



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Tierra
Sólida - SCTS



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

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



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA CIUDAD DE BELLA UNIÓN

(Comportamiento Dinámico del Suelo)
Bella Unión - Caraveli - Arequipa

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú
2015



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE BELLA UNIÓN

Provincia de Caravelí – Departamento de Arequipa

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gomez

Personal participante

Fabiola Rosado

Wilfredo Sulla

Javier Oyola

Martha Añezco

Gabriela Pérez

Jesús Huarachi

Henry Salas

Renzo Bustamante

Segundo Ortiz

Mariana Vivanco

Roberth Carrillo

Cristhian Chiroque

Abraham Gamonal

Julio Martínez

José Guzman

Apoyo Técnico

Estela Torres

Augusto Cárdenas

RESUMEN EJECUTIVO

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

Los resultados obtenidos para la ciudad de Bella Unión han permitido identificar la existencia de tres (3) tipos de suelos codificados como Tipo S1, S2 y S4. Según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) corresponden a Zonas I, II y IV.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Bella Unión se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Sismicidad

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

7.3.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.4.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Origen Depositacional

9.1.1.2.- Origen Aluvial

9.1.1.3.- Origen Tectónico

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

11.3.- Periodos Dominantes

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Fichas de Calicatas

ANEXO 2: Fichas de Ensayo de Densidades

ANEXO 3: Fichas de Ensayo de Penetración Dinámica Ligera

ANEXO 4: Fichas de Posteo

ANEXO 5: Mapas A3

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

1.- INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Bella Unión, ubicada en el distrito de Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1: Ciudad de Bella Unión

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Bella Unión es uno de los trece distritos de la Provincia de Caravelí, ubicada en el Departamento de Arequipa, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa, en el sur del Perú. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia Católica forma parte de la Prelatura de Caravelí en la Arquidiócesis de Arequipa. Se encuentra al NE de la provincia de Caravelí, se sitúa a la altura del km 550 de la carretera Panamericana Sur, a una elevación de 225 m.s.n.m. Su capital es la ciudad de Bella Unión (Figura 2). Sus límites son por el Norte, con la provincia de Lucanas, Ayacucho; por el Este, desde el lindero que separa las provincias de Lucanas y Caravelí hasta la margen derecha del río Acarí; por el Sur, la margen derecha del río Acarí, aguas abajo desde el límite interprovincial entre Lucanas y Caravelí hasta un punto situado frente al caserío de Tres Palos y luego una línea que cruce- el río para continuar por la margen izquierda bordeando el barranco hasta terminar en el mar; y por el Oeste, el Océano Pacífico.

El distrito de Bella Unión ha sido creado mediante Ley No 12450 que promulgó el gobierno de Manuel A. Odría el 24 de noviembre de 1955. Tiene una superficie de 1588,39 Km² y una población de 1622 habitantes, lo que da una densidad poblacional de 1 h/km; es decir, la segunda más baja de la provincia. El clima de Bella Unión es variado aunque predominan dos estaciones bien marcadas, el verano y el invierno. Clima propicio para el cultivo del olivo, algodón, frutas, etc. Hidrográficamente hablando el distrito debe su existencia, o como dijeran algunos, el río Acarí similar a lo que sucedería en Egipto con el río Nilo, trae las aguas del Acarí para beneficio de la agricultura, entonces permitió que hoy exista Bella Unión.

El turismo en Bella Unión considera el museo de Sasaco. Hace millones de años, el desierto de Sacaco era una bahía con seres descomunales por sus dimensiones y que a raíz de los cambios geológicos, conservo los fósiles de diversas especies que vivieron durante el mioceno superior y el plioceno inferior, entre los que sobresalen tiburones enormes, ballenas, ostras gigantes y torpes megaterios, que hoy están al descubierto y son continuamente visitados.

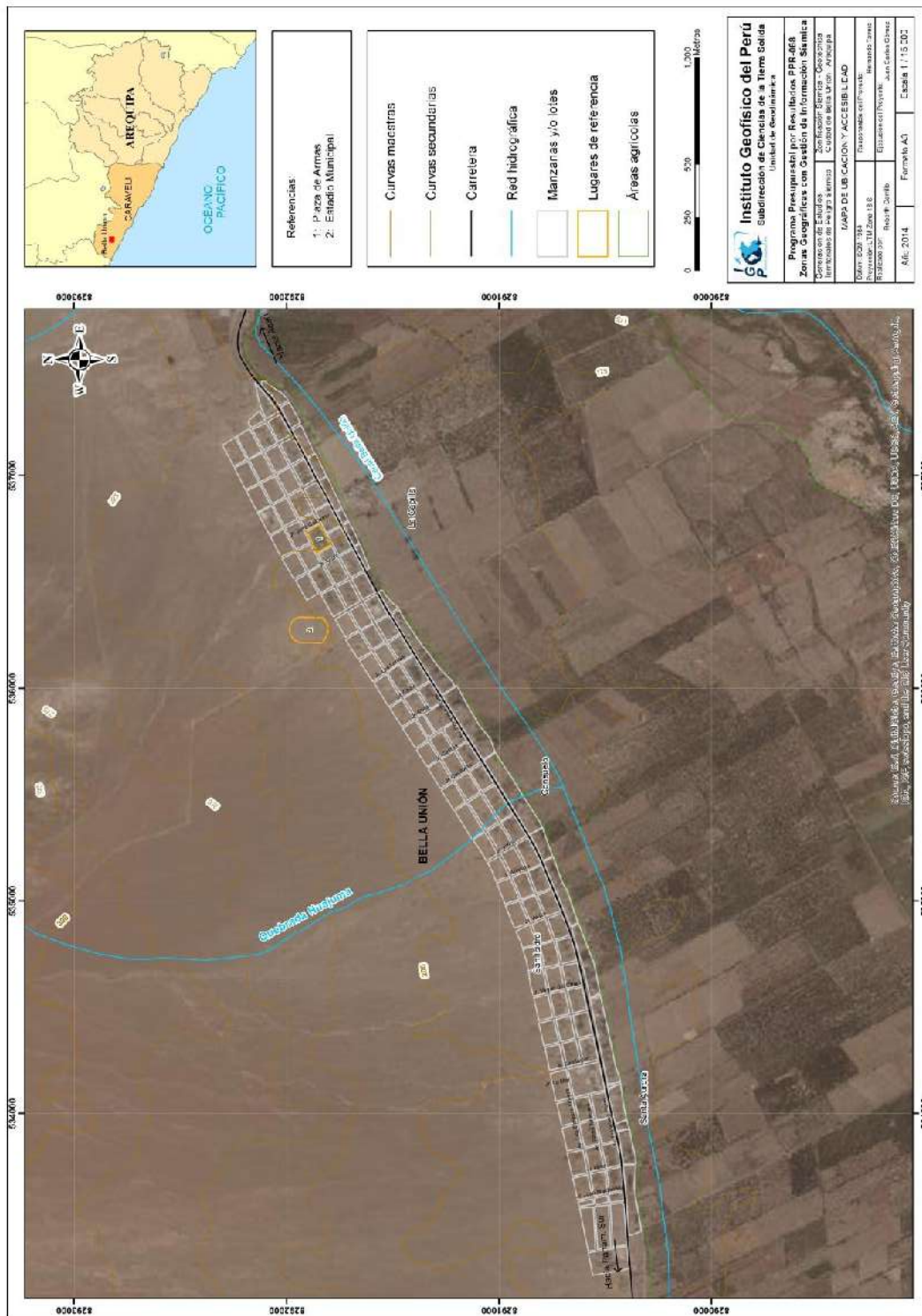


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa

4.- ANTECEDENTES

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

Por otro lado, a partir de los años 80, muchas de las ciudades costeras han soportado procesos continuos de migración de población proveniente de 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, tsunamis y otros efectos secundarios. A estas condiciones, se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables sin medir su vulnerabilidad e incrementando el riesgo en dichas zonas.

Considerando que el causante directo de los daños que producen los sismos en las ciudades, es la calidad de los suelos sobre el cual se encuentran las viviendas y otras obras de ingeniería, en el año 2005, la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora en la Gestión de Riesgos de Lima Metropolitana con el estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 Distritos de Lima y Callao (Microzonificación Sísmica), el mismo que se constituyó como información primaria y de base para cualquier otra investigación orientada a la gestión de riesgos (Figura 3). Como parte de este esfuerzo, el Instituto Geofísico del Perú, realiza estudios similares en los Distritos de Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino, permitiendo completar la información para el total de los distritos que conforman el área de la ciudad de Lima Metropolitana.

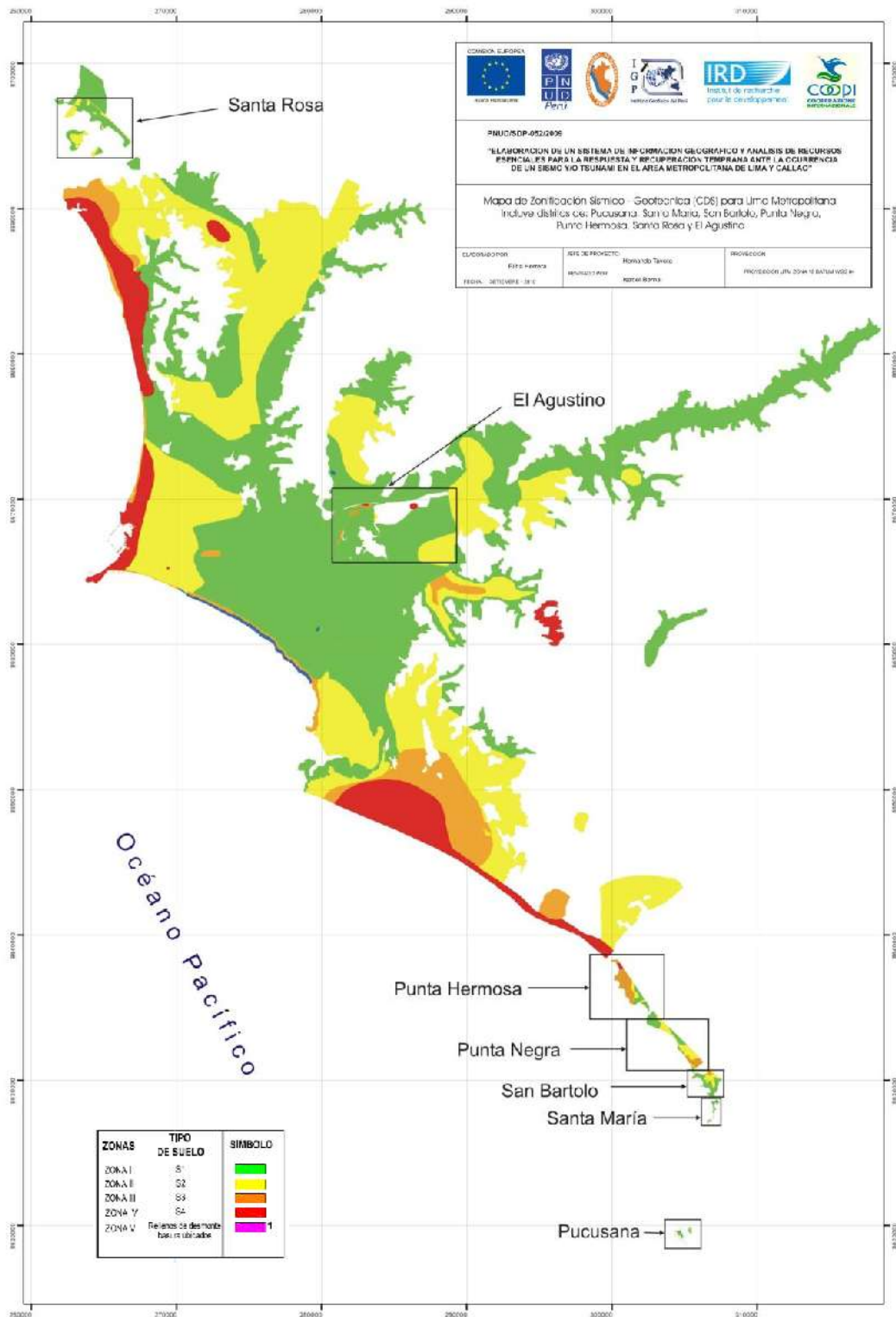


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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

