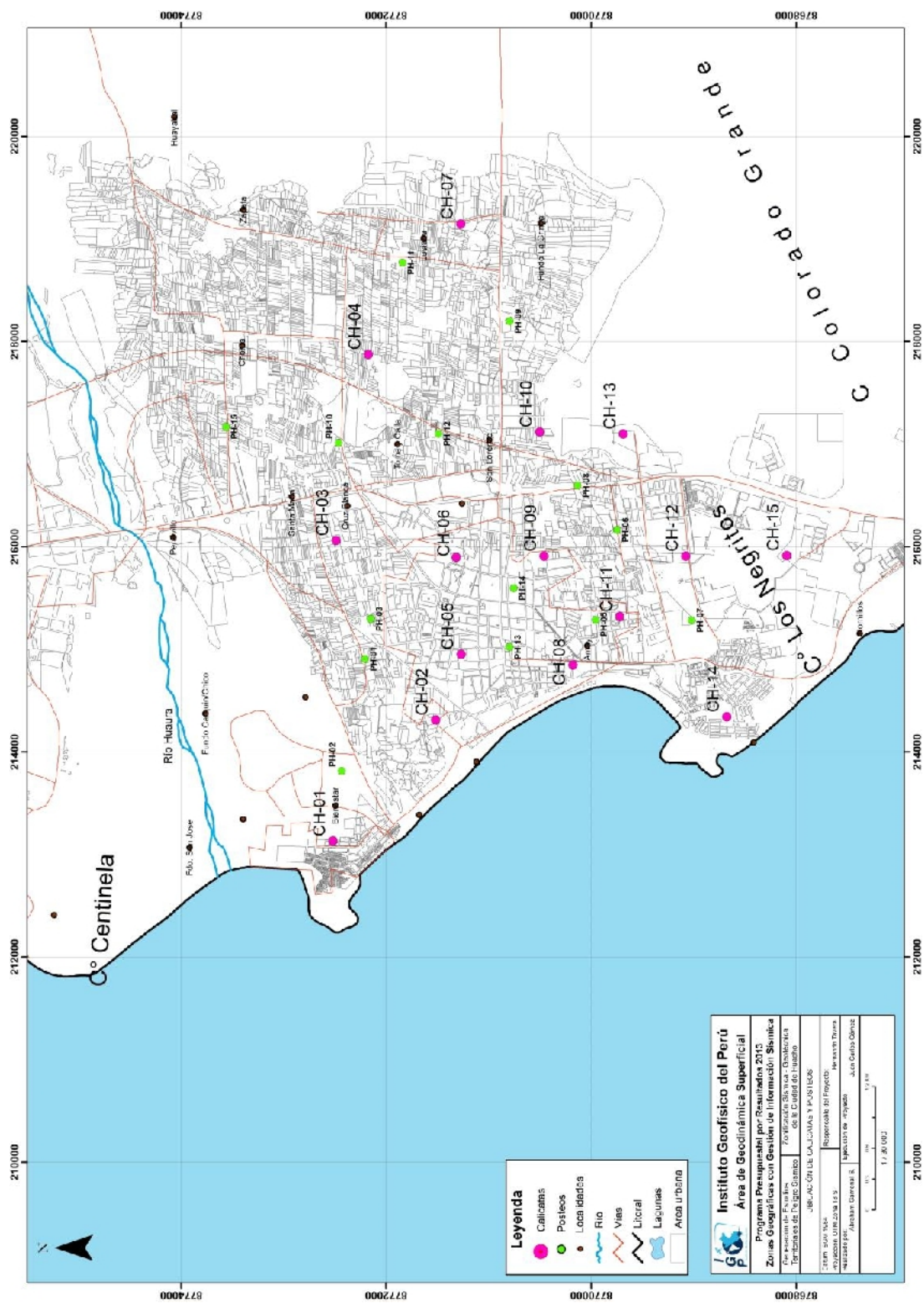


Figura 51: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Huacho

Tabla 5: Coordenadas UTM para la identificación de los puntos de posteo

| POSTEADORA | NORTE | ESTE | COTA | PROFUNDIDAD (m) |
|------------|---------|--------|------|-----------------|
| PH-01 | 8772207 | 214909 | 46 | 2 |
| PH-02 | 8772434 | 213817 | 31 | 1.45 |
| PH-03 | 8772149 | 215299 | 55 | 2.4 |
| PH-04 | 9770848 | 214602 | 37 | 1.9 |
| PH-05 | 8769959 | 215289 | 37 | 2.2 |
| PH-06 | 8769748 | 216165 | 48 | 3.35 |
| PH-07 | 8769020 | 215286 | 43 | 2.4 |
| PH-08 | 8770135 | 216601 | 58 | 3 |
| PH-09 | 8770796 | 218202 | 86 | 3.75 |
| PH-10 | 8772464 | 217016 | 70 | 1.3 |
| PH-11 | 8771841 | 218772 | 80 | 2.2 |
| PH-12 | 8771490 | 217103 | 75 | 3.1 |
| PH-13 | 8770799 | 215025 | 47 | 2.5 |
| PH-14 | 8770756 | 215598 | 51 | 2 |
| PH-15 | 8773564 | 217171 | 92 | 0.5 |

10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y la publicada para 34 calicatas en el informe “Mapa de Peligros de la Ciudad de Huacho” (INDECI, 2006), se ha identificado, según la clasificación SUCS, la existencia de 5 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Tabla 6, Figura 52):

***.- Suelos tipo SP:** Compuestos por arenas mal gradadas de grano medio a fino, todos presentes a lo largo del litoral del área de estudio, desde el distrito de Carquín al norte, hasta Punta Viuda al sur. En el sector del A.H Fujimori (al este de la ciudad de Huacho), el suelo presenta escaso contenido de limos; sin embargo, en el sector del A.H Agua Dulce (al sureste de la ciudad de Huacho), el suelo contiene gravas con clastos pequeños.*

***.- Suelos tipo GW:** Corresponden a gravas bien gradadas, con clastos medianos y presencia de bloques, además de arenas de grano grueso. Estos suelos se encuentran en el extremo norte del área de estudio, en la margen izquierda del río Huaura.*

Tabla 6x: Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Huacho

| Calicata | Profundidad (m) | Uniformidad | Curvatura | Límite Plástico (%) | Límite Líquido (%) | Contenido de Humedad | Grava (>4.76mm) | Arena (>0.74mm <4.76mm) | Finos (<0.074) | SUCS | Denominación |
|----------|-----------------|-------------|-----------|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------|--|
| CH-01 | 2.6 | 13.2 | 2.22 | NT | NT | 8.18 | 85 | 13 | 2 | GW | Grava bien gradada |
| CH-02 | 2.65 | | | NT | NT | 1.38 | 62 | 24 | 13 | GM con arena | Grava bien gradada con arena |
| CH-03 | 2.6 | 300.85 | 8.97 | NT | NT | 0.75 | 67 | 22 | 11 | GP-GM con arena | Grava mal gradada - grava bien gradada con arena |
| CH-04 | 3 | | | NT | NT | 8.23 | 0 | 82 | 18 | SM | Arena limosa |
| CH-05 | 2.7 | | | NT | NT | 6.98 | 64 | 21 | 15 | GM con arena | Grava limosa con arena |
| CH-06 | 2.7 | | | NT | NT | 1.06 | 58 | 29 | 14 | GM con arena | Grava limosa con arena |
| CH-07 | 2.9 | | | NT | NT | 19.62 | 0 | 37 | 63 | ML arenoso | Limo arenoso |
| CH-08 | 3 | | | NT | NT | 8.13 | 0 | 47 | 43 | SM | Arena limosa |
| CH-09 | 2.7 | | | NT | NT | 1.16 | 48 | 36 | 16 | GM con arena | Grava limosa con arena |
| CH-10 | 3 | | | NT | NT | 37.73 | 0 | 50 | 50 | SM | Arena limosa |
| CH-11 | 2.85 | | | NT | NT | 20.27 | 11 | 11 | 77 | ML con arena | Limo con arena |
| CH-12 | 2.2 | | | NT | NT | 2.22 | 26 | 73 | 1 | SP con grava | Arena mal gradada con grava |
| CH-13 | 2.7 | 1.37 | 0.96 | NT | NT | 0.7 | 0 | 99 | 1 | SP | Arena mal gradada |
| CH-14 | 2.8 | | | NT | NT | 6.72 | 1 | 78 | 21 | SM | Arena limosa |
| CH-15 | 1.1 | | | NT | NT | 1.24 | 0 | 55 | 45 | SM | Arena limosa |

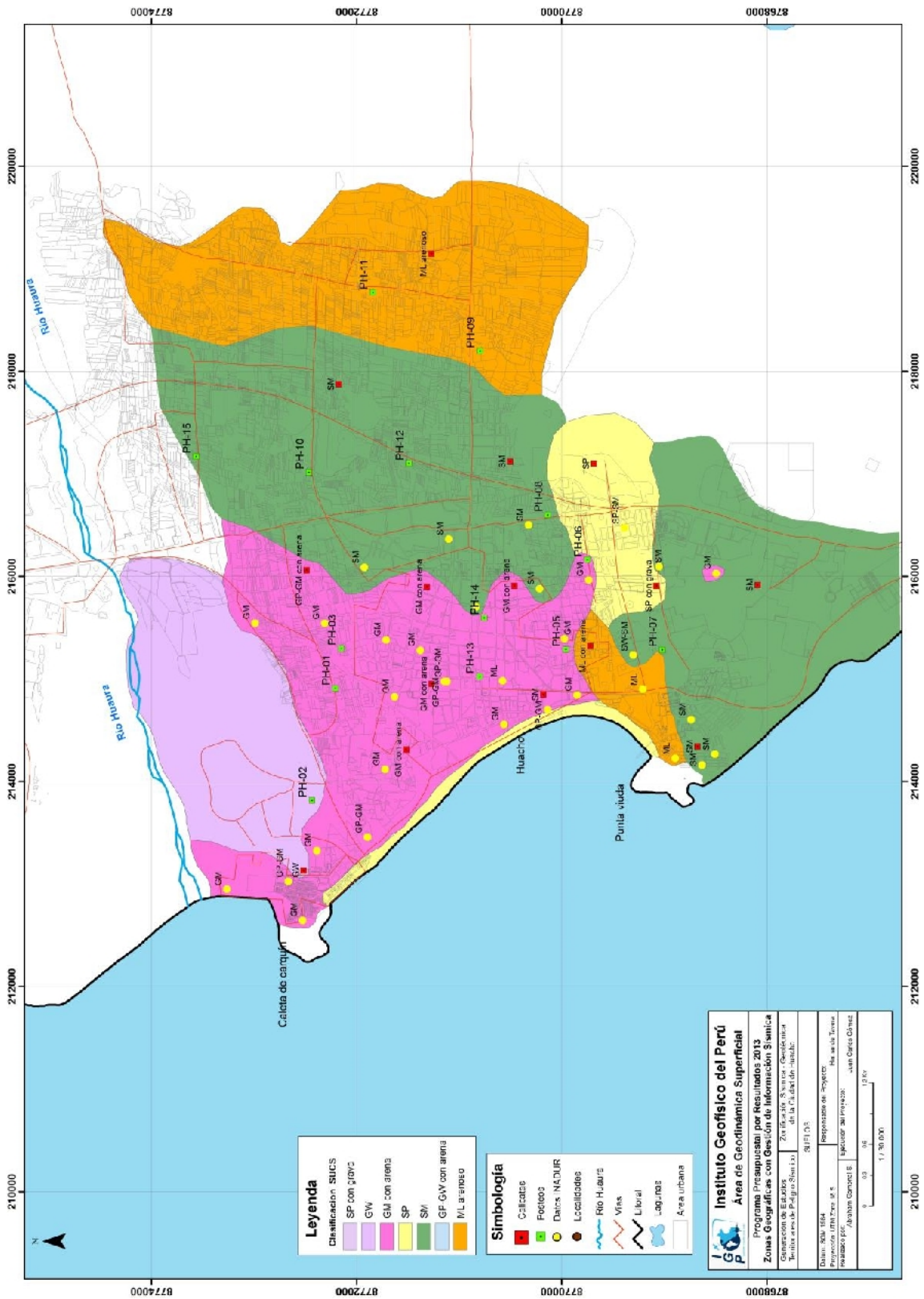


Figura 52: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Huacho

.- Suelos tipo GM: Corresponden a suelos gravosos, desde mal gradados a bien gradados con contenido limos. Sobre estos suelos se asienta la zona urbana de la ciudad de Huacho. Dentro de este grupo se incluyen a los suelos gravo-limosos con arena (GM con arena).

.- Suelos tipo SM: Corresponden a suelos areno-limosos, de grano medio a fino, los cuales se encuentran al Sur en los AA.HH Manzanares y Atalaya. Estos suelos también están presentes al Este de la ciudad, distrito de Santa María

.- Suelos tipo ML: Corresponden a suelos limosos y a los suelos limosos con contenido de arena fina (ML arenoso). Estos suelos se encuentran en dirección Este, con respecto a la zona de estudio, en el distrito de Santa María y al Sur en la Universidad Nacional Faustino Sánchez Carrión (UNFSC).

10.2.- Capacidad Portante

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad portante. Este parámetro ha sido determinado para los suelos de la ciudad de Huacho a partir de ensayos de corte directo al material muestreado en las 15 calicatas elaboradas en la ciudad. Los valores obtenidos en laboratorio corresponden a una profundidad y ancho mínimo de cimentación de 1.20 metros (Tabla 7). Los resultados obtenidos para la ciudad de Huacho han permitido clasificar a los suelos en tres rangos que definen su capacidad portante en baja, media y alta, con las siguientes características:

.- Capacidad portante baja (1-2 kg/m²): Dentro de esta clasificación se encuentran los suelos de gran parte del área de estudio, abarca los sectores ubicados al Oeste (litoral), Este (distrito de Santa María) y Sur (cerros Negritos y Colorado Grande). Los suelos corresponden a arenas eólicas, marinas y limos.

.- Capacidad portante media (2-3 kg/m²): En esta clasificación se considera los suelos que se encuentran en el sector Norte de la ciudad de Huacho (Carquín y Hualmay), aunque también están presentes en los suelos al Sur de la ciudad

(A.H Manzanares). Corresponde a suelos gravosos y arenosos, con presencia de limos. Los valores de capacidad portante varían desde 2.12 kg/m² hasta 2.32 kg/m².

Tabla 7: Valores de capacidad portante para las calicatas elaboradas en la ciudad de Huacho

| Calicata | Ángulo de fricción interna del suelo (°) | Cohesión aparente del suelo (Kg/cm2) | Capacidad de carga admisible (kg/cm2) |
|----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| CH-01 | 29.87 | 0 | 2.23 |
| CH-02 | 30.32 | 0 | 2.32 |
| CH-03 | 29.95 | 0 | 2.21 |
| CH-04 | 30 | 0 | 1.9 |
| CH-05 | 32.43 | 0 | 3.12 |
| CH-06 | 30.05 | 0 | 2.26 |
| CH-07 | 29 | 0 | 1.42 |
| CH-08 | 29.75 | 0.1 | 1.88 |
| CH-09 | 32.74 | 0 | 3.24 |
| CH-10 | 29.74 | 0 | 1.84 |
| CH-11 | 29.05 | 0 | 1.69 |
| CH-12 | 30.2 | 0 | 1.96 |
| CH-13 | 29.7 | 0 | 1.89 |
| CH-14 | 30.6 | 0 | 2.12 |
| CH-15 | 29.4 | 0 | 1.82 |

- Capacidad portante alta (>3 kg/m²): Estos suelos se encuentran en el sector medio del área de estudio; es decir, en todo el casco urbano de la ciudad de Huacho. Los valores de capacidad portante varían de 3.12 kg/m² a 3.24 kg/m², y corresponden a suelos gravosos empaquetados con limos y arenas de grano grueso.

La distribución espacial de los valores de capacidad portante obtenidos del análisis de calicatas y posteadoras, han permitido elaborar el mapa de capacidad portante de la Figura 53.