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

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

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

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

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

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

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

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

En 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, Diseño Sismorresistente (2003)”. Básicamente, esta norma considera la clasificación de los suelos en función de sus propiedades mecánicas, espesor de estrato, período fundamental de vibración y velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s). La Norma E-030, establece que los suelos pueden ser clasificados en cuatro tipos:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos 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, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de λ es igual a 10 y el periodo dominante para una determinada estructura puede ser estimada con solo conocer el número de pisos de cada vivienda. Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

7.- METODOLOGÍA

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

7.1.- Estudios de Sismicidad

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

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

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

7.3.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

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

.- **Levantamiento Geológico y Geomorfológico.** Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características

geológicas y geomorfológicas de carácter local, considerando bases de datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.

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

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

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

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

.- **Densidad de Suelo in situ (Norma ASTM D1556):** Consiste en evaluar la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo. Para tal objetivo se realiza el ensayo de densidad de campo con el uso del

método del cono, lo cual permite conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación permite conocer la compactación de las partículas que conforman el suelo; por ejemplo, más compactos indica mayor resistencia a la deformación.

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

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

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

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

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

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

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

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

7.4.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

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

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

vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 4).



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

En la Figura 5, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto BU-26 presenta bajos niveles de ruido transitorio; mientras que, la señal en BU-80, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 6), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

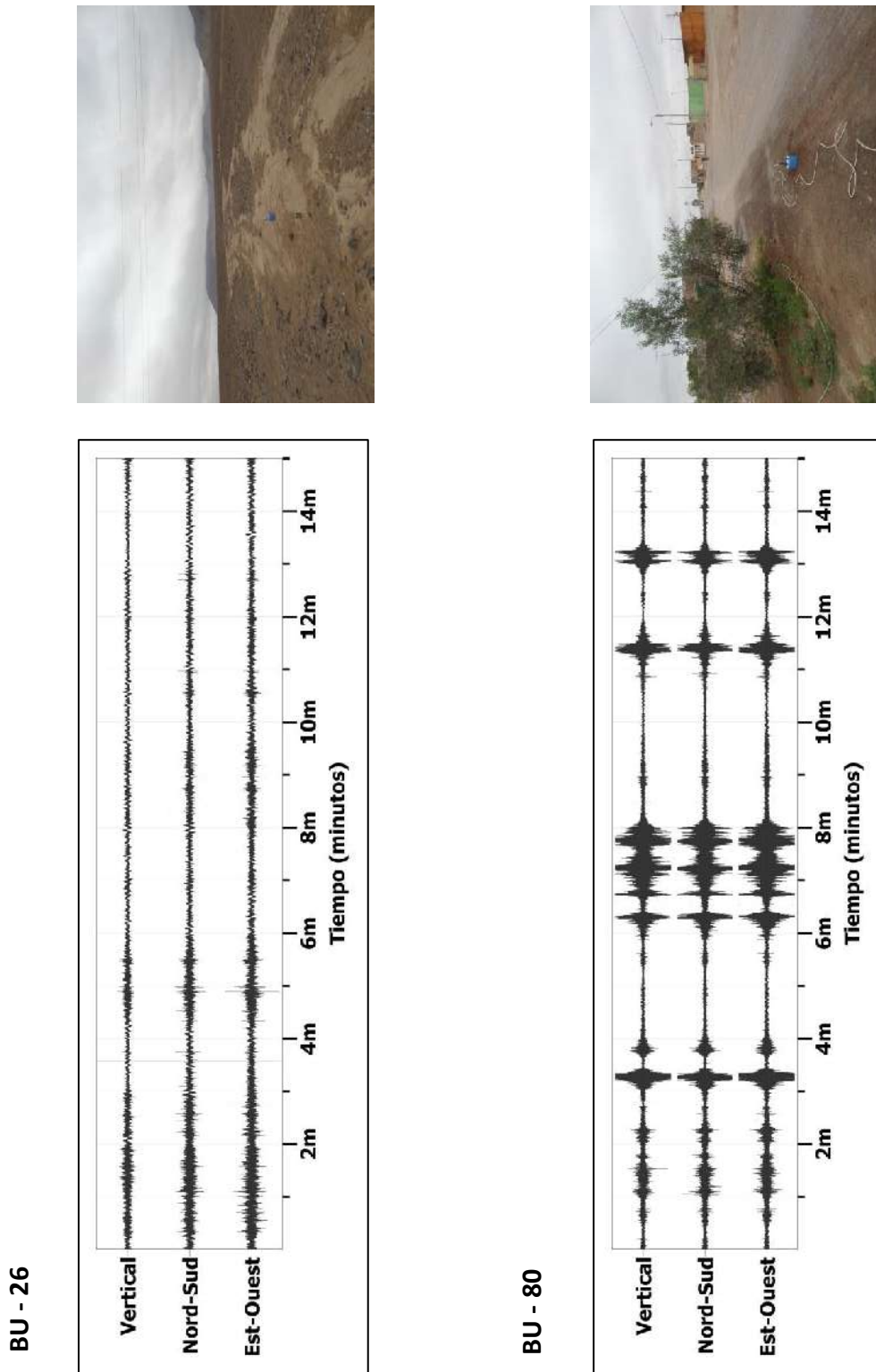
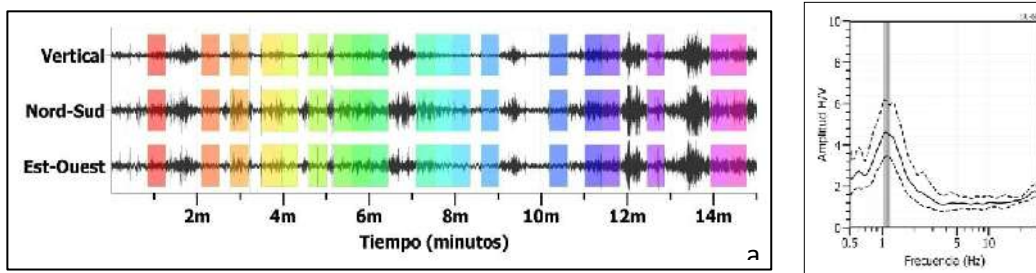


Figura 5: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro con presencia de ruido de fondo (BU-26) y otro con ruido transitorio (BU-80). Obsérvese las diferentes amplitudes de la 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 los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar. Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

BU - 66



BU - 92

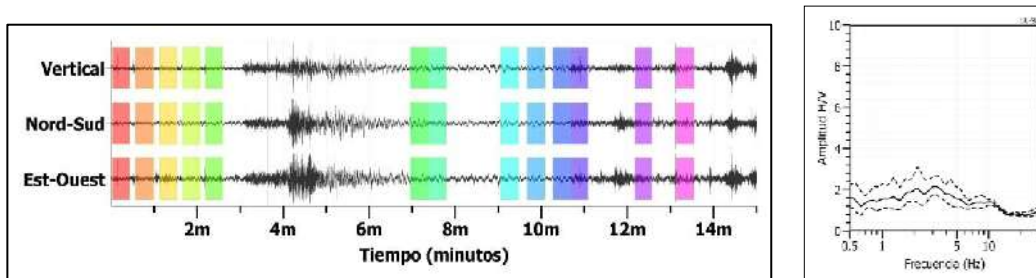


Figura 6: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. BU-66: Registros y razones H/V donde se identifica un pulso de frecuencia predominante, BU-92: Registros y razones H/V en los cuales no existe frecuencia predominante. Las líneas 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.

.- **Método de Arreglos Lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales (Figura 7). Con este procedimiento se pretende conocer la velocidad de las ondas de corte (ondas S) utilizando el método MASW; es decir, conocer los cambios de velocidades a lo largo de los diversos estratos existentes en el subsuelo.

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

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

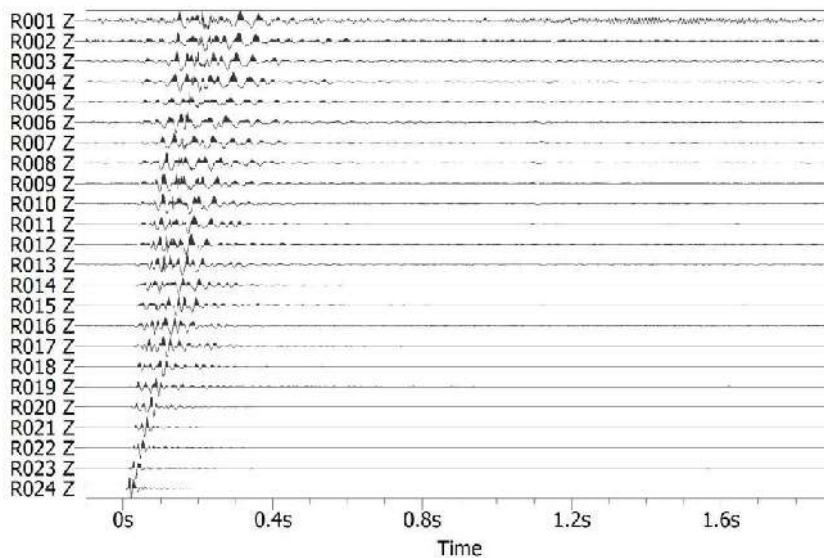


Figura 7: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica y ejemplo del tipo de registro obtenido en la ciudad de Bella Unión

Para el análisis de la información obtenida en campo se ha procedido con su calificación en función de la diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos (I : intensidad de corriente, V_p : diferencia de potencia y K : constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.



Figura 8: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Bella Unión

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

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

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

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

8.1.- Sismicidad

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

El día 25 de setiembre del 2013 (Tavera et al, 2013), el borde occidental de la región sur del Perú fue afectado con la ocurrencia de un sismo de magnitud 7.0 Mw (magnitud momento) que produjo en el borde costero intensidades máximas de VI (MM), ver Figura 10. Este evento produjo daños mayores en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca y Chala. El epicentro fue ubicado a 75 km en dirección SSO con respecto a la ciudad de Bella Unión, produciendo daños en viviendas de adobe y rajaduras en los muros de un gran número de viviendas de material noble (Figura 11).

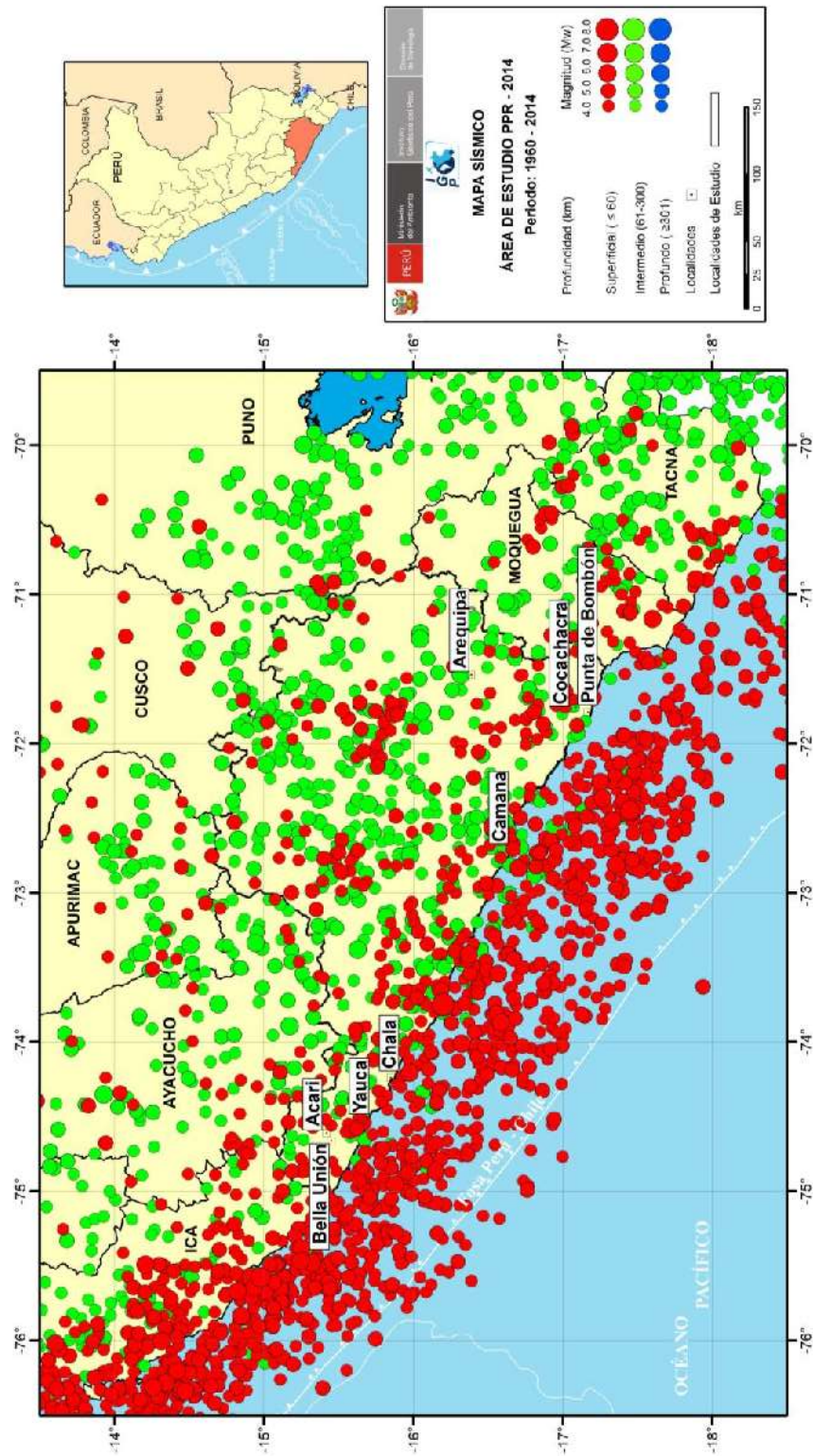


Figura 9: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

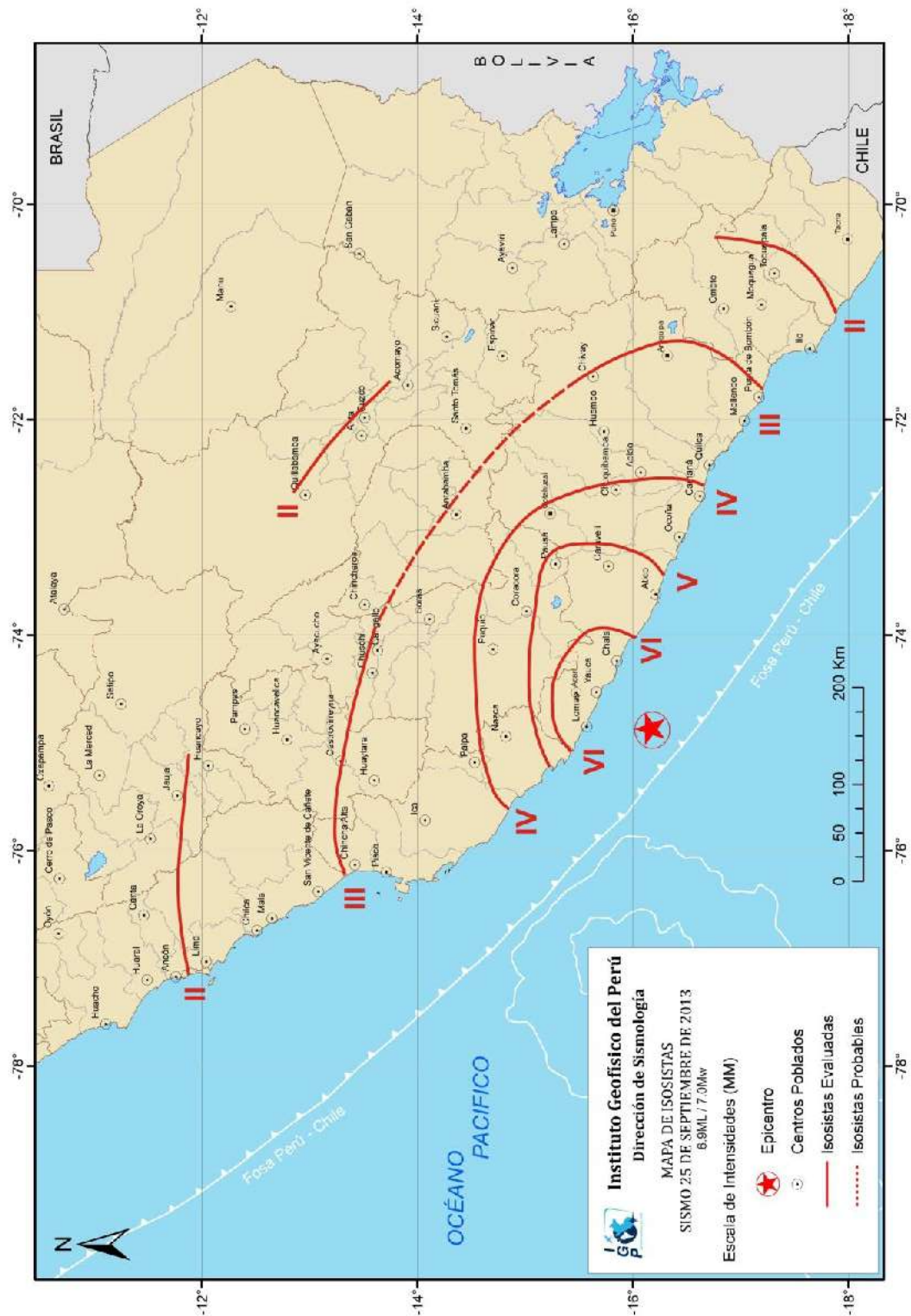


Figura 10: Mapa de intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 25 de septiembre de 2013. En la ciudad de Bella Unión las intensidades fueron de VI (MM).