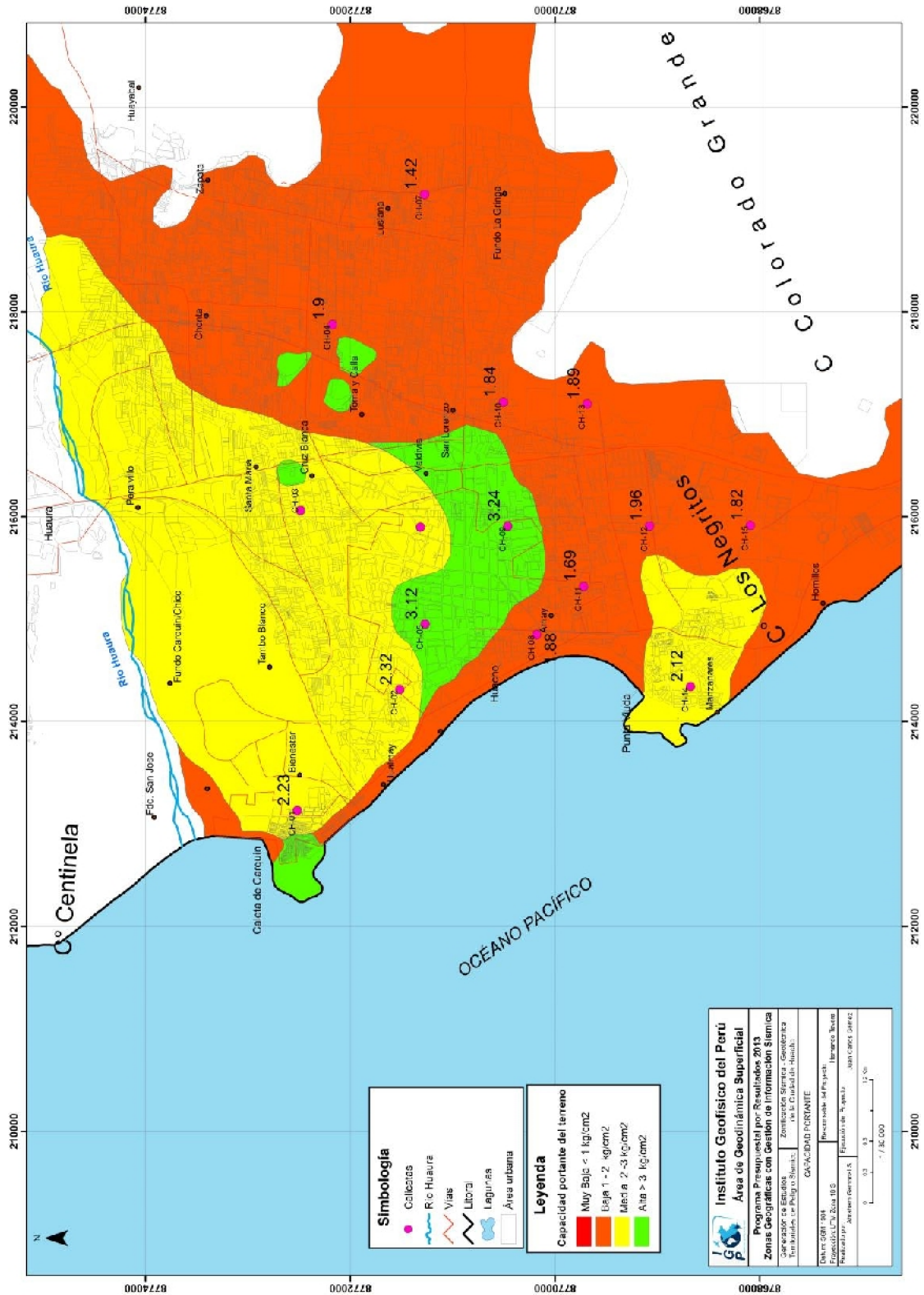


Figura 53: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Huacho

10.3.- Nivel Freático Superficial

En la ciudad de Huacho se ha evidenciado que en algunas zonas costeras, desde la playa Carquín hasta la playa Huacho, el nivel freático superficial aflora a la superficie; por lo tanto, estas zonas son inadecuadas para la proyección de infraestructura, Figura 54.



Figura 54: Terrenos saturados con agua que aflora a la superficie en la zona costera de la ciudad de Huacho

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, niveles freáticos, 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 Huacho en cada caso.

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 Huacho, 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. En la Figura 55 se muestra la distribución espacial de los 370 puntos de registro de vibración ambiental, cada uno con una duración de 20 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

El análisis de la información recolectada en los diferentes puntos de registro, permite obtener espectros de Fourier para sus tres componentes y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del subsuelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa. En la Figura 56 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto HCH-086. En su extremo superior se muestra el registro de vibración ambiental (15 minutos) analizado con ventanas de 20 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias de 1.3 Hz, 5.8 Hz y 18.6 Hz con amplificaciones relativas de 4 veces respectivamente. 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 1.3 Hz la energía se irradia en todas las direcciones, la frecuencia de 5.8 Hz se irradia principalmente en dirección NS y la frecuencia de 18.6 Hz en dirección EO. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

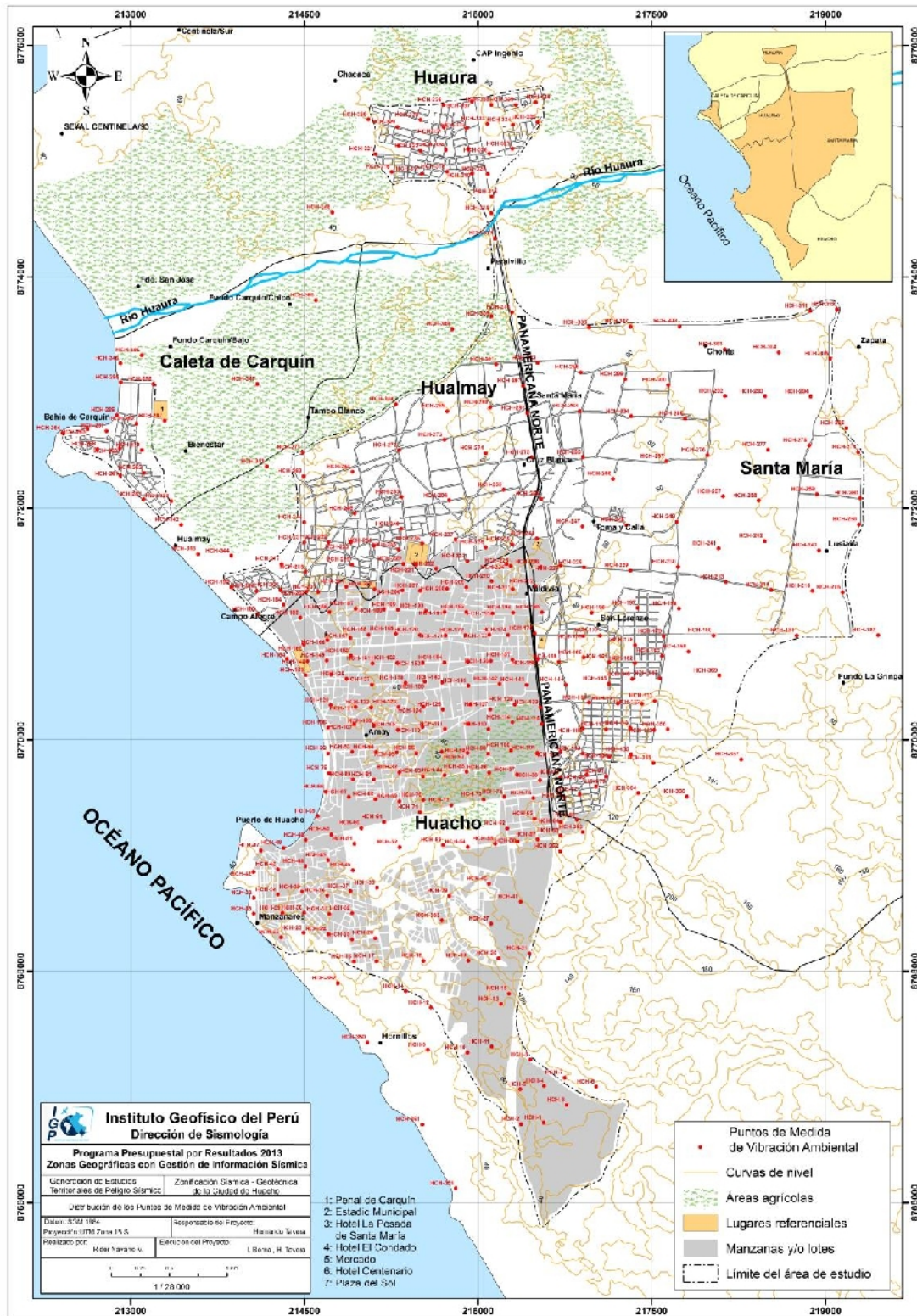


Figura 55: Mapa de la ciudad de Huacho y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

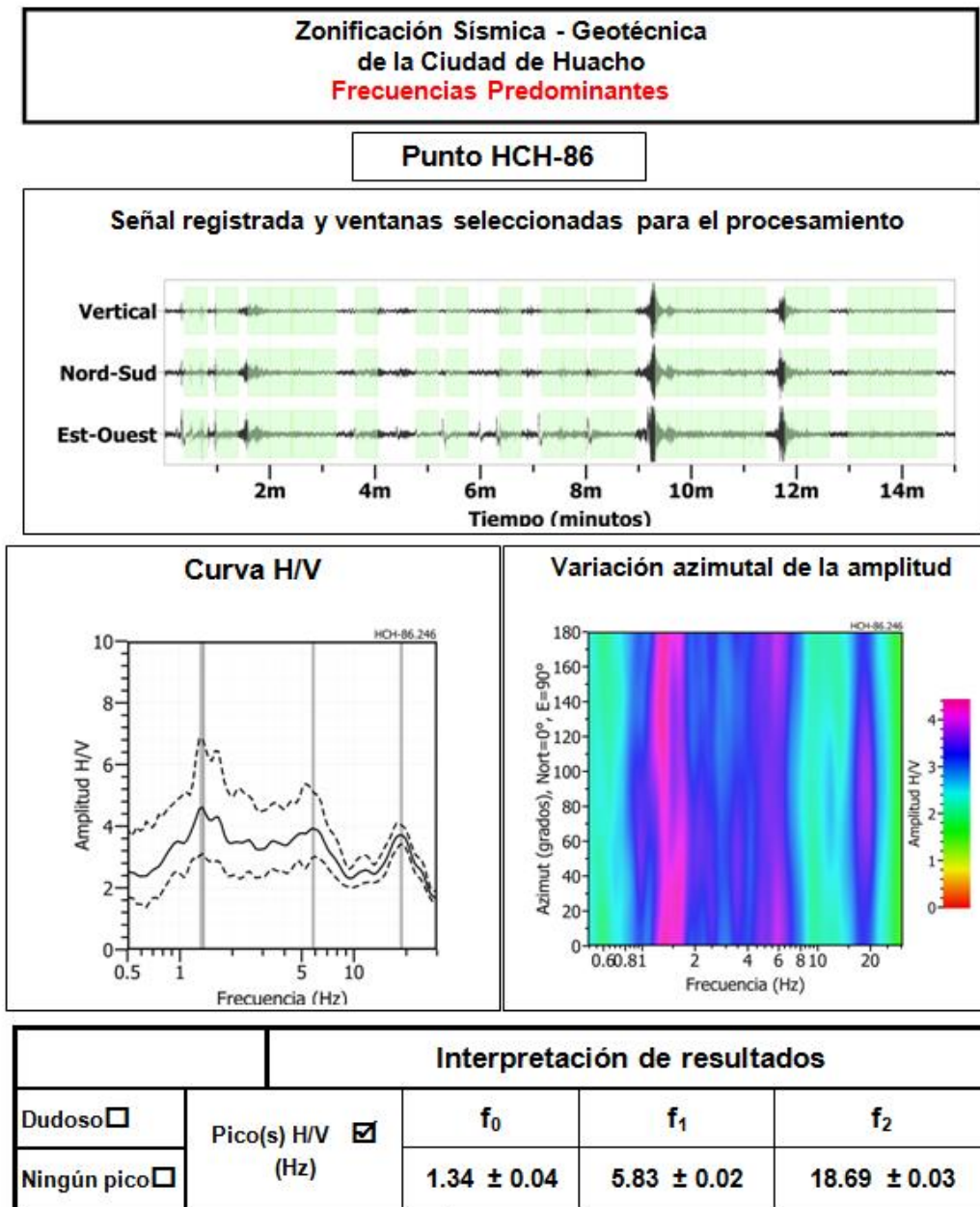


Figura 56: Ejemplo de la ficha H/V para el punto HCH-086 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

- 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, observando que valores similares 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).

Para el mejor análisis de la información obtenida de las razones espectrales H/V, se procedió a construir mapas de frecuencias predominantes considerando dos rangos: **F₀** ($F_p < 3.0\text{Hz}$) y **F₁** ($3.0 > F_p < 20\text{Hz}$). Esta clasificación se realiza en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con amplificaciones similares, lo cual sugiere que el suelo es complejo. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Huacho.

***- Frecuencias predominantes F₀:** En la Figura 57, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes **F₀** ($F_p < 3.0\text{Hz}$); todas de manera casi uniforme sobre todo el área de estudio a excepción del área en recuadro, en la cual las curvas H/V no muestran frecuencias predominantes (HCH-165; HCH-169 y HCH-186).*

En la misma figura se resalta los puntos para los cuales se presenta ejemplos de H/V (Figura 58) y en las cuales, se observa la migración de frecuencias entre 1.0 a 3.0 Hz. Estas frecuencias muestran amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces en algunos casos.

Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-92, HCH-96 y HCH-231, ubicados los dos primeros, en dirección sur con respecto a la zona céntrica de la ciudad de Huacho y el último hacia el norte, muestran el predominio de frecuencias en el rango de 1.0 – 2.0Hz, con amplificaciones máximas relativas de hasta 3 veces. También es notoria la presencia de picos a mayores frecuencias que sugieren la presencia de capas de suelo con espesores no representativos para los objetivos del presente estudio.

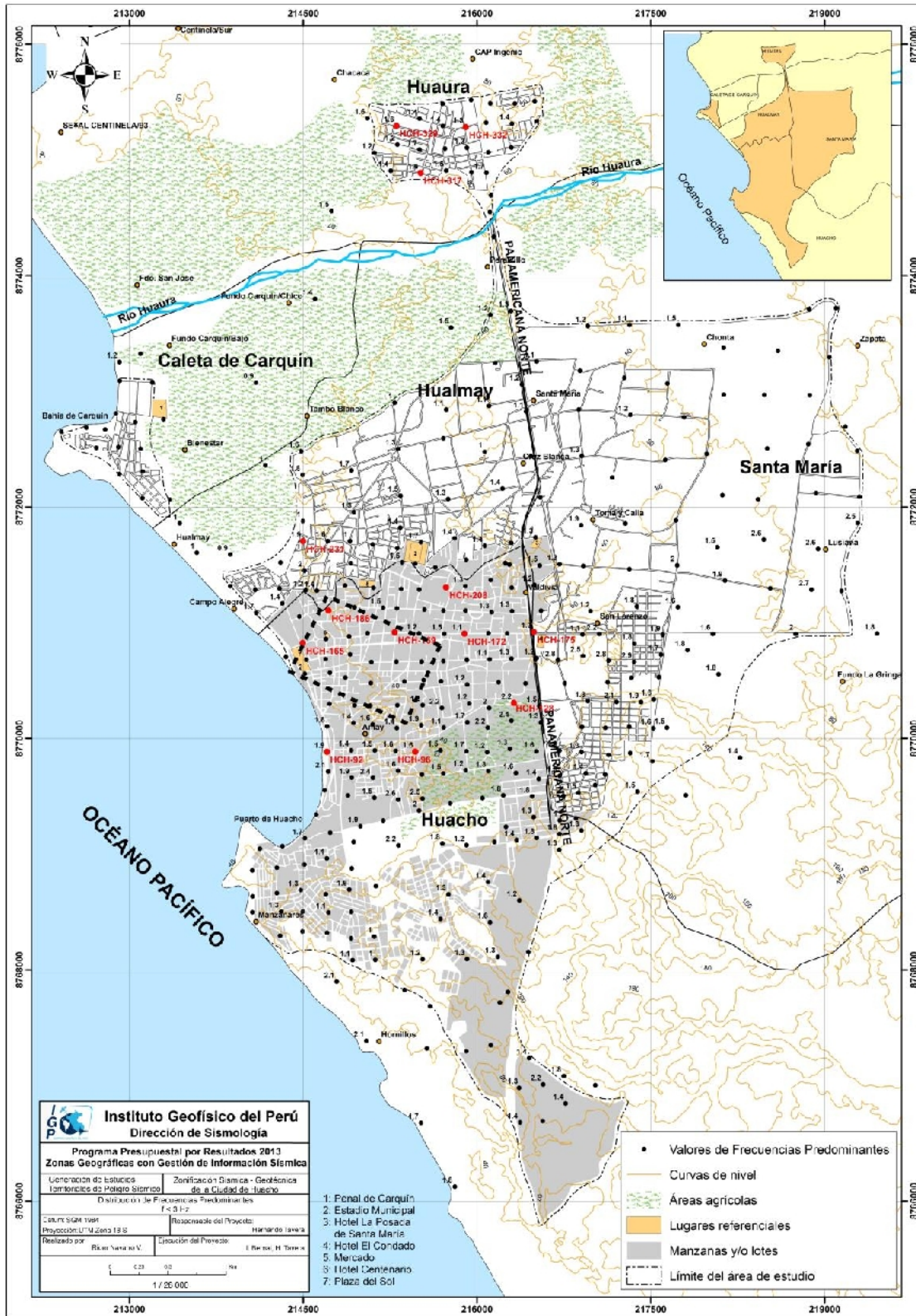
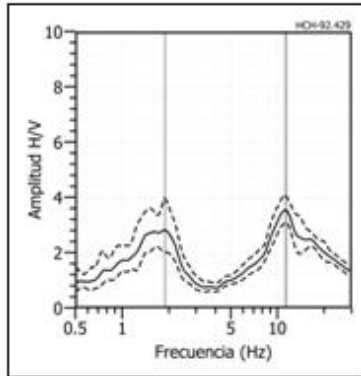
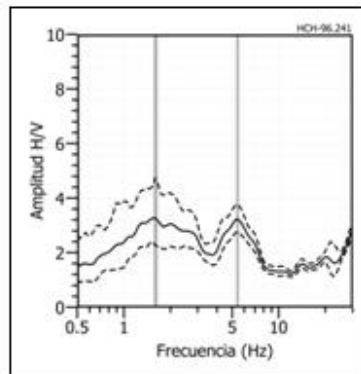


Figura 57: Mapa de la ciudad de Huacho y distribución espacial de las frecuencias predominantes $F_p < 3.0$ Hz. Los puntos rojos corresponden a ejemplos de H/V de la Figura 58

HCH-92



HCH-96



HCH-231

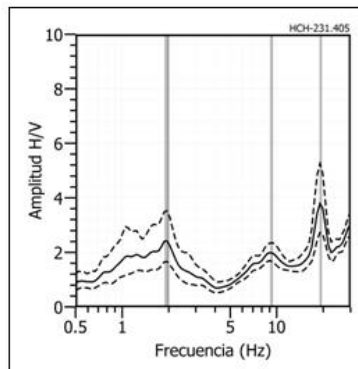


Figura 58: Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el extremo sur (HCH-92, HCH-96) y norte (HCH-231) de la ciudad de Huacho. El rango de frecuencias predominantes es $F_p < 3.0$ Hz. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

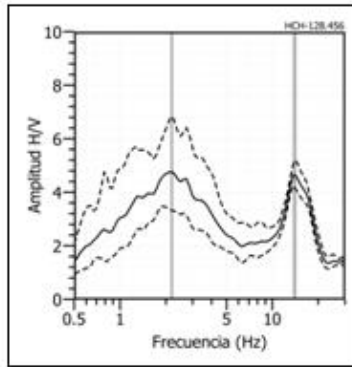
*En las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-128, HCH-175 y HCH-208, todos ubicados en dirección Este, con respecto al centro de la ciudad de Huacho, sobresalen frecuencias en el rango de 1.0 – 2.0Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces, siendo el punto HCH-128 el que presenta mayor amplificación. En general, las curvas H/V muestran la presencia de dos picos de frecuencias en el rango **F₀** y **F₁**, con la misma amplificación máxima relativa. Esta característica ha sido observada en diversos puntos ubicados en esta zona de estudio.*

*Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-317, HCH-329 y HCH-332, todos ubicados en el extremo norte de la ciudad de Huacho y agrupados en una área pequeña, presenta frecuencias predominantes entre 1.0 y 2.0 Hz, y amplificaciones máximas relativas de 6, 2 y 4.5 veces respectivamente. La H/V para el punto HCH-317, muestra el predominio absoluto de **F₀**; sin embargo, la forma de la curva H/V sugiere tendencias a valores mayores.*

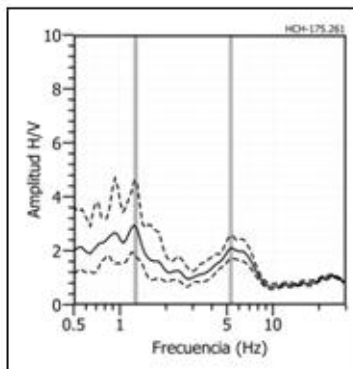
Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-165, HCH-186 y HCH-169 evidencian que para dichas zonas los suelos son compactos en razón que no presentan frecuencias predominantes.

Estos resultados evidencian que en el área de estudio el comportamiento dinámico del suelo está representado por la presencia de dos picos de frecuencias predominantes definidos como F₀ y F₁, presentando ambas amplificaciones relativas de hasta 5 veces.

HCH-128



HCH-175



HCH-208

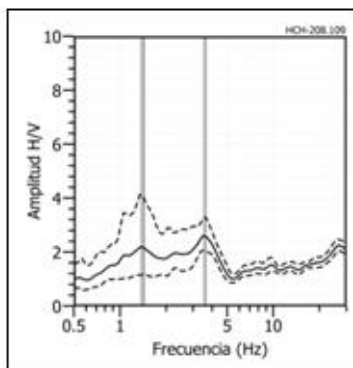
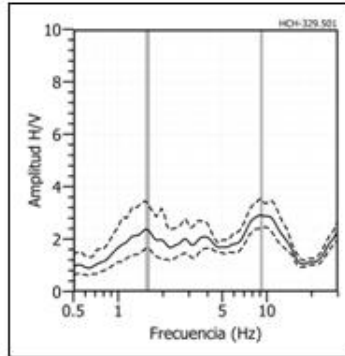
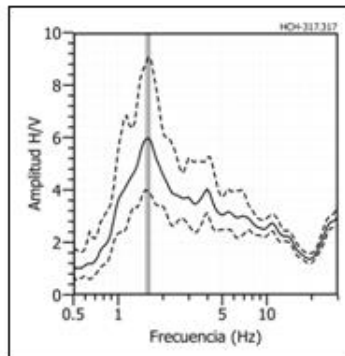


Figura 58: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el extremo Este de la zona céntrica de la ciudad de Huacho. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

HCH-329



HCH-317



HCH-332

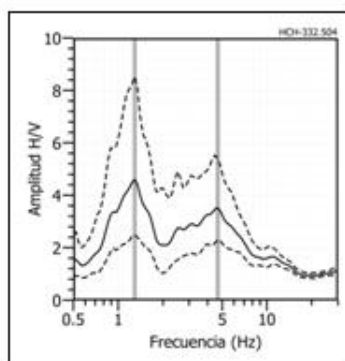
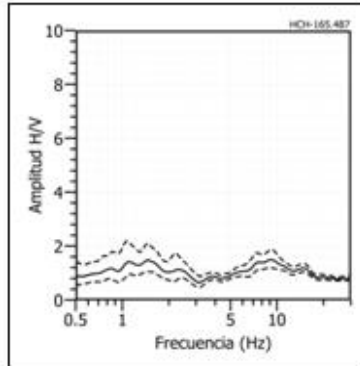
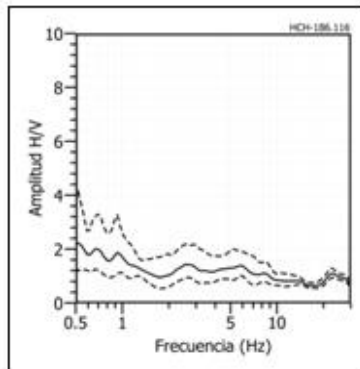


Figura 58: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en Huaura. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

HCH-165



HCH-186



HCH-169

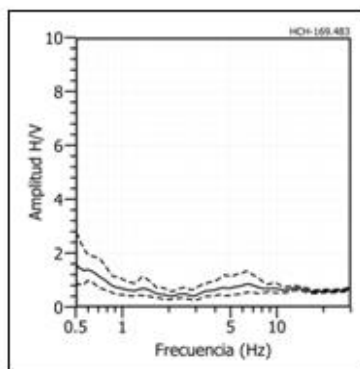


Figura 58: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en dirección este con respecto a la plaza de Armas de la ciudad de Huacho. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

.- Frecuencias predominantes F1: En la Figura 59 se muestra la distribución espacial de los valores de H/V correspondiente a frecuencias predominantes **F1** ($3.0 > F_p < 20 \text{ Hz}$), las mismas que se distribuyen de manera uniforme sobre el área de estudio, menos en el área comprendida entre la Av. Ramiro Priale y la Av. San Martín (área en recuadro en la Figura 59). Esta área es común para ambos rangos de frecuencias dominantes. Algunos ejemplos de H/V tomados de manera aleatoria son presentados a continuación (Figura 60).

Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-166, HCH-187 y HCH-189 evidencian que para dichas zonas los suelos son compactos en razón que no presentan frecuencias predominantes.

En las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-202, HCH-255 y HCH-271, ubicados en el extremo norte de la zona céntrica de la ciudad de Huacho, sobresalen principalmente frecuencias que fluctúan entre 6 y 8 Hz, con amplificaciones máximas relativas de 2 a 5 veces.

Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-69, HCH-125 y HCH-179 corresponden al extremo sur de la zona céntrica de la ciudad de Huacho. En HCH-69 sobresale la frecuencia de 2.8 Hz (amplificación de 4 veces), en HCH-125 la frecuencia de 2.2 Hz (amplificación de 4.5 veces) y 5 Hz (amplificación de 2.5 veces); finalmente, en HCH-179 sobresalen las frecuencias de 2 Hz y 4.8 Hz con amplificaciones de 3 veces en ambos casos.

En las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-48, HCH-106 y HCH-134, ubicados en la zona central de la ciudad de Huacho, próximos a la línea de costa, sobresalen frecuencias entre 5 y 10 Hz. En el punto HCH-048, ubicado al sur de área de estudio (zona del Muelle de Huacho), sobresale la frecuencia de 6.2 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 4.5 veces, y en los puntos HCH-106 y HCH-134, ubicados al sur de la Plaza Grau y al Norte de Plaza Reyes Butrón, sobresalen frecuencias entre 8 y 9 Hz con amplificaciones relativas de hasta 3 veces. En esta zona se observa el predominio de frecuencias con valores altos.

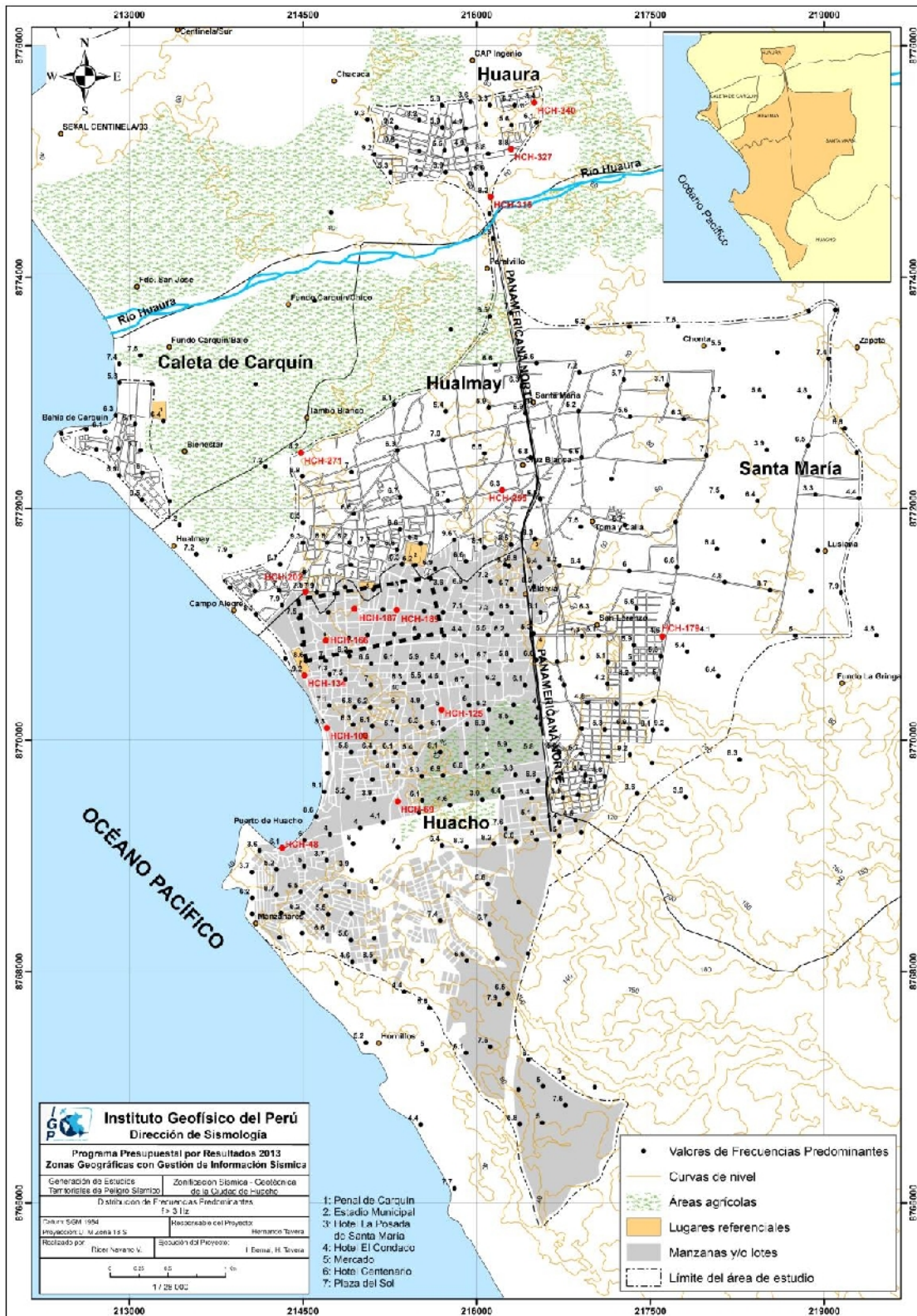
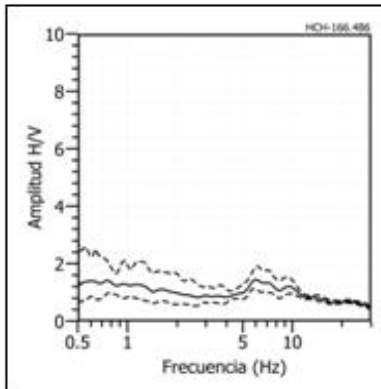
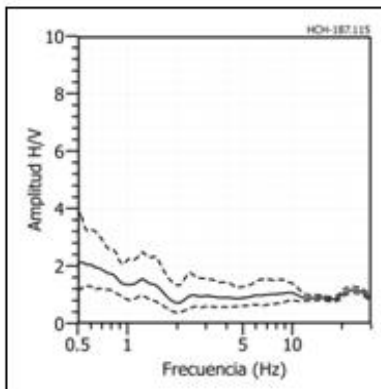


Figura 59: Mapa del área de estudio y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_1 ($3.0 > F_p < 20.0 \text{ Hz}$). Los puntos sin valor, indican ausencia de frecuencias predominantes en este rango.

HCH-166



HCH-187



HCH-189

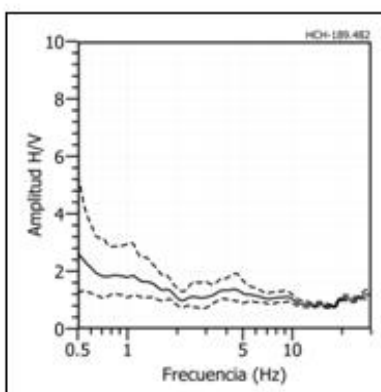
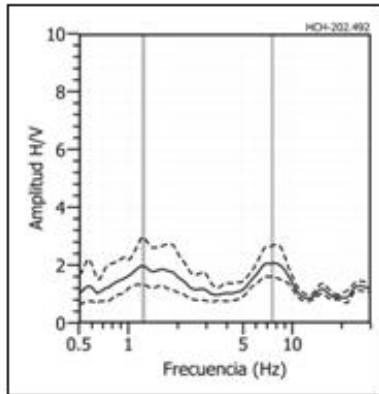
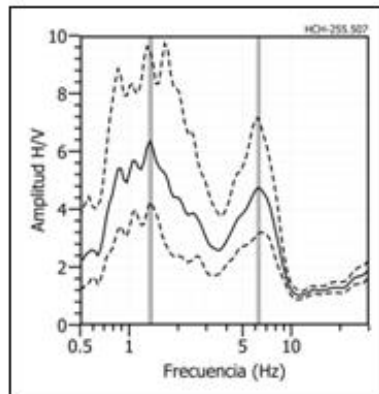


Figura 60: Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para puntos ubicados en el extremo Este de la plaza de Armas de la ciudad de Huacho. Obsérvese que en estos puntos no sobresale ninguna frecuencia predominante. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia que sobresale en este rango.