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

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

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

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

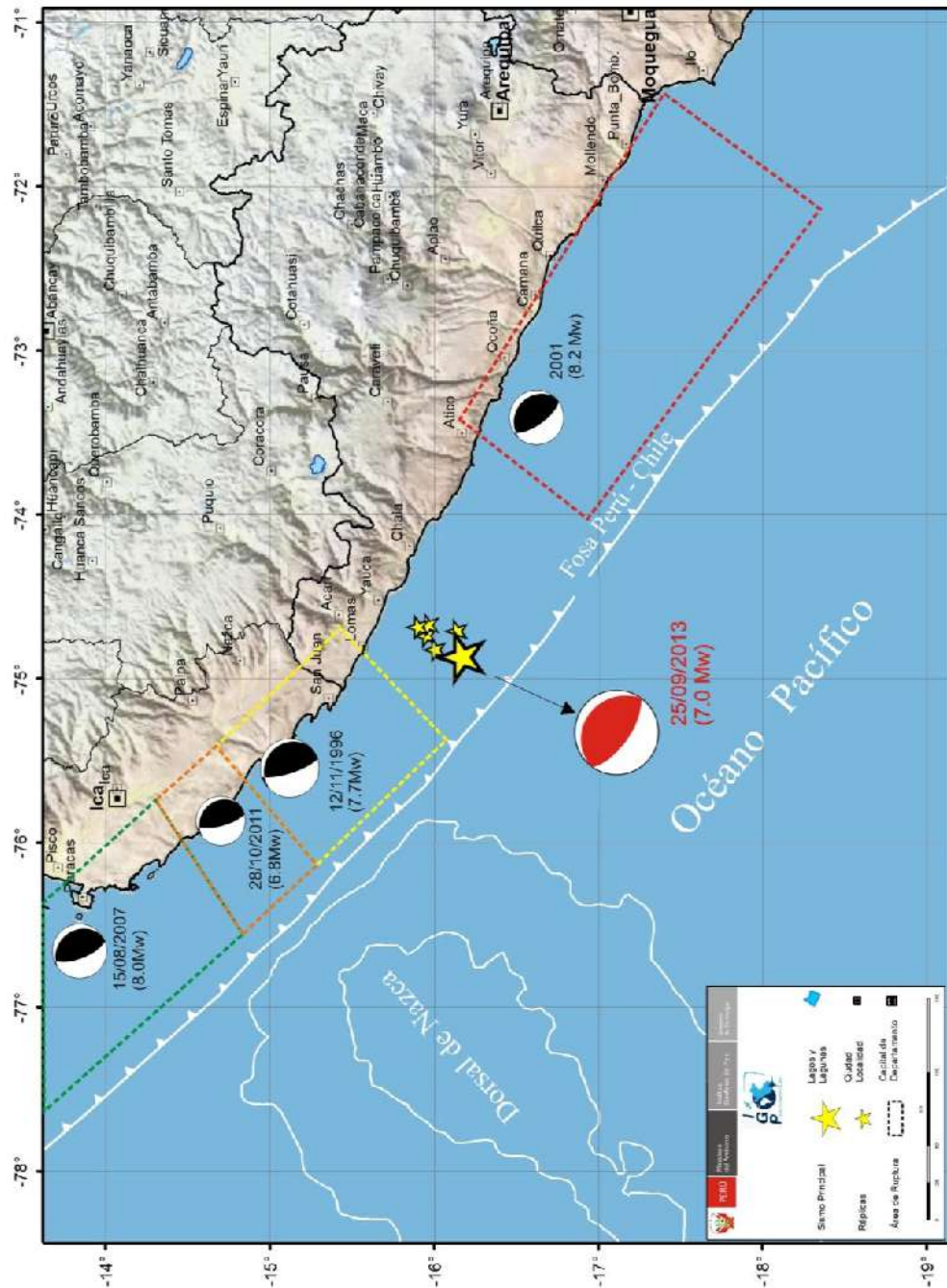


Figura 12: Distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de Nazca-1996, Pisco-2007, Ica-2011, Arequipa-2001 y Yauca-Acarí del 25 de septiembre del 2013. Los mecanismos focales indican el desarrollo de similares procesos de ruptura. El área de ruptura asociada al sismo de 1913 (7.7Ms) estaría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

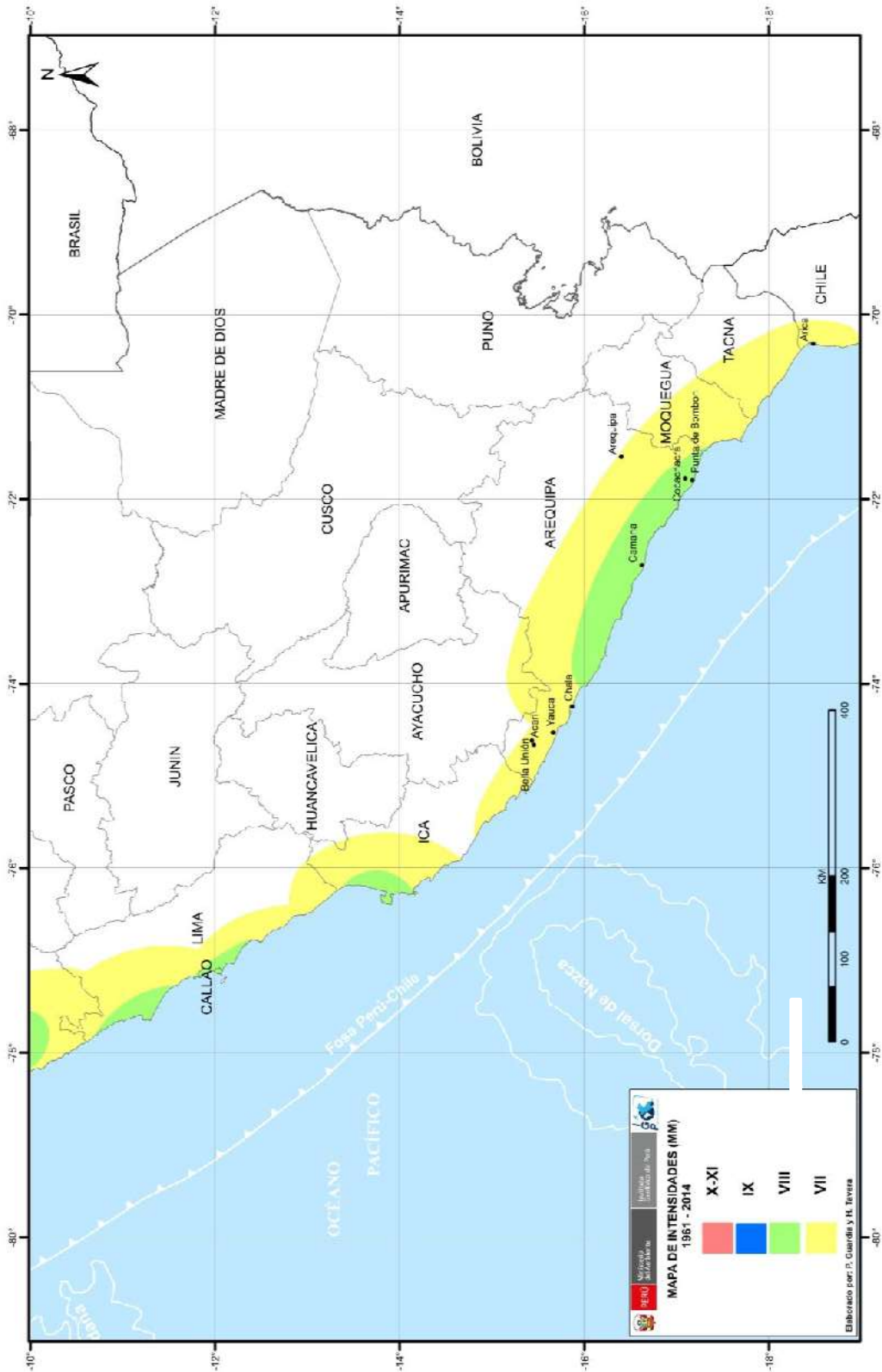


Figura 13: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que el sismo ocurrido en el año 2001 habría liberado aproximadamente el 60% de la energía acumulada en la zona costera de la región sur del Perú desde el año 1868; por lo tanto, la energía restante debe ser liberada por otro evento sísmico que involucra un área de ruptura por debajo de la península de Ilo, y que produciría en la ciudad de Punta de Bombón niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001. Esta información es corroborada por estudios realizados por Chilif et al (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En la Figura 14, se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-2 asociada al sismo de 1913, tal vez el sismo mayor ocurrido en esta zona y que tiene alta probabilidad de repetirse con una magnitud igual o mayor a 7 Mw. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

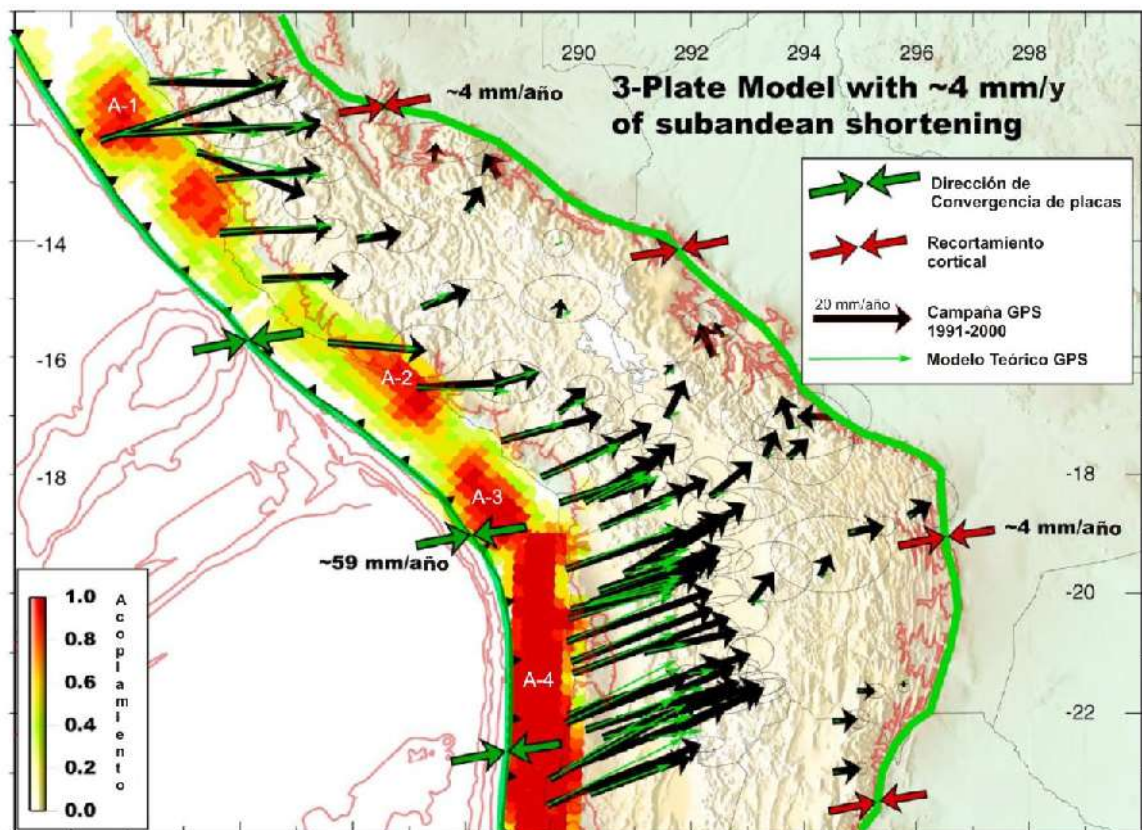


Figura 14: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de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

8.2.- Peligro Sísmico

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

Para el área que abarca la ciudad de Bella Unión se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 480 a 500 gals (Figura 15), equivalentes a intensidades del orden de VII-VIII (MM); es decir, suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos, tal como ocurrió con el sismo de Arequipa del 2001 (Tavera, 2001), Pisco 2007 (Tavera, 2008) y Yauca-Acari, 2013 (Tavera et al, 2013).

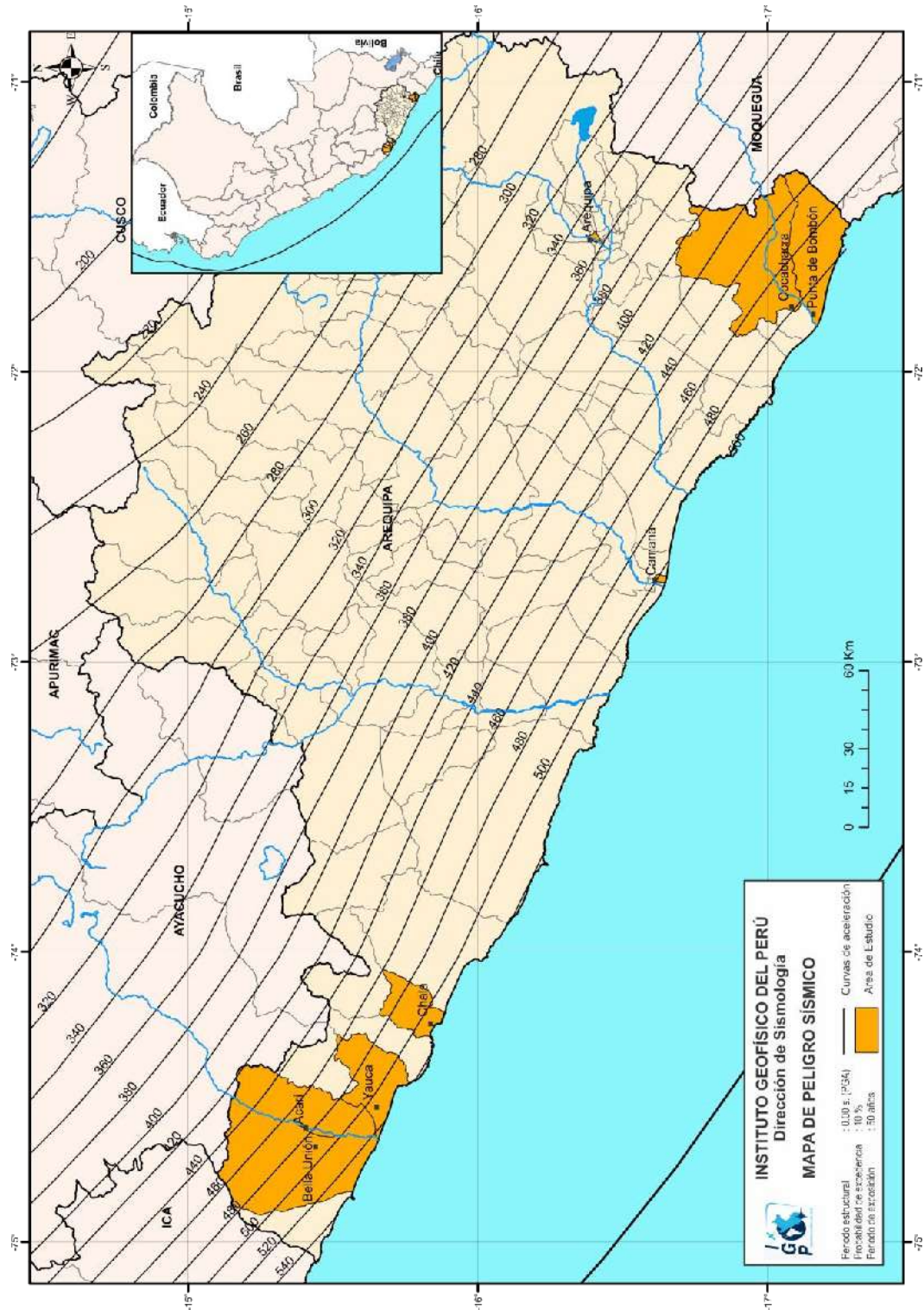


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

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

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

El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:5000, resolución espacial de 5 metros y referenciada al geoide WGS84/EGM96 (Zona 18S). La topografía se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica de fotografías aéreas de los años 1975 a 1990 a escala 1:15000. El MDT elaborado se presenta a escala gráfica de 1:15000 y cubre un área de 21 km² (Figura 16). La ciudad de Bella Unión se asienta sobre un abanico con cotas promedio entre 150 a 200 m.s.n.m., además de colinas que sobrepasan los 300 m.s.n.m.

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. La ciudad de Bella Unión se encuentra sobre un valle llano con pendientes de hasta 2° en promedio (Figura 17).

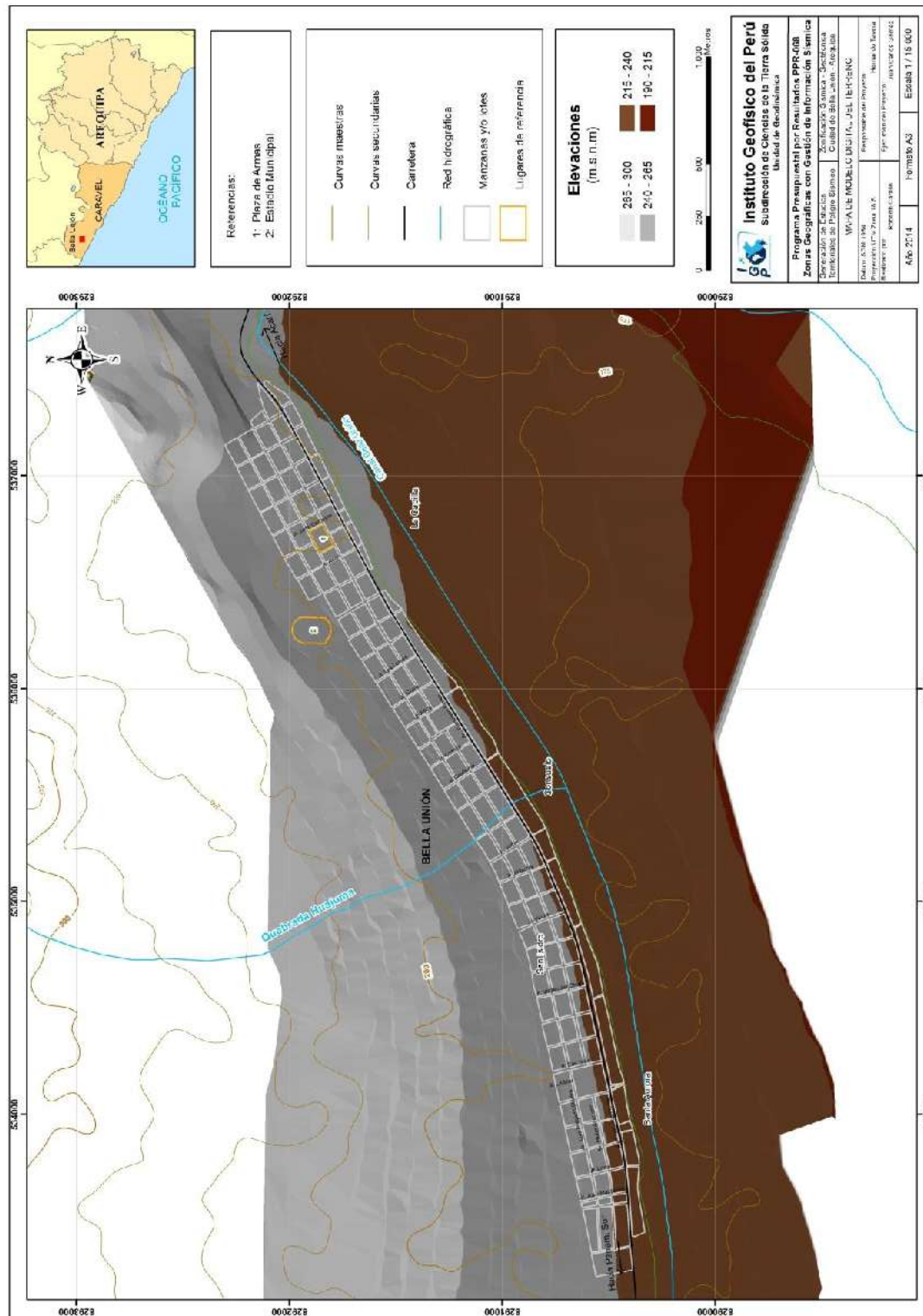


Figura 16: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Bella Unión y alrededores

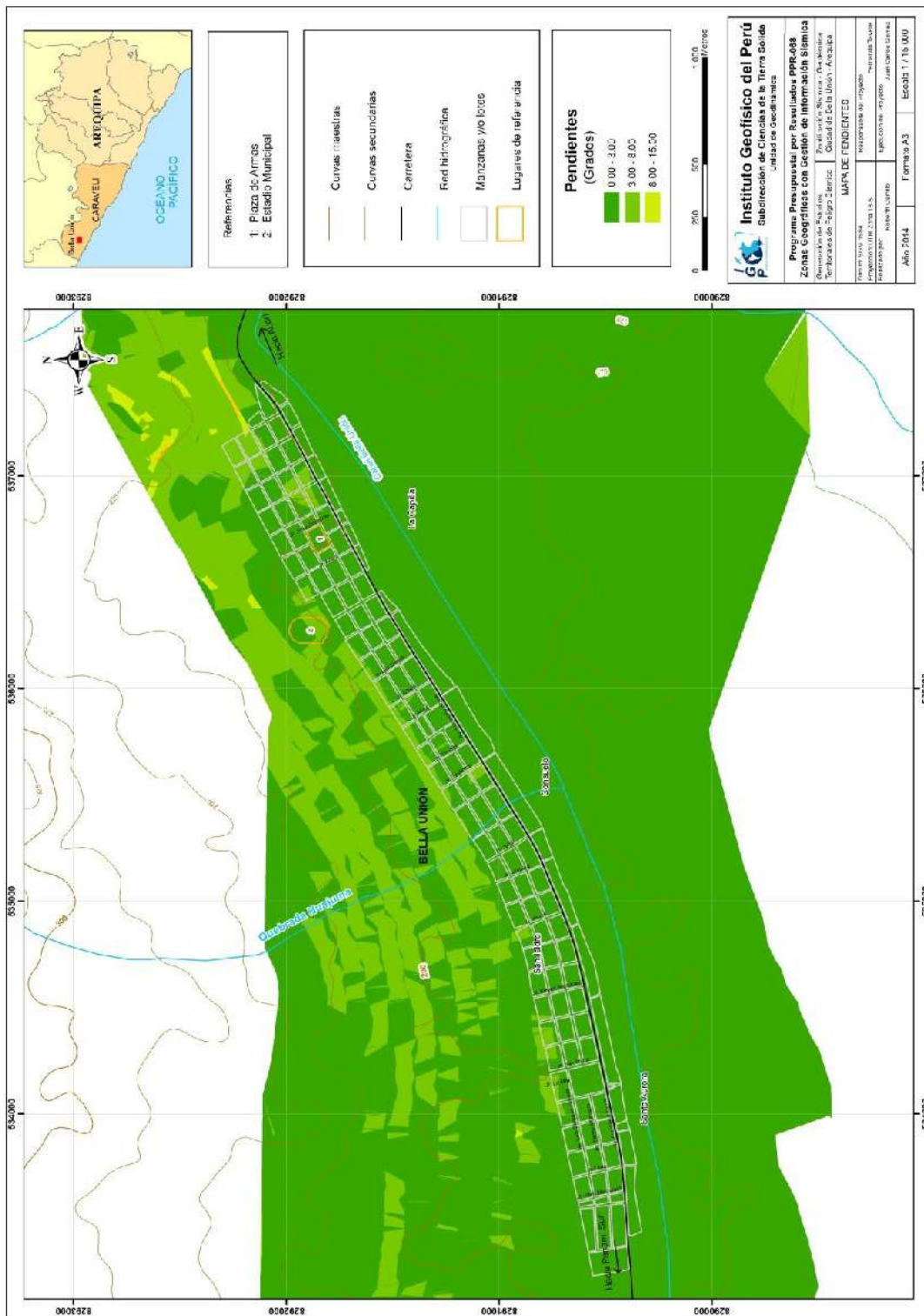


Figura 17: Mapa de pendientes para la ciudad de Bella Unión y alrededores

9.1.1. Unidades Geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Bella Unión se ha identificado la existencia de 5 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 18):