HCH-202



HCH-255



HCH-271

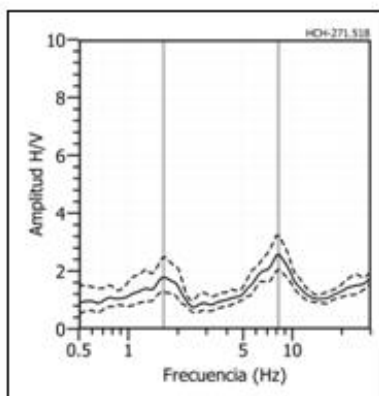
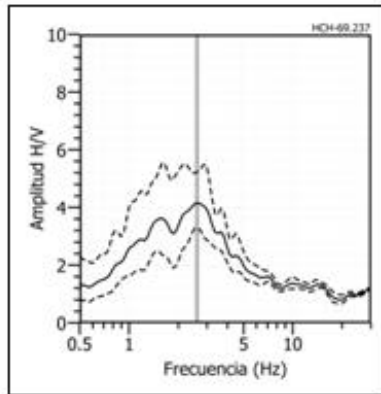
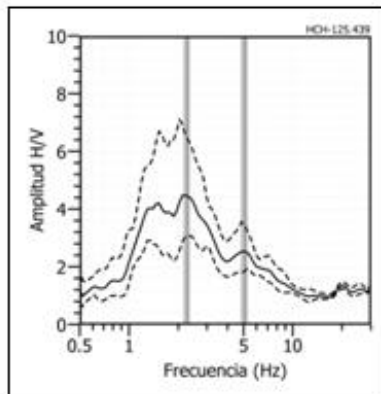


Figura 60: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes $F1$ ($3.0 > Fp < 20\text{Hz}$) obtenidas para los puntos ubicados hacia el extremo Norte de la ciudad de Huacho.

HCH-69



HCH-125



HCH-179

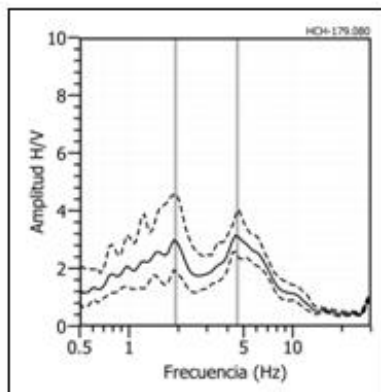
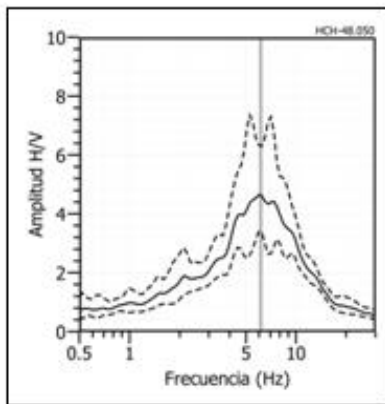
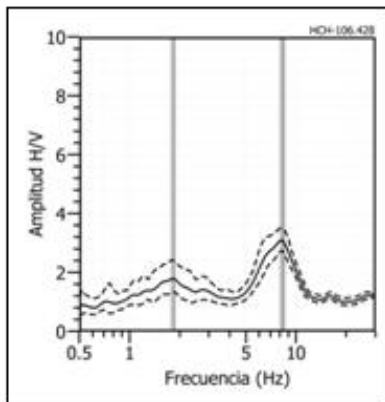


Figura 60: ...Continuación/ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes F_1 ($3.0 > F_p < 20\text{Hz}$) obtenidas para los puntos ubicados en el extremo Sur de la ciudad de Huacho.

HCH-48



HCH-106



HCH-134

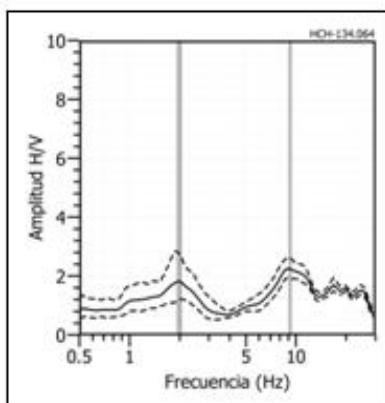
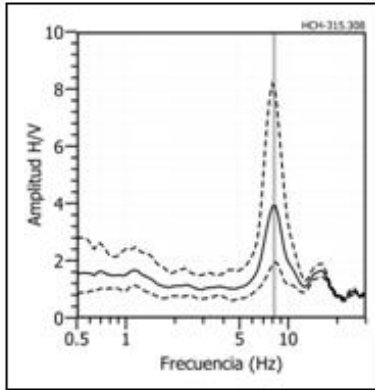
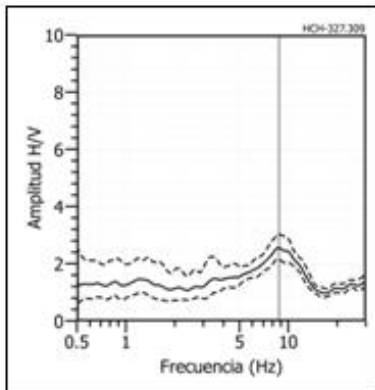


Figura 60: ...Continuación/ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes $F1$ ($3.0 > F_p < 20\text{Hz}$) obtenidas para los puntos ubicados en el centro de la ciudad de Huacho, próximos a la línea de costa.

HCH-315



HCH-327



HCH-340

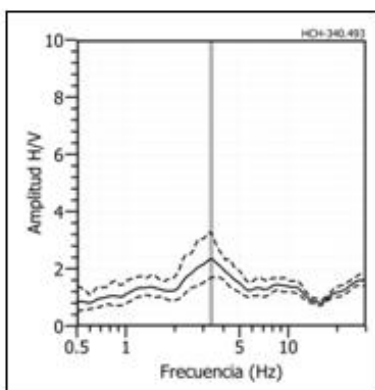


Figura 60: ...Continuación/ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes F1 ($3.0 > F_p < 20\text{Hz}$) obtenidas para los puntos ubicados en Huaura.

Las razones H/V obtenidas para los puntos HCH-315, HCH-327 y HCH-340, ubicados en Huaura, presentan las siguientes características: el punto HCH-315 se encuentra muy próximo al río Huaura y en él predominan frecuencias de 8 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces. Los otros dos puntos (HCH-327) y HCH-340 se encuentran alejados del río y en ellos las frecuencias y amplificaciones tienden a valores menores.

Los resultados obtenidos muestran que el suelo en el extremo norte de la ciudad de Huacho, es competente y conforme se tiende en dirección Este, con respecto al centro de la ciudad, las frecuencias **F₀** y **F₁** influyen de manera similar en la respuesta dinámica de los suelos. En las áreas ubicadas en los extremos Norte y Oeste de la ciudad, debido al predominio de la frecuencia **F₁**, el substrato más superficial tiene mayor influencia en la respuesta dinámica del suelo.

11.2.- 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 61 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Huacho. Los resultados indican que en el 80% del área de estudio sobresalen dos rangos de periodos, mayores y menores a 0.3 segundos. En la zona céntrica de la ciudad, los periodos dominantes son menores o iguales a 0.2 segundos. En el extremo Norte del área de estudio, no se identifica valores para los periodos dominantes. En los extremos NO y SO del área de estudio, los periodos son de 0.1 y 0.2 segundos. Los periodos con valores mayores a 0.3 segundos están presentes en el extremo sur de la ciudad de Huacho y en su zona céntrica.

En la zona de Huaura, los periodos con valores menores a 0.3 segundos se encuentran en su extremo Este y los mayores, en su extremo Oeste. En general, la distribución de estos periodos dominantes sugiere la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por otra más profunda y de mayor espesor y cuya dinámica bastante local, influye en el comportamiento dinámico del suelo.

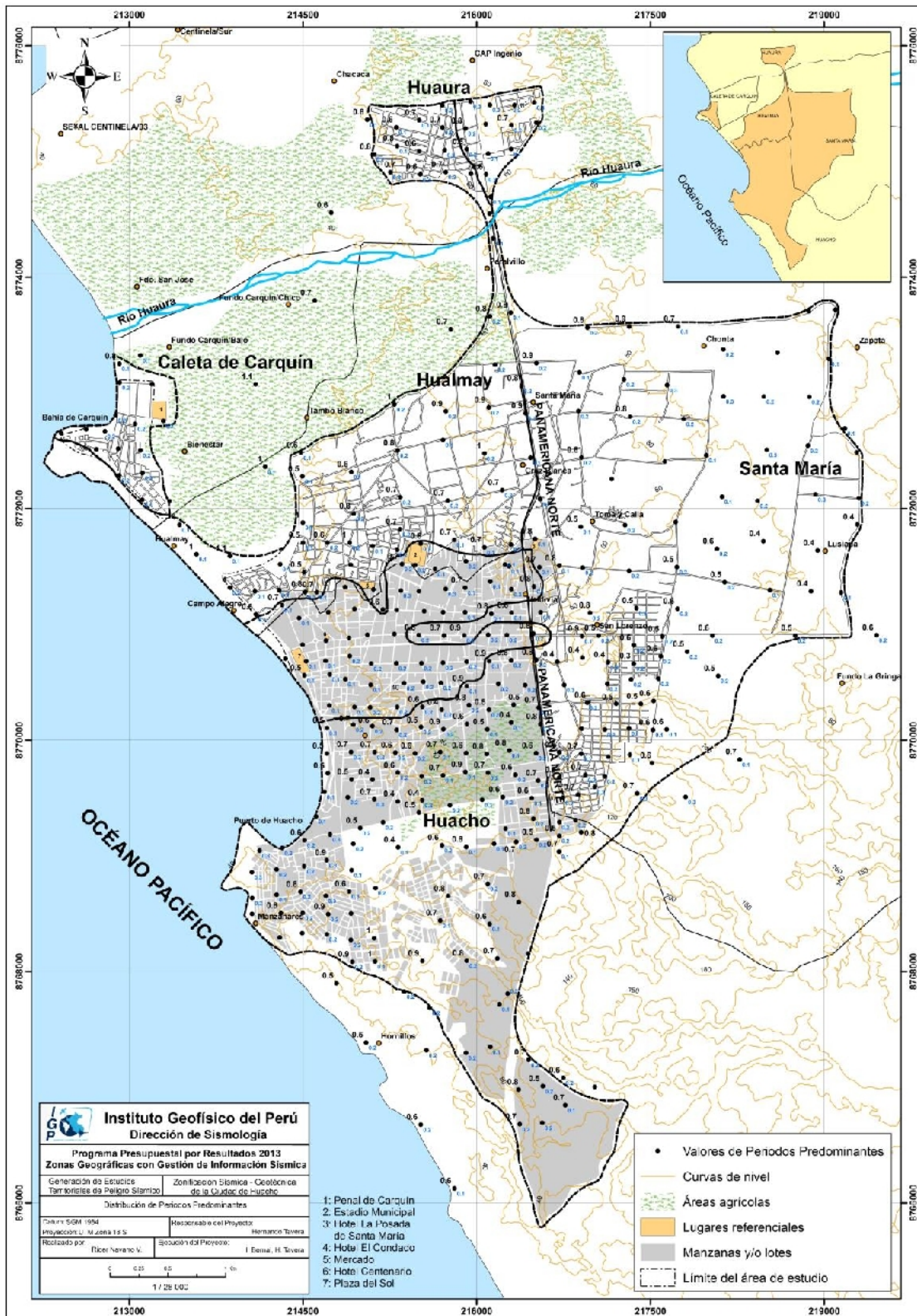


Figura 61: Mapa del área de estudio (ciudad de Huacho) y distribución espacial de los valores de periodos dominantes

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Huacho están relacionados con sus condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, donde T_0 es el periodo dominante, H el espesor del estrato y V_s es la velocidad de onda de corte.

Asumiendo, velocidades de 280 m/s y 400 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.2 segundos (ver punto 11.3), se estima para la capa superficial espesores entre 14 y 20 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos (Figura 62).

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra la presencia de dos zonas con suelos dinámicamente similares. La primera zona está definida por los periodos menores e iguales a 0.3 segundos, los mismos que se encuentran en el extremo norte de la zona céntrica de la ciudad de Huacho, en las penínsulas ubicados en los extremos NO y SO de la ciudad, así como en la zona de Huaura. Estos periodos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por otra de mayor espesor y más profunda, ambos presentan efectos especiales asociados a la dinámica local del subsuelo. La segunda zona es definida por la presencia de periodos dominantes mayores a 0.3 segundos, distribuidos alrededor de la primera zona. Estos valores sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran potencia que domina el comportamiento dinámico de la zona.

11.3.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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

Para el registro de información se ha utilizado un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24-canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 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 62, se presenta el mapa de la ciudad de Huacho con la distribución espacial de 8 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-HCH,.., LR08-HCH. En la Figura 63, se presenta imágenes de la toma de datos en campo y un ejemplo de los registros obtenidos.

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

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 Huacho.

Arreglo Lineal LR01- HCH: Este arreglo se realizó en la Urb. Carquin ubicada en el extremo NO del área de estudio. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de hasta 4 metros y velocidades V_s de 195 m/s. La segunda capa presenta un espesor de hasta 12 metros con velocidades V_s de 300 m/s. Ambas velocidades de V_s sugieren la presencia de suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 700 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 64a).

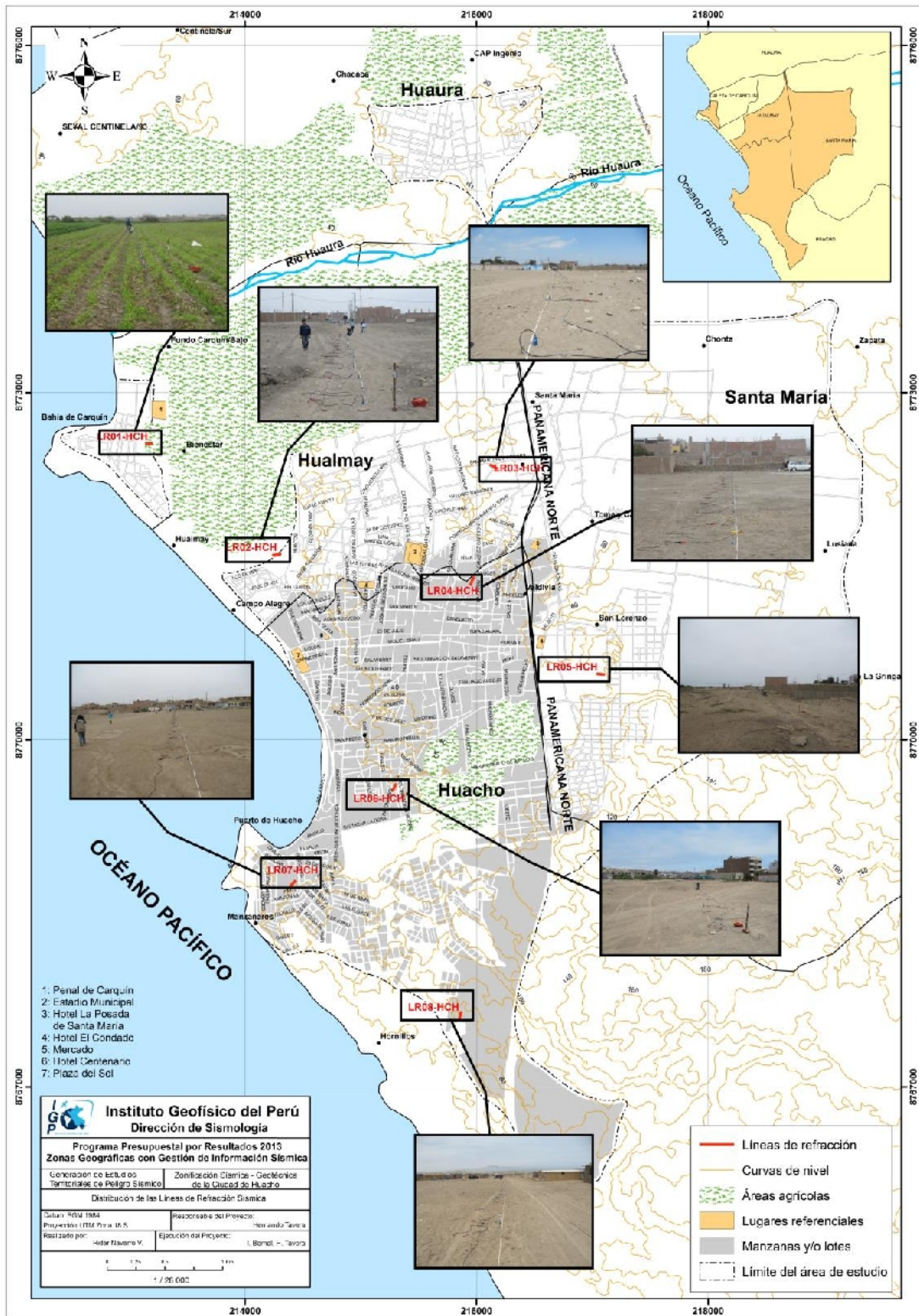


Figura 62: Mapa de la ciudad de Huacho y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-HCH, ..., LR08-HCH.