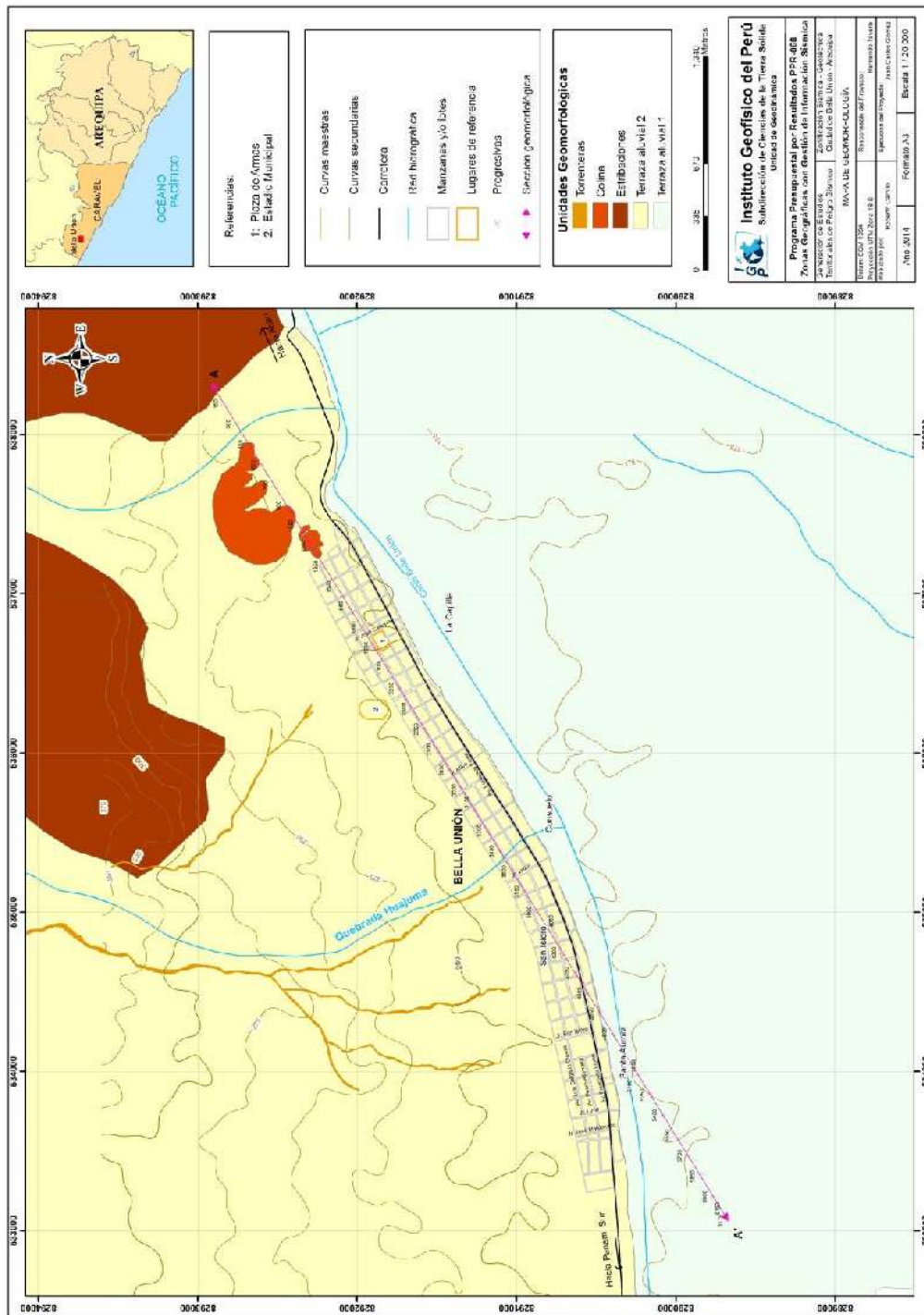


Figura 18 Mapa geomorfológico de la ciudad de Bella Unión y alrededores

9.1.1.1.- Origen Depositacional

La ciudad de Bella Unión se asienta sobre terrazas aluviales, que se encuentran conformadas por materiales heterogéneos (clastos angulosos a subredondeados envueltos en una matriz arenosa) de origen volcánico principalmente. Las terrazas son superficies ligeramente planas e inclinadas hacia el Suroeste, todas generadas por el aporte de materiales que han sido originados por procesos de erosión de rocas preexistentes, las mismas que han sido trasladadas desde el extremo norte de zona de estudio y posteriormente depositados en las inmediaciones de la ciudad de Bella Unión. A continuación, se describen las unidades reconocidas en campo:

*.- **Terraza aluvial 1:** Sobre esta unidad se asientan las zonas agrícolas de la ciudad, todas ubicadas en su extremo SE sobre una extensión del orden de 7.5 km. Los suelos superficiales están constituidos por arenas limosas y arenas finas; mientras que, el subsuelo está compuesto por suelo granular, (Figura 19).*



Figura 19: Terraza aluvial ubicada al Sur de la ciudad de Bella Unión. Obsérvese la presencia de áreas agrícolas.

.- Terraza aluvial 2: Depósitos formados debido a procesos de sedimentación ocurridos en las inmediaciones de la ciudad de Bella Unión, producto de los distintos procesos geodinámicos que han ocurrido en el extremo Norte de la ciudad. Las terrazas están constituidas por materiales heterogéneos (clastos y gravas angulosas) de origen aluvial, que en algunas secciones superan los 3 m de espesor. Sobre esta unidad se asienta la ciudad de Bella Unión y es afectada por flujos de lodos y detritos originados por la ocurrencia de precipitaciones pluviales extremas (Figura 20).



Figura 20: Terraza aluvial sobre la cual se asienta la ciudad de Bella Unión

9.1.1.2.- Origen Aluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968). En las inmediaciones de la ciudad de Bella Unión se ha identificado varios sistemas hidrológicos que se activan en épocas de precipitaciones pluviales extremas (Enero-Marzo) y permanecen inactivas el resto del año. Las comunes son conocidas como torrenteras y el agua que discurre por ellas, desde las partes altas, supera la capacidad de embalse haciendo que se desborde para provocar inundaciones y la generación de flujos de detritos causando daños a la infraestructura de la ciudad. La geoforma que comprende esta clasificación es:

.- **Las Torrenteras:** Se definen como cursos de aguas periódicos que no tienen un cauce definido, ya que se han generado por el cambio abrupto de las pendientes, desde la parte alta (estribaciones) hacia la zona urbana (terrazas aluviales). Estas se reactivan con las precipitaciones pluviales. Estas geoformas están presentes en el sector NO de la ciudad de Bella Unión y se extiende en dirección SE. Las torrenteras son el medio de transporte de materiales y sedimentos de origen aluvial (Figura 21).



Figura 21: Torrentera ubicada en el extremo NO de la ciudad de Bella Unión. Las flechas indican la dirección de la pendiente y el flujo de materiales heterogéneos.

9.1.1.3.- Origen Tectónico

Entre las geoformas comprendidas en esta clasificación destacan aquellas que se encuentran vinculadas al levantamiento de la Cordillera de la Costa, por ejemplo la presencia de colinas de poca elevación y las estribaciones que se formaron por la génesis e intrusión de rocas hipabisales (roca ígnea formada a profundidades intermedias) que se originaron durante el Cretáceo Superior. Las características de estas unidades son:

.- **Colinas:** Son geformas de poca elevación (100 a 200 metros) y en general, de forma cónica que se encuentra en el extremo NE de la ciudad de Bella Unión. Su morfología es ondulada y la pendiente de sus laderas no sobrepasa los 30° de inclinación, estando generalmente cubiertas por material de origen intrusivo, volcánico y en menor cantidad de cuarcitas. Estas unidades se han formado como producto de la deposición de materiales de origen aluvial proveniente de las partes altas de la ciudad (extremo norte), Figura 22.



Figura 22: Colinas ubicadas en el extremo NO de la ciudad de Bella Unión

.- **Estribaciones:** Esta unidad geomorfológica comprende montañas que alcanzan alturas entre 800 a 1200 m.s.n.m., todas formadas por la presencia de esfuerzos tectónicos compresivos que dieron origen a la cordillera. Estas unidades están constituidas principalmente por rocas intrusivas del Batolito de la Costa; además, presentan topografía abrupta y están disectadas por numerosas quebradas. La unidad está presente en el extremo norte de la ciudad de Bella Unión, Figura 23.



Figura 23: Vista de algunas estribaciones ubicadas en el extremo norte de la ciudad de Bella Unión

9.2.- Geología

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

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

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

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






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

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

9.2.1- Geología Regional

En base a la información geológica regional publicada por Caldas (1978) - Cuadrángulos Geológico de Acarí, San Juan y Yauca, Boletín N°30 (Hoja 31-n, escala 1/100,000)- y actualizada por León y Torres (2001), se ha construido la columna cronolitoestratigráfica de las principales unidades que afloran en la ciudad de Bella Unión y alrededores (Tabla 1). Estas unidades del Mesozoico Inferior hasta el Cuaternario Reciente, están conformadas por rocas volcánicas y sedimentarias en menor proporción, de las cuales se tiene como substrato rocoso a la Formación Guaneros (Js-gu), constituida principalmente por tobas intercaladas con niveles de areniscas tobáceas, seguida de unidades Cretácicas del Grupo Yura. Este último, conformado por la Formación Hualhuani (Ki-hu) compuesta por areniscas cuarzosas con intercalaciones de capas delgadas (menores a 0.50 centímetros) de limolitas, suprayaciendo a esta unidad litológica se encuentra la Formación Copara (Ki-co) conformada por tobas vítricas bien estratificadas.

Tabla 1: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades que afloran en las inmediaciones de la ciudad de Bella Unión.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Aluviales Qh-al 	
		Pleistoceno		
	NEOGENO	Plioceno		
		Mioceno		
MESOZOICO	CRETACEO	Superior		Linga Cuarzo monzonita Ks-li/mz 
		Inferior	Form. Copara Ki-co  Form. Hualhuani Ki-hu 	Gpo. Yura
	JURACICO	Superior	Form. Guaneros Js-gu 	
		Medio		

En el extremo norte de la ciudad se distingue la presencia de afloramientos de roca intrusiva pertenecientes a la Súper unidad Linga del Cretáceo Superior, conformada por cuarzo monzonita (Ks-li/qmz). Finalmente, en el Cuaternario se encuentran depósitos aluviales (Qh-al), compuestos por materiales heterogéneos como gravas redondeadas a subredondeadas envueltas en una matriz arenolimosas.

9.2.2- Geología Local

Para la elaboración del mapa geológico local se ha considerado la recopilación de la información publicada por INGEMMET (Caldas, 1978), mapas geológicos y estudios neotectónicos. Posteriormente, en campo se realizó la delimitación de las principales unidades geológicas aflorantes a fin de obtener el mapa geológico a escala 1:25000 (Figura 24) y sobre el cual se ha identificado las siguientes unidades geológicas:

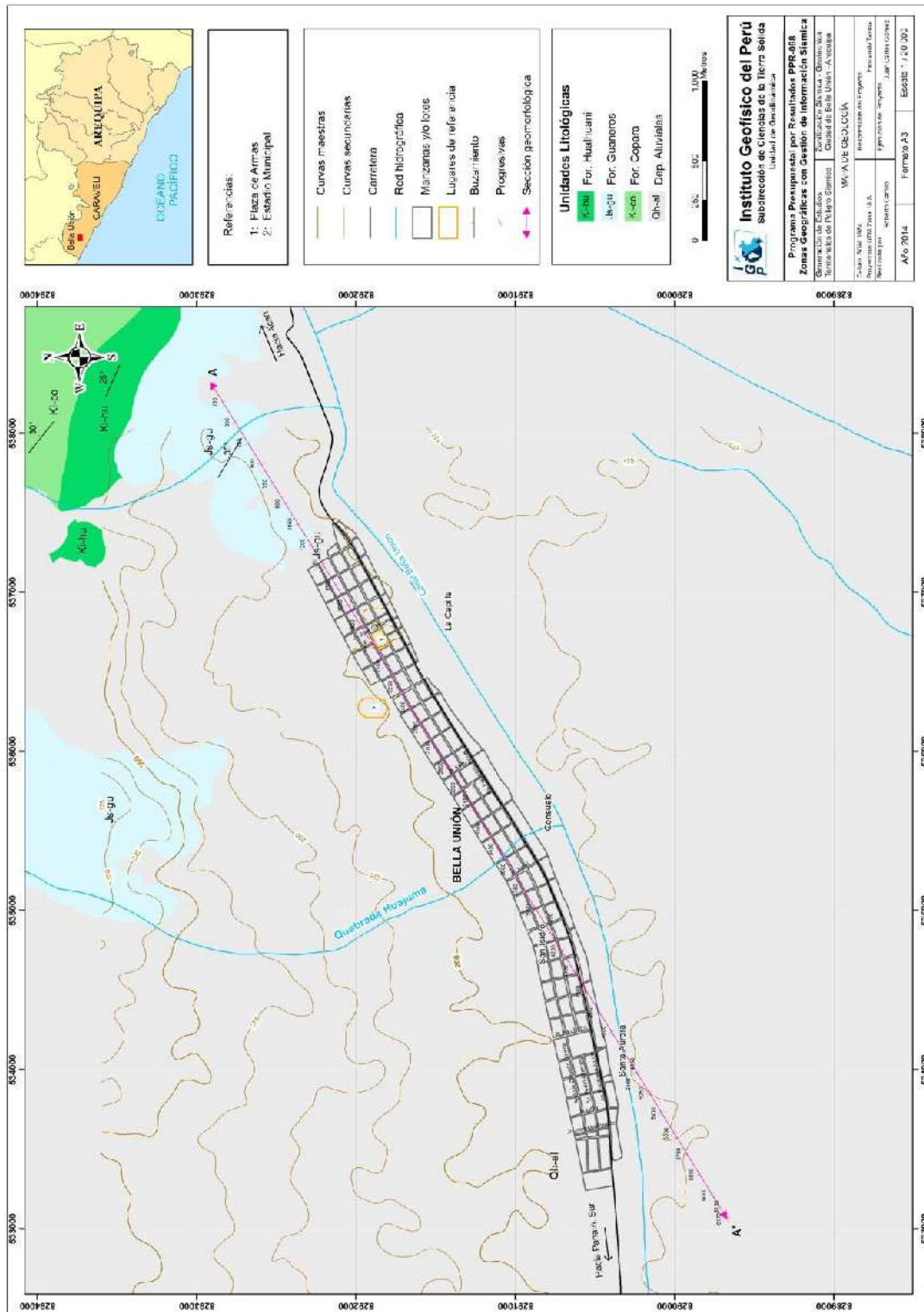


Figura 24: Mapa geológico local de la ciudad de Bella Unión y alrededores

*.- **Formación Guaneros (Js-gu):** Unidad litológica que comprende parte del Jurásico Medio y Superior, está constituida por pseudo estratos de rocas volcánicas tipo tobas vítreas con niveles de areniscas tobáceas y con estratos delgados de calizas gris oscuras. Esta unidad se encuentra aflorando en el sector La Capilla, ubicado a 700m al NE de la ciudad de Bella Unión (Figura 25).*



Figura 25: Tobas vítreas de color gris ubicadas a 700 m en dirección NE de la ciudad de Bella Unión, Sector La Capilla.

*.- **Formación Hualhuani (Ki-hu):** Unidad perteneciente al Grupo Yura y es parte de la base del Cretáceo inferior, conformada por areniscas cuarzosas blanquecinas y fracturadas. Se encuentra intercalada con delgadas capas de limolitas de color gris. Esta unidad aflora a 2 km al NE de la ciudad de Bella Unión, Figura 26.*

*.- **Formación Copara (Ki-co):** Esta unidad se encuentra suprayaciendo a la Formación Hualhuani en una ligera discordancia angular. Está conformada por tobas vítreas y brechas color gris oscuro a tonos violáceos. Se encuentra aflorando a 2.2 km al NE de la ciudad de Bella Unión, Figura 27.*

*.- **Súper Unidad Linga:** Unidad perteneciente al Cretáceo Superior y esta conformada por rocas intrusivas tipo cuarzo – monzonita. Se encuentran aflorando al norte de la ciudad de Bella Unión.*



Figura 26: Areniscas cuarzosas intercaladas con material fino tipo limolitas ubicadas a 2 km al NE de la ciudad de Bella Unión.



Figura 27: Brechas violáceas de la formación Copara ubicadas a 2.2 km al NE de la ciudad de Bella Unión.

.- Depósitos Cuaternarios: Son materiales constituidos principalmente por depósitos aluviales (Qh-al) como resultado de los procesos de erosión vinculados a las torrenteras, quebradas, etc. Estos son transportados aguas abajo y depositados en zonas bajas (terrazas). Esta unidad pertenece al Cuaternario Reciente (Holoceno) y está constituida por materiales aluviales (gravas heterogéneas conformadas por clastos angulosos y subredondeados) que se encuentran envueltos en matriz areno-limosa. En conjunto conforman una terraza aluvial con espesores mayores a 2.5 metros y sobre la cual se encuentra la ciudad de Bella Unión, Figura 28.



Figura 28: Material aluvial constituido por clastos heterogéneos anguloso a subredondeados ubicados en las inmediaciones del estadio Municipal.

9.2.3- Geología Estructural

Durante el Jurásico Superior, se produjeron esfuerzos tectónicos de distensión relacionados con la tectónica Nevadiana y que dieron origen a la presencia de rocas volcano-sedimentarias. Del mismo modo, durante el Mesozoico Superior se formaron series de rocas volcánicas como producto de la reactivación de fallas profundas, dando lugar a la generación del Grupo Yura y la Formación Copara. Asimismo, en el Cretácico Superior se emplazaron rocas intrusivas que afloran en el sector Norte de la ciudad de Bella Unión como resultado de fallamientos

presentes en la zona continental. Este proceso generó el ascenso de andesitas pertenecientes al Batolito de la Costa. Actualmente, las rocas se encuentran meteorizadas e intemperizadas como consecuencia de los distintos agentes de geodinámica externa, ellas presentan buzamientos hacia el NO y SE con inclinaciones entre 25° y 30°.

9.3.- Geodinámica

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

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

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

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

territorio peruano son debidas a la presencia de “El Niño” y a otros factores relacionados con la actividad antrópica.

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

9.3.1.- Movimientos en Masa

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). Para proceder a la clasificación de los movimientos en masa en la ciudad de Bella Unión, se hace uso de las tablas propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), las mismas que tienen en cuenta el tipo de movimiento y el tipo de material. En cuanto al primero, se considera 5 clases: caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Dentro de los materiales se consideran: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras. El trabajo de campo realizado en la ciudad de Bella Unión y alrededores, ha permitido identificar movimientos de masa del tipo flujos de detritos (tipo de material), siendo sus características las siguientes (Figura 29):

***.- Flujo de detritos:** En este tipo de eventos, los sedimentos controlan el flujo y predominan sobre la fase granular, son rápidos y turbulentos, discurren a lo largo de las torrenteras ubicadas mayormente en la parte NO de la ciudad de Bella Unión. La pendiente del terreno, la escasa vegetación y antiguos flujos condicionan la ocurrencia de estos flujos; mientras que, las precipitaciones pluviales son el factor detonante.*

En el área de estudio, los flujos están conformados por gravas, clastos y bloques angulosos mal gradados con tamaños de hasta 10 cm de diámetro promedio, los cuales son transportados en suspensión por una matriz areno limosa. Estos flujos se desplazan desde las partes altas (estribaciones), continúan hasta la población en dirección NS, afectando a los pobladores ubicados en el extremo occidental del estadio municipal (sector San Isidro y Santa Fe), Figura 30.