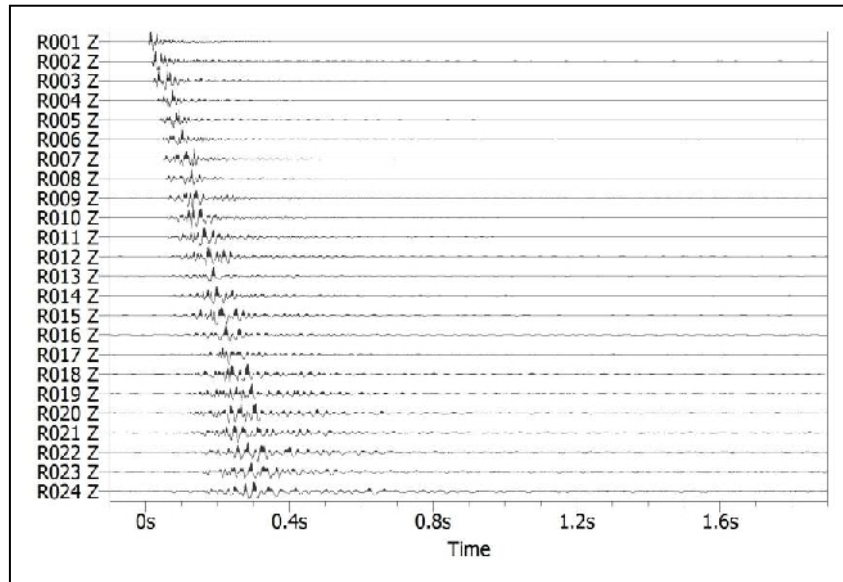
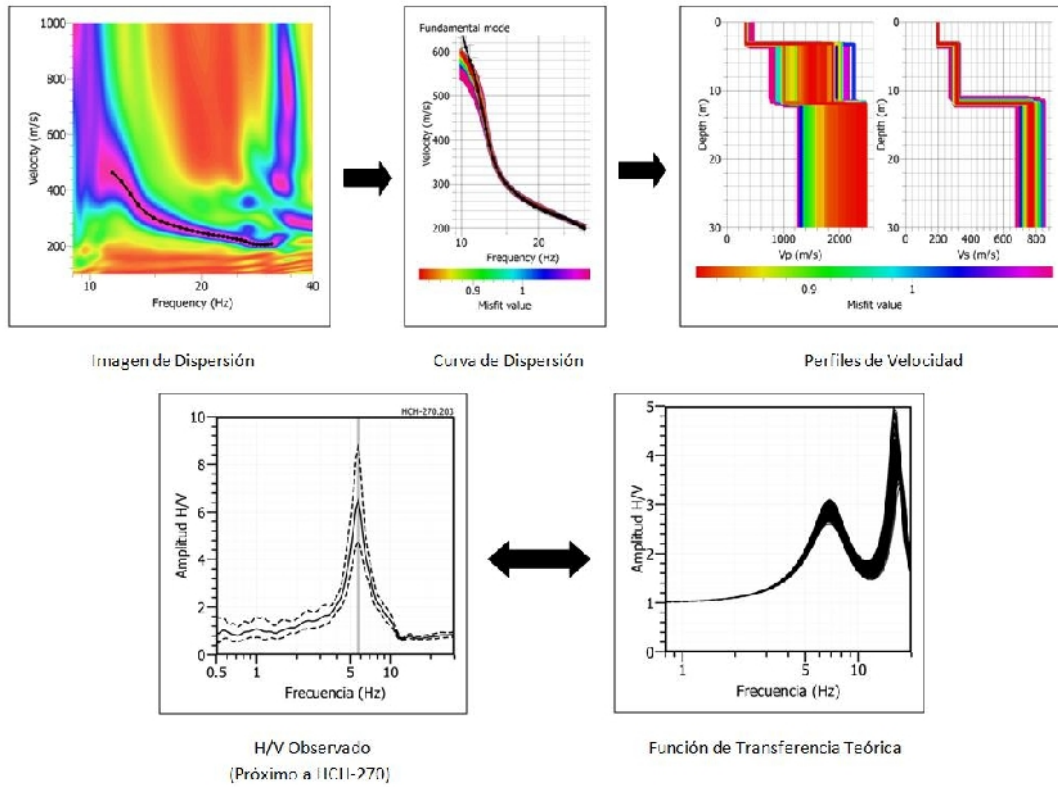


Figura 63: Disposición del equipo de refracción sísmica y registros obtenidos en la ciudad de Huacho

Arreglo Lineal LR02- HCH: Este arreglo se realizó en dirección NO a 800 metros de la plaza de Armas de la ciudad de Huacho. El análisis de la información ha permitido identificar la presencia de dos capas, la primera con espesores de hasta 7 metros y velocidades V_s de 405 m/s. La segunda capa con espesores de hasta 23 metros y velocidades V_s de 450 m/s. La superficie de interfase entre ambas capas presenta baja impedancia, por lo tanto, ambas capas pueden ser consideradas como una sola capa de suelo duro con un espesor de 30 metros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 1000 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 64a).

Arreglo Lineal LR01 - HCH



Arreglo Lineal LR02 - HCH

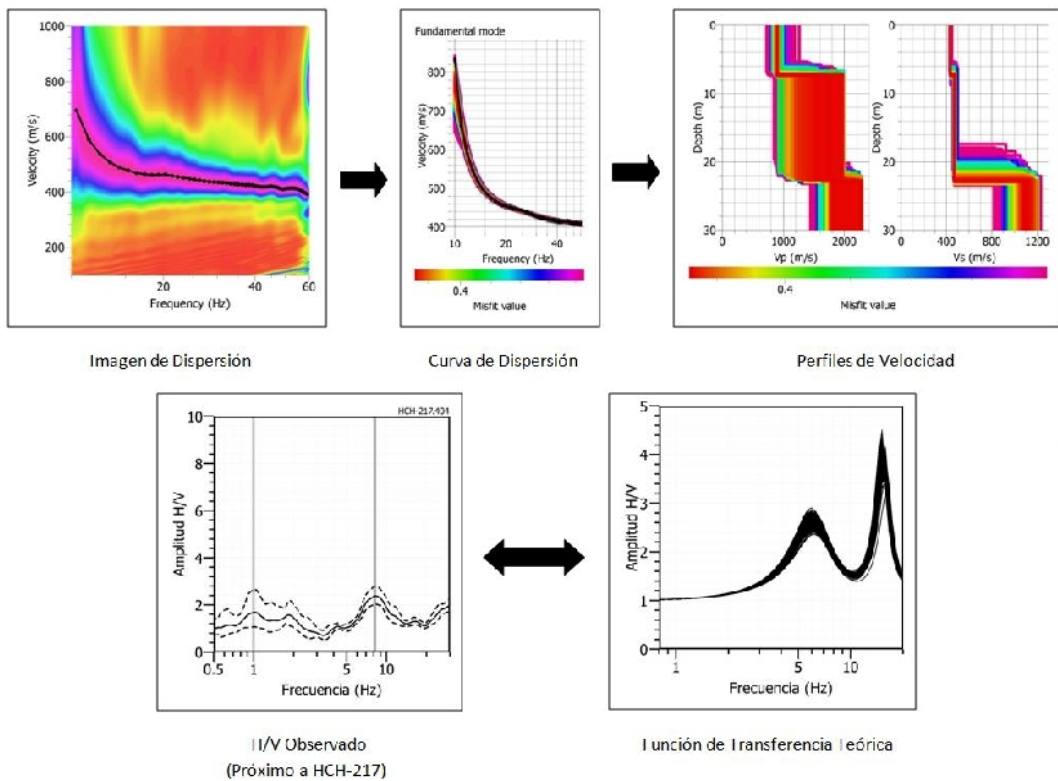


Figura 64a: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para los arreglos LR01-HCH y LR02-HCH (ver Figura 62)

Arreglos Lineales LR03-HCH, LR04-HCH y LR5-HCH: Estos arreglos presentan similares características sísmicas a pesar de haber sido obtenidos en diferentes puntos dentro de la zona ubicada en el extremo Este de la ciudad de Huacho. LR03-HCH, próximo a la Av. San Martín de Porras; LR04-HCH en el extremo Norte de la Urb. Los Sauces y LR05-CH, en el extremo Este de la Panamericana Norte. El análisis de la información correspondiente a estos perfiles ha permitido identificar la presencia de dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades V_s que fluctúan entre 220 y 290 m/s correspondiente a suelos duros. La segunda capa presenta espesores entre 14 a 16 metros y velocidades V_s entre 350 y 400 m/s, correspondientes a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 800 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figuras 64b y 64c)

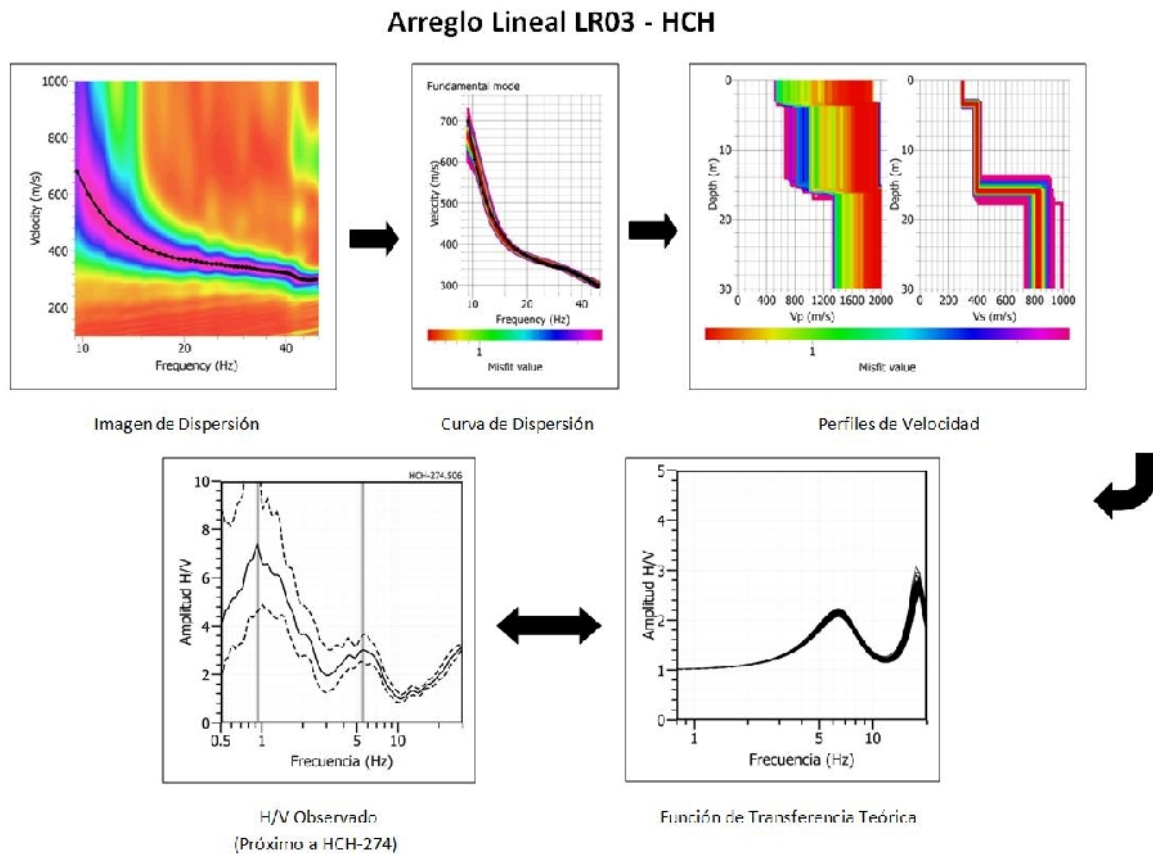
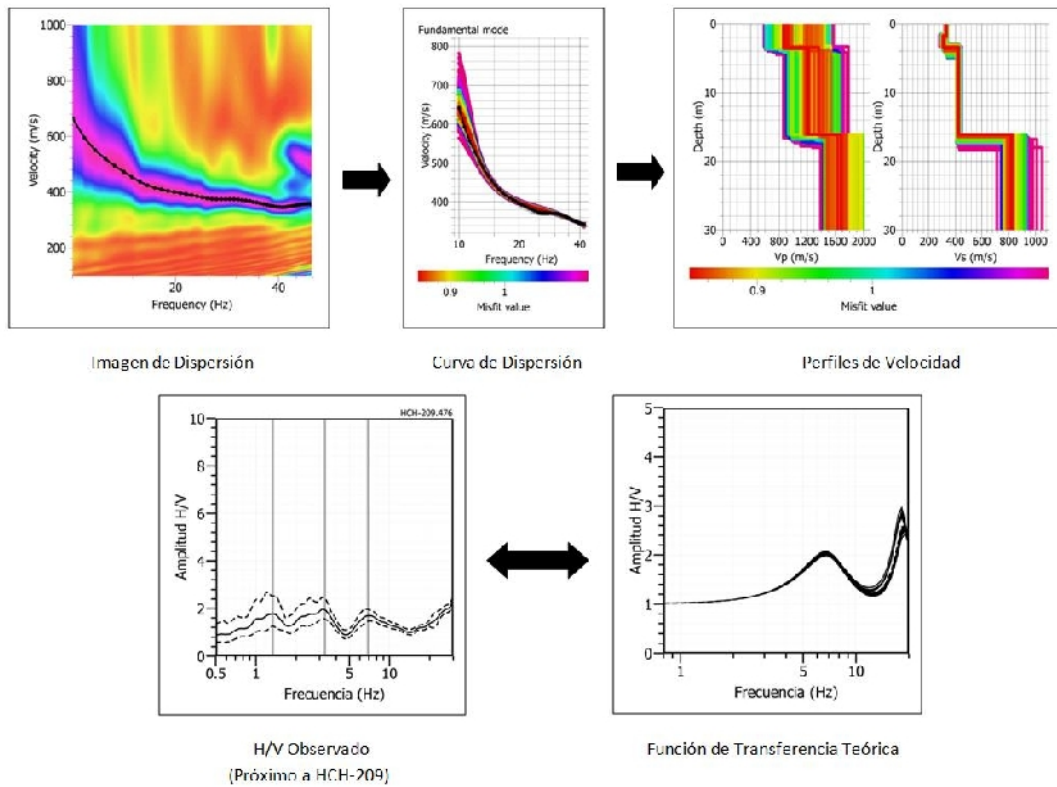


Figura 64b: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR03-HCH (ver Figura 62)

Arreglo Lineal LR04 - HCH



Arreglo Lineal LR05 - HCH

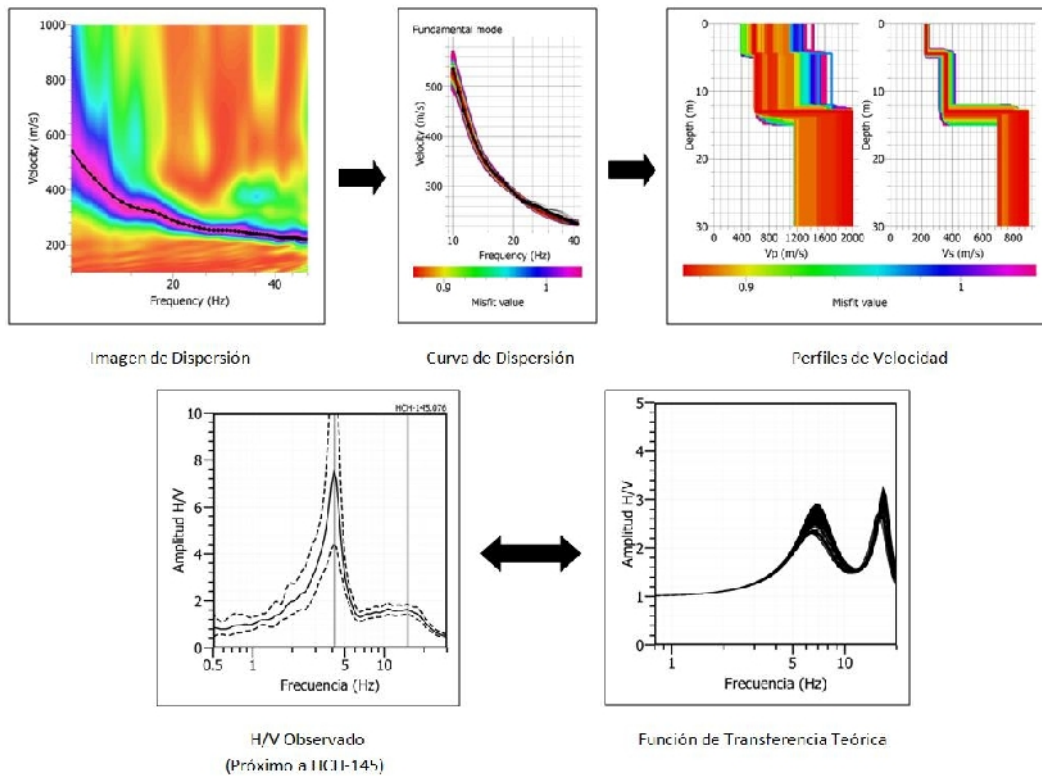


Figura 64c: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para los arreglos LR04-HCH y LR05-HCH (ver Figura 62)

Arreglo Lineal LR06-HCH: Este arreglo se realizó en la Urbanización Robles I, ubicada en el extremo Sur del área céntrica de la ciudad de Huacho. En este perfil de velocidad, se ha identificado la presencia de dos capas, la primera superficial con un espesor de 8 metros y velocidades V_s de 250 m/s, y la segunda capa, con espesor de 24 metros y velocidades de hasta 470 m/s. De acuerdo a estas velocidades V_s , los suelos son duros a muy duros (Figura 64d).

Arreglo Lineal LR07-HCH: Este arreglo se realizó a 200 metros de la plaza Manzanares en la ciudad de Huacho. Los resultados indican la presencia de dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades V_s de 180 m/s correspondiendo a suelos relativamente blandos. Una segunda capa presenta espesores de hasta 12 metros y velocidades V_s de 420 m/s, correspondiendo a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades de hasta 1400 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 64g).

Arreglo Lineal LR06 - HCH

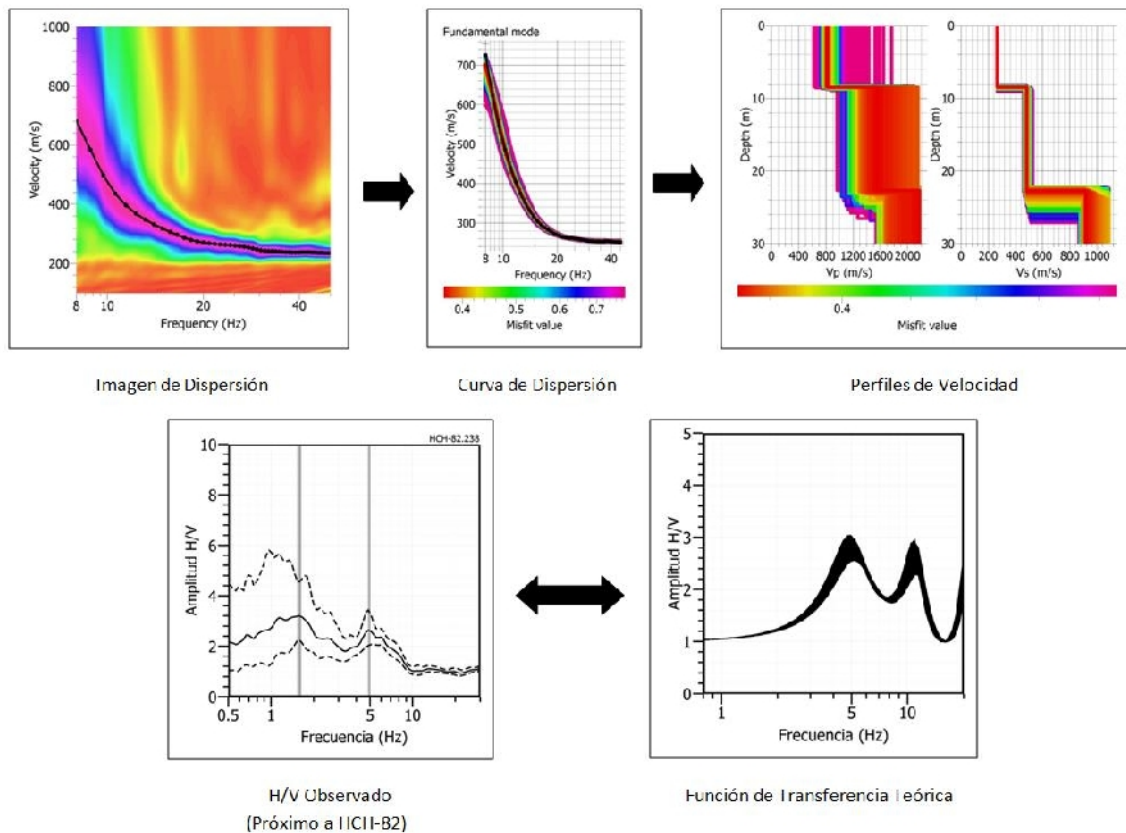


Figura 64d: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR06-HCH (ver Figura 62)

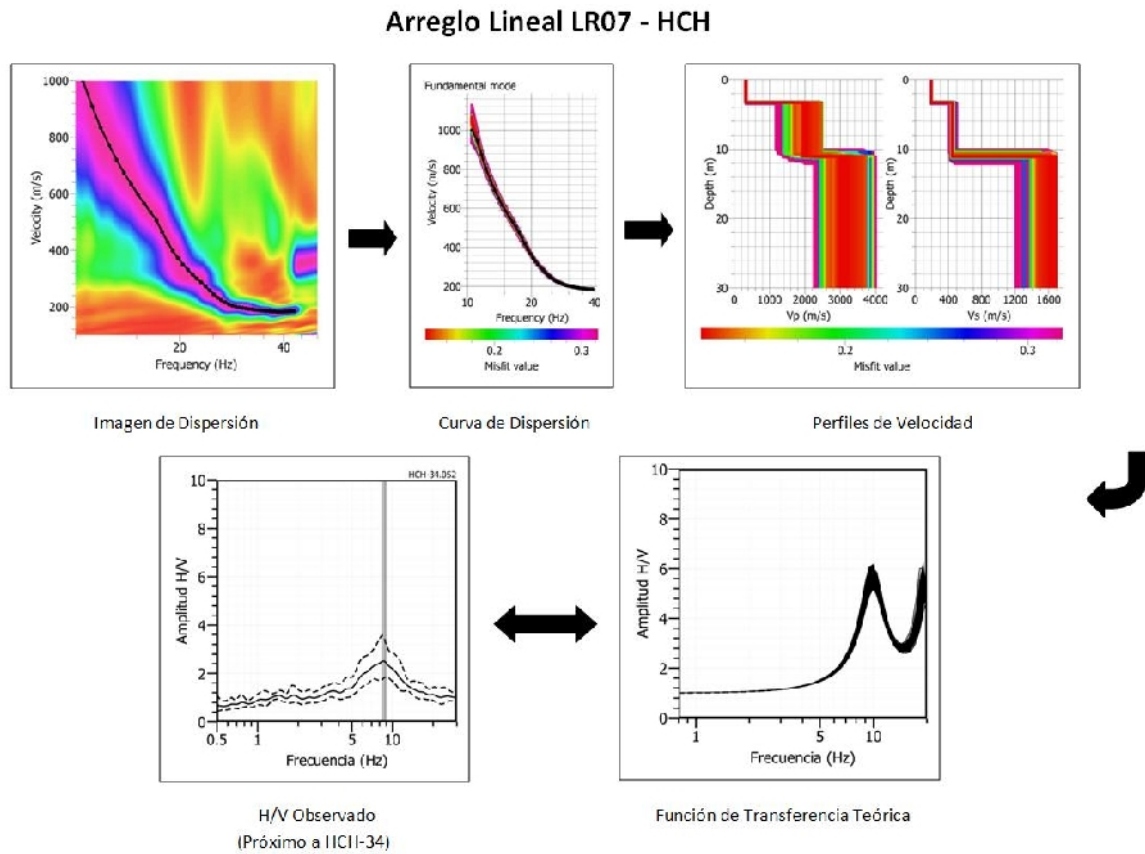


Figura 64g: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR07–HCH (ver Figura xx)

Arreglo Lineal LR08-HCH: Este arreglo fue realizado en el extremo Sur del área de estudio (zona de expansión urbanística). Los resultados obtenidos indican la presencia de dos capas, la primera con espesores de hasta 6 metros y velocidades Vs de 490 m/s correspondiendo a suelos duros. Una segunda capa presenta espesores de hasta 25 metros y velocidades Vs de 710 m/s, correspondiendo a suelos muy duros o roca blanda. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades de hasta 1300 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 64h).

Estos resultados indican que en la zona de estudio, los suelos están compuestos por dos capas, la primera superficial con espesores de 4 metros y velocidades de hasta 190 m/s. La segunda capa presenta espesores entre 16 a 20 metros y velocidades que fluctúan entre 370 a 470 m/s. La superficie de contacto con la capa más profunda alcanza velocidades Vs de 700 m/s correspondiente a suelos muy duros o rocas blandas.

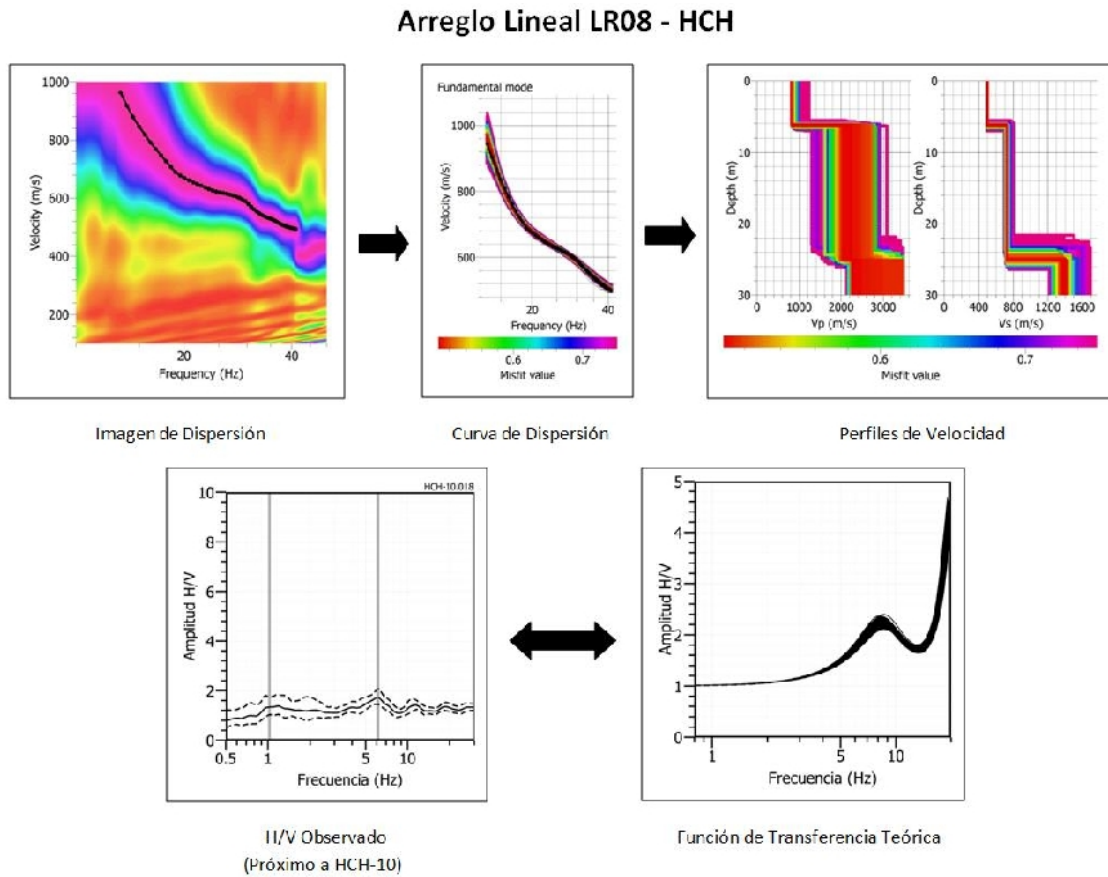


Figura 64h: Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR08–HCH (ver Figura 62)

En todos los casos, la función de transferencia teórica obtenida a partir del modelo de velocidad obtenidos en cada sección sísmica, es coherente con los picos de frecuencias predominantes obtenidos con H/V en puntos cercanos, lo cual permite confirmar la validez de la información utilizada en este estudio.

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Huacho se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y su distribución se muestra en la Figura 65. Para las líneas se consideró un espaciamiento de 3 metros entre electrodos sobre un tendido longitudinal de 72 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 13 metros.

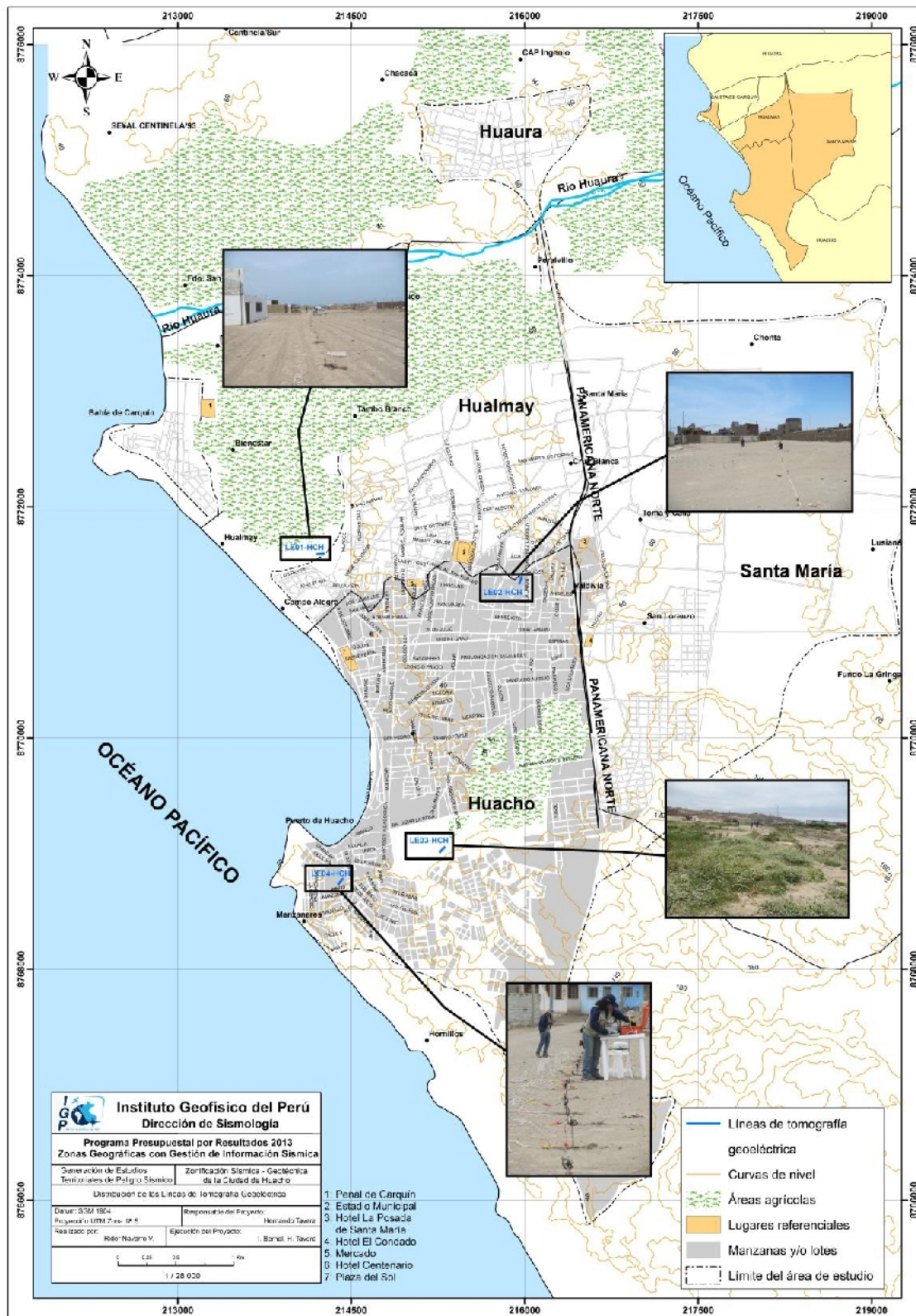


Figura 65: Mapa de la ciudad de Huacho y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica: LE01-HCH, LE02-HCH, LE03-HCH y LE04-HCH.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. Las principales características de cada línea de tomografía eléctrica son (Figura 66):

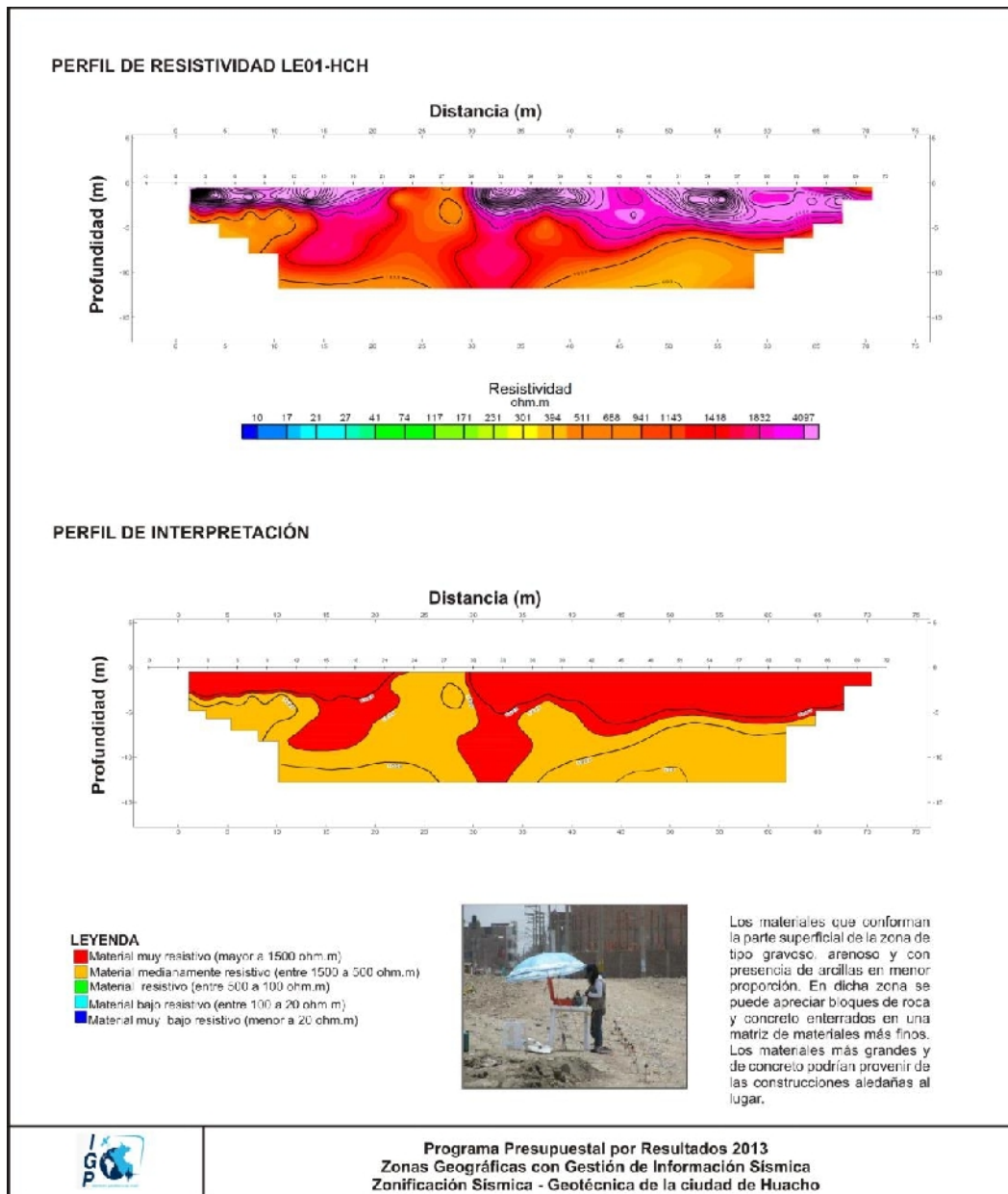


Figura 66: Línea de Tomografía Eléctrica LE01-HCH tomada a un 1 km de la Plaza de Armas de la ciudad de Huacho (ver Figura 65).

- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-HCH: Línea tomada en dirección SE a 1 km de la Plaza de Armas de Huacho. La interpretación de la información permite identificar resistividades que varían entre 443 y 28700 ohm.m, con el predominio de valores mayores a 1500 ohm.m. En el extremo superior de la sección geoelectrica, se

concentran valores mayores a 2000 ohm.m, hasta los 6 m de profundidad, para luego ser menos resistivos conforme se avanza en profundidad con valores de hasta 500 ohm.m

Los valores de alta resistividad en superficie alcanzan profundidades de 6 metros y corresponderían a materiales mal consolidados. En profundidad el suelo se hace menos resistivo, pero los valores de resistividad siguen siendo altos debido a la presencia de materiales del tipo arenoso y en menor proporción, arcillosos. En toda la sección no se identifica niveles freáticos o agua por ascenso capilar.

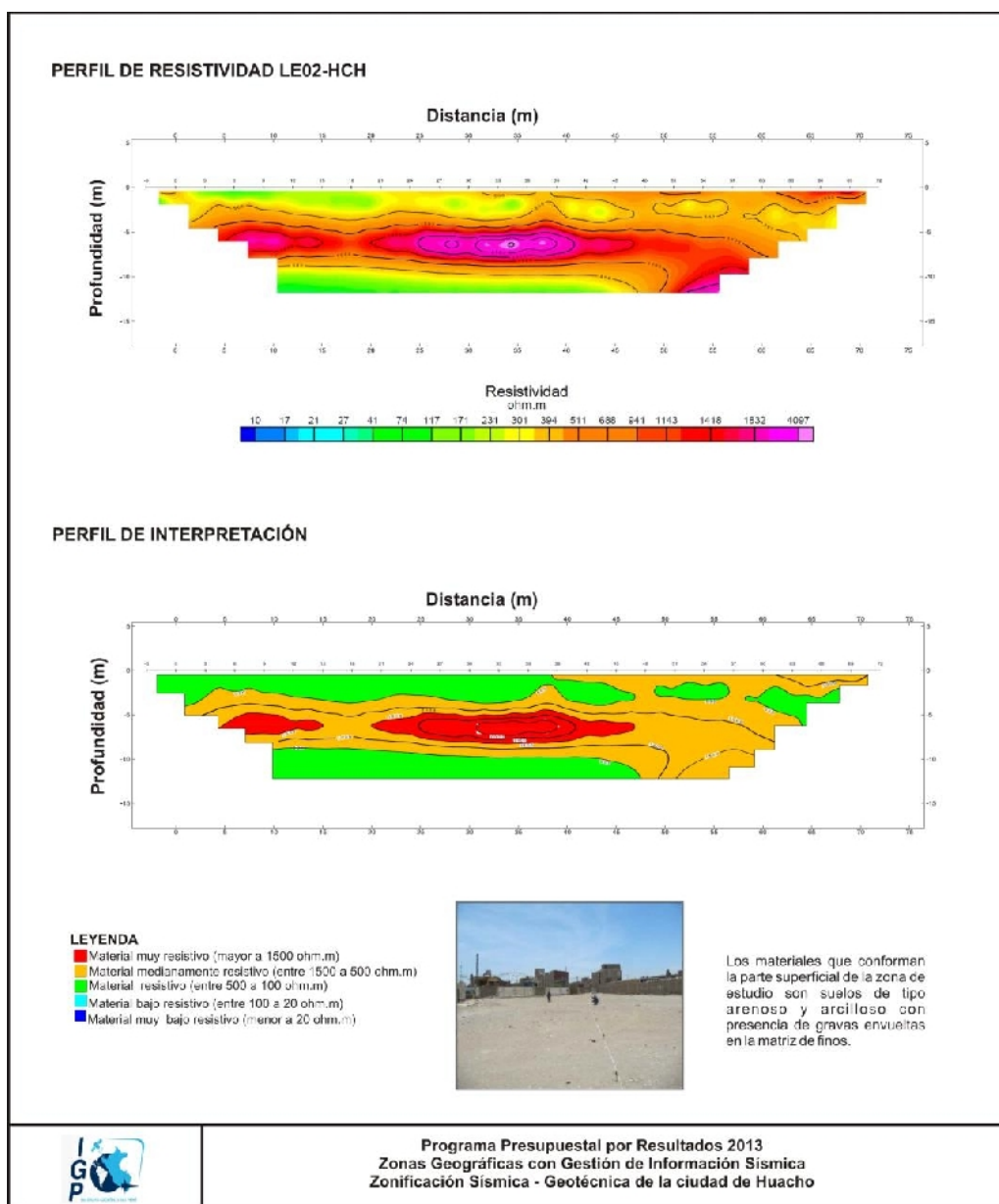


Figura 66: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE02-HCH tomada en el extremo Este de la zona céntrica de la ciudad de Huacho (ver Figura 65)

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-HCH: Línea tomada en dirección Este con respecto a la zona céntrica de Huacho, a 250 metros de la Plazuela Víctor Raúl Haya de la Torre. Los resultados obtenidos indican que en el extremo superior de la sección se concentran valores de resistividad entre 100 y 500 ohm.m, desde el inicio de la línea hasta la distancia de 45 metros, desde allí la resistividad del suelo tiende a aumentar hasta valores de 1000 ohm.m al final de la línea. Entre los 4 y 8 m de profundidad, la resistividad se incrementa hasta valores de 1500 ohm.m.. A mayor profundidad, los valores indican la presencia de suelos menos resistivos.

Los valores de resistividad en superficie se presentan como Resistivos y son debidos al predominio de materiales finos como arenas y posiblemente arcillas con contenido orgánico que facilitan la disminución de los valores de resistividad. Por debajo de estos suelos, se cuenta con otros compuestos por materiales más resistivos, lo que podría indicar la presencia de materiales como gravas de diferentes tamaños y arenas, con ausencia de agua en su interior. En profundidad los suelos son menos resistivos debido a la presencia de materiales más finos como arenas con una mejor disposición de sus partículas. Esta disminución de la resistividad podría estar relacionada a la presencia de agua por ascenso capilar, no siendo aún el nivel freático.

-Líneas de Tomografía Eléctrica LE03-HCH: Línea tomada en el extremo sur con respecto a la zona céntrica del área de estudio, próximo a la Universidad de Huacho. Los valores de resistividad definen la presencia de suelos moderadamente resistivos a bajos resistivos. En el extremo superior de la sección se concentran valores de resistividad entre 100 y 500 ohm.m, estando los valores más altos concentrados en la parte central de la línea. Los valores más altos de resistividad llegan a 400 ohm.m hasta una profundidad de 4.5 m. Entre los 5 y 10 m de profundidad, la resistividad toma valores entre 100 y 200 ohm.m, siendo su disposición prácticamente horizontal, con tendencia a disminuir con la profundidad.

Los valores de resistividad, a nivel de la superficie, definen la presencia de suelos Resistivos, además de otros de mayor resistividad hacia la parte central de la sección. La presencia de vegetación en la zona da idea de suelos con comportamiento menos resistivo, ya sea por presencia de materiales orgánicos y/o agua. La parte central de la línea carece de vegetación, correspondiendo al incremento de los valores de resistividad. En profundidad, los valores de resistividad tienden a disminuir, indicando la presencia de suelos saturados. La resistividad del suelo alcanza valores de 10

ohm.m, indicando la presencia de suelos con agua salada, pero no en el porcentaje de agua de mar, podría tratarse de un suelo intermedio (el agua de mar presenta resistividades de 0.2 ohm.m., Loke, 2004).

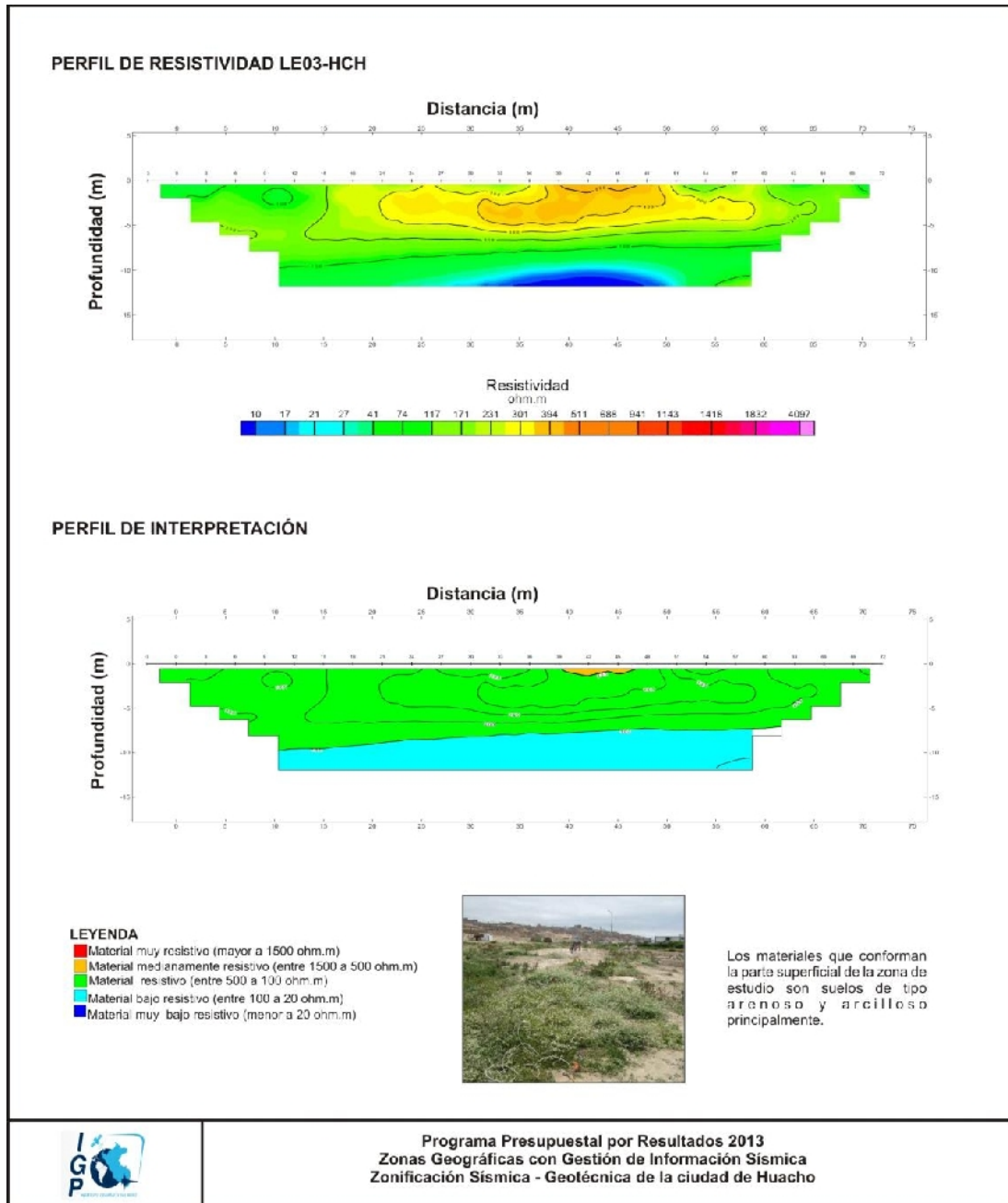


Figura 66: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE02-HCH tomada en el extremo Sur de la ciudad de Huacho (ver Figura 65)

.- **Línea de Tomografía Eléctrica LE04-HCH:** Línea tomada en el extremo Sur del área de estudio, próximo a la Calle Los Pinos y a 500 metros de la Universidad de Huacho. Los resultados indican la presencia de suelos con valores de resistividad bajos a muy bajos. Los valores varían entre 1 y 438 ohm.m., con el predominio de valores menores a 50 ohm.m. En el extremo superior de la sección se identifica la presencia de valores mayores a 50 ohm.m, hasta profundidades de 2 a 4 metros y por debajo, valores menores a 40 ohm.m, con ligera tendencia a disminuir.

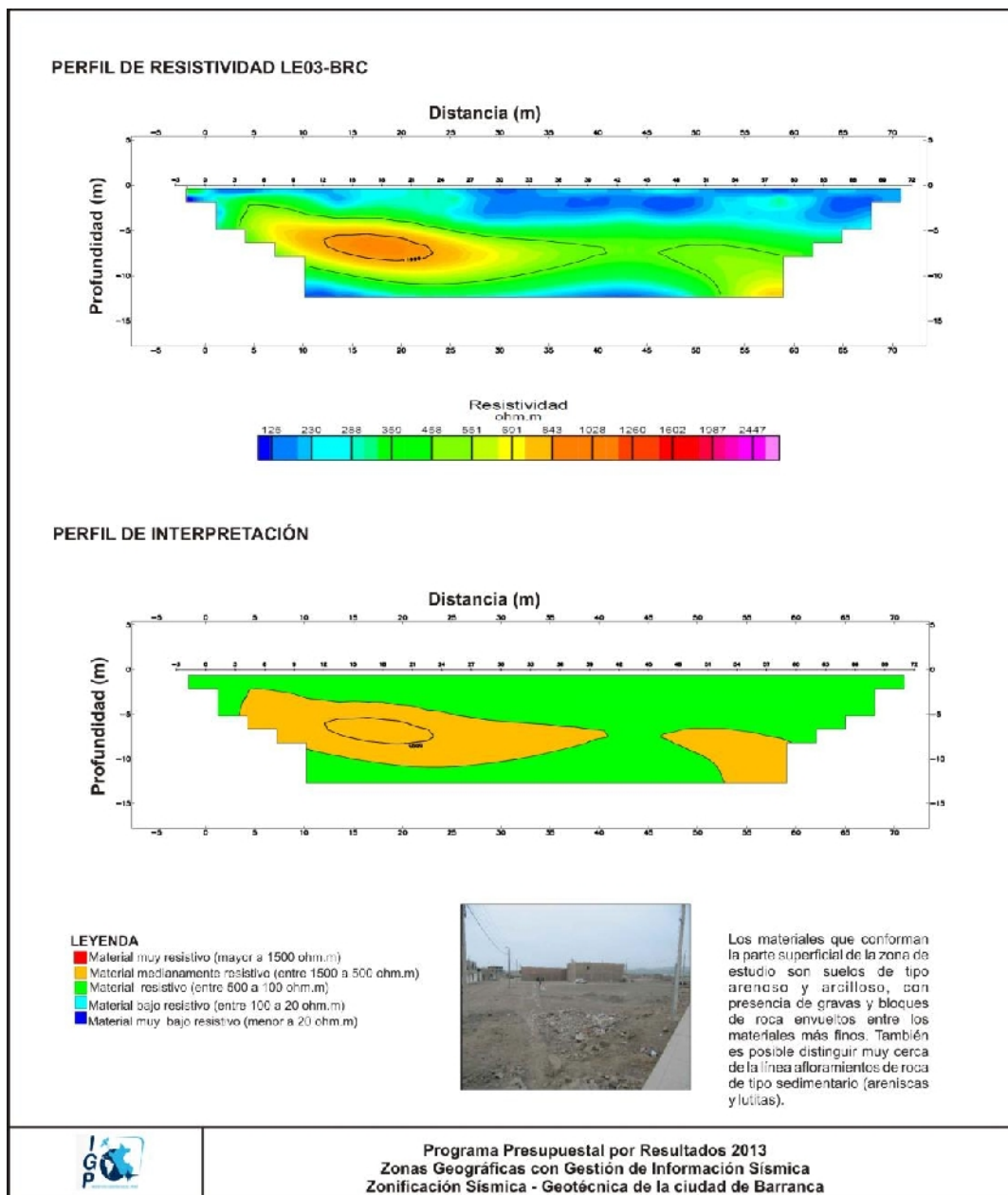


Figura 66: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE04-HCH tomada en el extremo sur de la ciudad de Huacho (ver Figura 65)

En superficie, los valores de resistividad indican la presencia de suelos resistivos debido a la presencia de suelos arenosos y arcillosos secos. Los suelos menos resistivos, presentes cerca de la superficie, suponen la presencia de agua filtrada. Por debajo de esta capa resistiva, se presentan de manera intermitente valores de resistividad menores a 20 ohm.m, lo que haría suponer la presencia de agua.

Los resultados indican que la zona en estudio se caracteriza por presentar resistividades altas a moderadas en su extremo Norte y NE, y de moderadas a bajas en su extremo Sur. En el primer caso, los valores de resistividad en superficie se presentan como Altos Resistivo hasta profundidades de 6 a 8 m, debido a que corresponden a suelos mal consolidados y con mala disposición de sus materiales. En profundidad, los valores se hacen menos resistivos, pero siguen siendo valores altos, debido a la presencia de materiales, tipo arena y en menor proporción arcilla. En el segundo caso, los valores de resistividad, se presentan como Resistivos asociados a la presencia de suelos arenosos y arcillosos secos. Por debajo de esta capa, se muestra de manera intermitente valores de resistividad menores a 20 ohm.m, lo que haría suponer la presencia de agua.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Huacho considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Barranca, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

Para la ciudad de Huacho se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 67):

ZONA I: *Conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte (Vs) del orden de 400m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de media a alta.*

ZONA II: *Se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3 y 16 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Los periodos predominantes del terreno son mayores a 0.4 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte (Vs) de 350 a 400 m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de baja a media.*

ZONA III: *No identificable en la zona, a pesar que se cuenta con el predominio de periodos de 0.4 a 0.8 segundos, y velocidades de ondas Vs muy bajas, no correspondiendo a lo descrito en la Norma E030.*

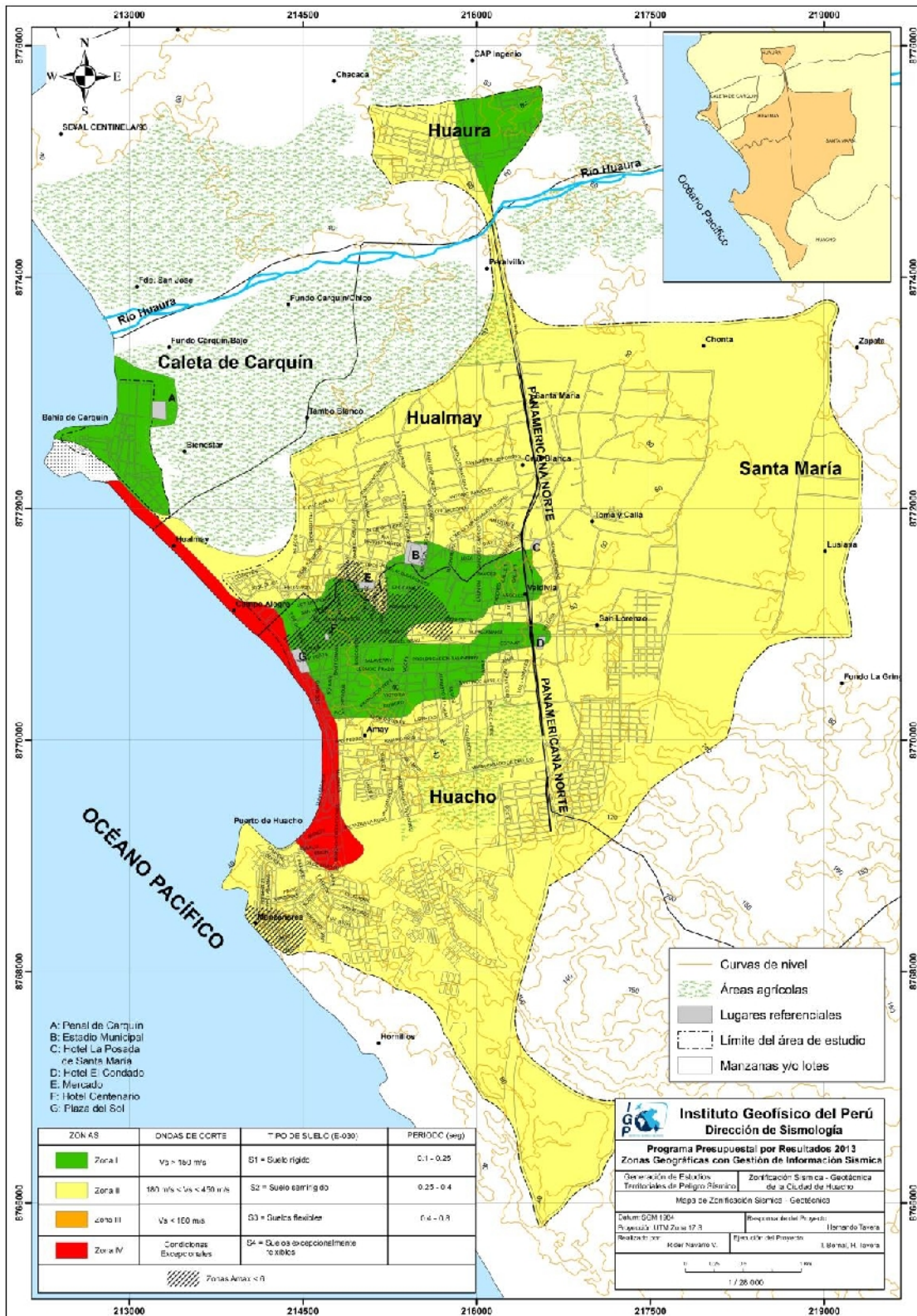


Figura 67: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Huacho

ZONA IV: Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. El comportamiento dinámico de los suelos ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

Aspectos Geomorfológicos

La ciudad de Huacho se asienta sobre una superficie que tiene variantes topográficas que van de 0 metros hasta los 250 m.s.n.m, estando las zonas de menor elevación en dirección Oeste y las de mayor elevación hacia el Este, por ejemplo, Cerro Colorado

Aspectos Geológicos:

En la ciudad de Huacho se observa que las rocas más antiguas corresponden a la Formación Casma, de naturaleza volcánica; mientras que, los materiales más jóvenes lo conforman depósitos fluviales ubicados a ambos márgenes del río Huaura. Además, en el área de estudio afloran rocas intrusivas (diorita), depósitos marinos, eólicos y aluviales, estos últimos cubren aproximadamente el 60% de la extensión del área de estudio.

Aspectos Geodinámicos:

En la ciudad de huacho se ha identificado los siguientes eventos geodinámicos: caída de rocas, derrumbes, erosión marina, asentamientos de terreno e inundaciones fluviales.

La construcción de escenarios extremos por inundación considera un caudal mínimo de inundación de 300 m³/seg que afectaría a la margen izquierda del río Huaura, pudiendo afectar el sector Norte del distrito de Carquin. Es necesario proceder a encauzar el río, previo a su desembocadura, aproximadamente 1.5 km de su tramo.

Aspectos Geotécnicos:

El análisis de suelos ha permitido identificar en la ciudad de Huacho, la existencia de cinco tipos de suelo: SP, arena mal gradadas; GW, gravas bien gradadas; GM, gramas limosas; SM, arenas limosas y ML, limos. El tipo de suelo que predomina en la ciudad de Huacho está compuesto por gravos-limos (GM) y areno-limoso (SM), seguido en menor proporción por suelos limosos (ML). La zona urbana central, se encuentra sobre suelos compuestos por gravas limosas y gravas mal gradadas.

En la ciudad de Huacho los suelos que la conforman presentan de baja a alta capacidad portante. Los suelos con alta capacidad portante están presentes en la zona media de la ciudad de Huacho (gravas limosas con arena de grano grueso). Los suelos con baja capacidad portante se encuentran a lo largo del litoral (arenas inconsolidadas saturadas de grano grueso); en el extremo Este de la ciudad, distrito de Santa María (limos arenosos); y en el extremo sur, cerca del cerro Negritos. En este sector, el basamento rocoso se encuentra a 1.5 metros de profundidad y los valores de capacidad portante corresponden al suelo que tapiza al basamento. Para la construcción de cualquier obra de ingeniería es necesario realizar de manera puntual estudios geotécnicos.

Aspectos Tectónicos:

Estudios anteriores, han definido en la zona de los A.H. Manzanares, Atalaya y Can Cun, la existencia de la llamada “falla de Atalaya”. Después del trabajo de campo efectuado en la zona, se concluye que no existen evidencias geológicas ni geofísicas que confirmen la presencia de una falla geológica, por el contrario correspondería a un asentamiento del terreno. Se podrían realizar estudios complementarios como exploración con georadar que confirmen lo indicado en este estudio.

Aspectos Sísmológicos y Tsunamis:

El borde occidental de la región central del Perú, se constituye como la de mayor índice de sismicidad, habiendo dado origen en el pasado a sismos históricos como los de 1582 y 1746 que afectaron toda la zona costera. Posteriormente, los

sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970 y 1974; aunque de magnitud moderada ($M_w \sim 7.5$), causaron daños en varias ciudades costeras, en el caso de Huacho en viviendas de adobe y quincha. Estos sismos generaron tsunamis con diferentes características que afectaron a la zona costera.

Para la construcción de un escenario de tsunami se considera la ocurrencia de un sismo de $M_w = 8.5$. El tsunami generaría olas que llegarían a la zona costera de la ciudad de Huacho en 18-20 minutos con alturas del orden de 9 metros en la playa Centinela; de 7 metros en el río Huaura, caleta Carquin, bahía de Huacho y playa Chica; de 6 metros en la playa Chorrillos y en el puerto de Huacho, y de 5 metros en las playas Hornillos y El Colorado.

Los niveles de inundación horizontal indican distancias de hasta 1.4 km a lo largo del río Huaura, 0.6 km en la caleta Carquin, de 300 a 200 metros en las playas Centinela y Chorrillos, además de la Bahía y el puerto de Huacho. Distancias de inundación menores a 150 metros se presentarían en las playas Chica, Hornillos y El Colorado.

Aspectos Sísmicos y Geofísicos:

El análisis de razones espectrales H/V ha permitido observar gran variedad de frecuencias predominantes que van desde 1.0 a 20 Hz, sugiriendo que el suelo sobre el cual se asienta la ciudad de Huacho es relativamente heterogéneo. El hecho de identificar la presencia de dos a tres picos de frecuencias, se corrobora lo indicado, es decir, se tiene un suelo cuya respuesta dinámica es muy compleja. Para el análisis de la información se ha definido dos rangos de frecuencia, **F₀** ($F_p < 3.0\text{Hz}$) y **F₁** ($3.0 > F_p < 20\text{Hz}$).

Las frecuencias **F₀** se distribuyen de manera casi homogénea en toda la zona de estudio con amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces. En la mayoría de puntos sobresalen dos picos de frecuencias, el primero en el rango **F₀** y otro a valores mayores a 3 Hz (**F₁**). Un 40 % de los puntos presentan mayor amplificación en **F₀**.

Los resultados obtenidos evidencian, para el extremo norte de la zona céntrica de la ciudad de Huacho, la presencia de suelos competentes. En el extremo

Este, los rangos de frecuencias **F_0** y **F_1** , influyen de manera similar en la respuesta dinámica de los suelos. En Dirección Oeste y Norte, las frecuencias de **F_1** tienen mayor influencia en el comportamiento dinámico de los suelos superficiales.

El **mapa de distribución de periodos**, muestra la presencia de dos zonas conformadas con suelos dinámicamente similares. La primera definida por periodos menores e iguales a 0.3 segundos y corresponden a suelos ubicados en los extremos Norte y Este de la ciudad, y en las penínsulas ubicadas en los extremos NO y SO de la ciudad, todos asociados a una capa superficial de suelo de poco espesor e influenciada por otra más profunda y de mayor espesor. La segunda zona es definida por periodos mayores a 0.3 segundos que prácticamente bordea a la anterior, y describe la presencia de una capa de suelo relativamente uniforme y de mayor espesor; por lo tanto, domina el comportamiento dinámico de los suelos en la zona.

Los estudios con arreglos sísmicos lineales han permitido identificar en la ciudad de Huacho, la presencia de suelos formados por dos capas. La primera con espesores de 4 metros y velocidades V_s de hasta 190 m/s, y la segunda con espesores de 16 a 20 metros y velocidades V_s de 370 a 470 m/s. La superficie de contacto con el estrato más profundo alcanza velocidades V_s mayores a 700 m/s, correspondiendo a suelos muy duros o rocas blandas.

La distribución de periodos dominantes muestra que los periodos mayores varían principalmente entre 0.5 y 0.8 segundos, y los menores entre 0.1 y 0.3 segundos, todos distribuidos de manera casi uniforme sobre toda el área de estudio. En áreas pequeñas ubicadas al NO y Este de la Plaza de Armas de la ciudad de Barranca y al NO del estadio, no se observa valores de periodos dominantes. Los periodos mayores sugieren la presencia de suelos de gran espesor y los menores de poco espesor, donde la primera influye en el comportamiento dinámico de la segunda. Los valores de periodos entre 0.3 y 0.4 segundos se concentran en la parte central de la ciudad siguiendo una orientación Este-Oeste y otra próxima al río Pativilca, lo cual permite inferir la presencia de una capa superficial de mayor espesor con respecto al resto del área de estudio.

Los estudios de Tomografía Eléctrica han permitido identificar en la ciudad de Huacho suelos con resistividades altas a moderadas en sus extremos Norte y Noreste; además de moderadas a bajas en su extremo Sur. En el primer caso, los valores de resistividad, en superficie los suelos se presentan como Altos Resistivos hasta profundidades de 6 a 8 m, pudiendo encontrarse mal consolidados y con mala disposición de sus materiales. En profundidad, los suelos se hacen menos resistivos (pero siguen siendo altos Resistivos) y estarían asociados a suelos compuestos por arenas y en menos proporción, arcilla. En el segundo caso, los valores de resistividad, en superficie definen suelos Resistivos conformados por arena y arcilla seca; por debajo de esta capa, los suelos presentan de manera irregular valores de resistividad menores a 20 ohm.m, lo que haría suponer la presencia de agua.

Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo)

La correlación entre los resultados obtenidos con cada metodología utilizada en este estudio, han permitido identificar en la ciudad de Huacho, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de 3 zonas sísmicas - geotécnicas, las mismas que corresponden a suelos de Tipo S1, S2 y S4. Esta clasificación permite proponer, en este estudio, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del suelo) de la ciudad de Huacho.

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.
- 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
- Pierre-Yves BARD y SESAME participants (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.
- 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.

- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- 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
- 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).
- 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
- INGEMMET (1970): Cuadrángulo Geológicos de Barranca. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.
- 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.
- 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.
- 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