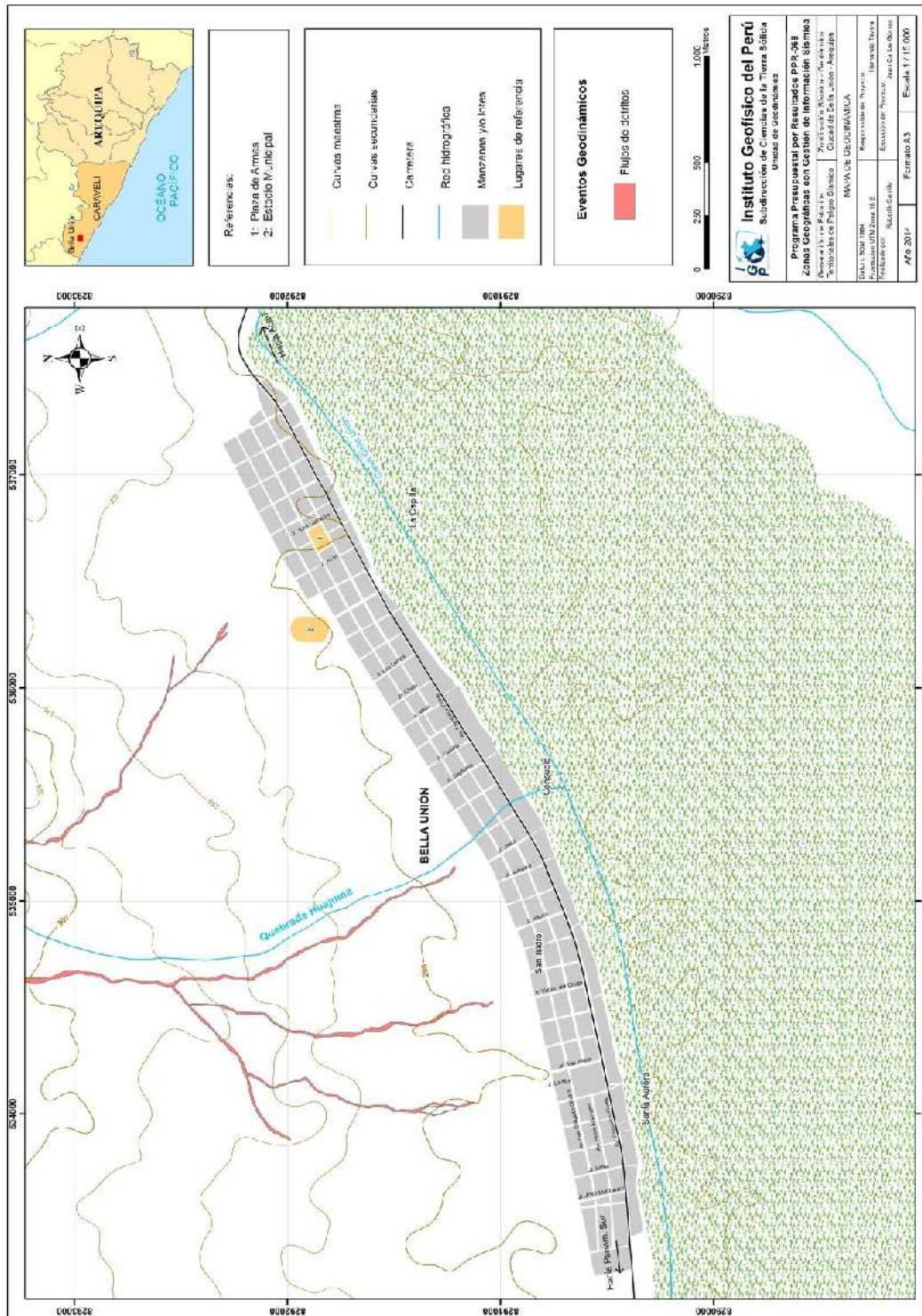


Figura 29: Mapa geodinámico para la ciudad de Bella Unión y alrededores



Figura 30: Depósitos de flujos de detritos antiguos que provienen de las torrenteras que se encuentran en las partes altas hasta la zona urbana de la ciudad. Los materiales son heterogéneos mal clasificados.

En el informe elaborado para el Plan de Desarrollo Urbano de Bella Unión, Convenio: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y la Municipalidad de Bella Unión (Febrero 2011), se han identificado la presencia de flujos de lodo que discurren por el cerro La Loza (ubicado en las estribaciones, parte alta de la pampa Pedregal), a través de una torrentera ubicada en las inmediaciones del cementerio de la localidad. Los flujos al descender afectaron los Jirones. Nicolás de Piérola y Jaqui. Del mismo modo, el flujo proveniente del cerro La Arena afectó zonas aledañas al sector la Capilla, produciendo problemas en las vías de transporte aledañas.

De manera complementaria, según testimonios de los pobladores, en el año 2000 se produjeron flujos que afectaron a la ciudad de Bella Unión, ya que los materiales llegaron hasta la zona urbana, atravesando la Av. Francisco Flores. Ante estos eventos no se tomaron las medidas respectivas, además no existe un sistema de drenaje y muros de contención ante precipitaciones pluviales extremas que se puedan presentar.

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 Bella Unión se recolectó información según las siguientes técnicas:

- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Bella Unión se construyeron 7 calicatas (Tabla 2 y Figura 31), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.4 metros y la mínima de 1.2 metros (ver Anexos). La profundidad varía porque en algunos suelos se encontró materiales muy compactos y difíciles de escavar como caliches.

Tabla 2: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
CB-01	537297	8292173	247	3.00
CB-02	536937	8291995	248	2.50
CB-03	536342	8291676	246	3.30
CB-04	535572	8290975	238	2.90
CB-05	534614	8290710	243	3.40
CB-06	533137	8290401	237	1.20
CB-07	535531	8291315	253	3.30

- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó el ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 3 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación.

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 7 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 4), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 0.4 metros y la mínima de 0.1 metros (ver Anexos). Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no

existe información geotécnica a fin de tener mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Bella Unión.

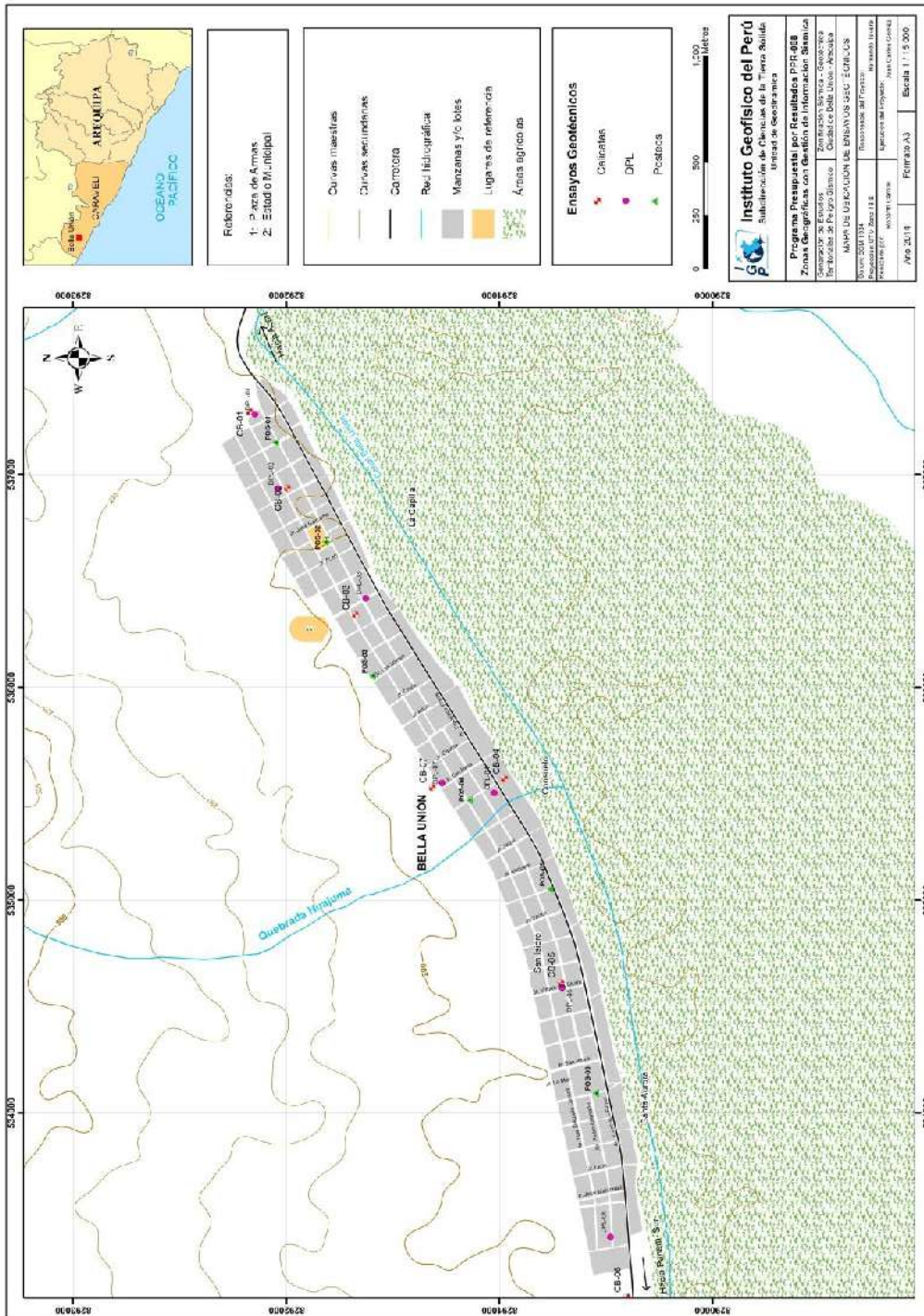


Figura 31: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Bella Unión

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

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDAD (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
CB-01	DC-CB-01	3.00	1.75	1.73
CB-02	DC-CB-02	3.10	1.79	1.78
CB-03	DC-CB-03	3.30	2.13	2.13
CB-04	DC-CB-04	2.90	1.55	1.54
CB-05	DC-CB-05	3.40	2.10	2.08
CB-06	DC-CB-06	1.30	1.65	1.61
CB-07	DC-CB-07	3.30	1.64	1.62

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

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACION (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
POS-01	537148	8292050	247	0.10
POS-02	536680	8291816	247	0.35
POS-03	536051	8291596	250	0.25
POS-04	535469	8291142	247	0.30
POS-05	535050	8290760	239	0.40
POS-06	534092	8290548	240	0.20
POS-07	532645	8290325	237	0.15

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 7 puntos dentro de la ciudad de Bella Unión (Tabla 5). Esto ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 0.40 metros y mínima de 0.05 metros debido a que los suelos son de origen aluvial, conformados por gravas y arenas bien gradadas, ángulos de fricción entre 31° y 42°, propios de suelos granulares con resistencia al corte (ver Anexos).

- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D3080): Para conocer la resistencia de los suelos al corte, se procedió a enviar al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina las 7 muestras extraídas de campo y los resultados se muestran en la Tabla 6. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Bella Unión no presentan cohesión; mientras que, los ángulos de fricción interna superan los 35°, propios de arenas sueltas bien graduadas con contenido de gravas.

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

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
DPL-01	537284	8292148	247	0.15
DPL-02	536934	8292039	250	0.37
DPL-03	536419	8291627	244	0.05
DPL-04	535504	8291023	242	0.40
DPL-05	534589	8290705	243	0.10
DPL-06	533418	8290479	240	0.07
DPL-07	535551	8291269	250	0.35

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

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m ²)	Densidad natural (gr/cm ³)
CB-01	35.24	0.00	1.85
CB-02	35.32	0.00	1.84
CB-03	37.59	0.00	1.95
CB-04	37.65	0.00	1.96
CB-05	37.80	0.00	1.96
CB-06	35.48	0.00	1.86
CB-07	37.79	0.00	1.97

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad de carga admisible. De los ensayos de corte directo se hace uso los datos del ángulo de fricción y la cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3 definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Bella Unión, los valores de capacidad de carga fueron calculados para una profundidad de cimentación de 1.2 metros y ancho mínimo de cimentación de 1 metro (Tabla 7). La clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 8 y los resultados de muestran en la Figura 32.

Según estos resultados, la ciudad de Bella Unión se asienta sobre suelos con capacidad portante alta (>3 kg/cm²), correspondiendo a suelos compactos de origen aluvial y resistentes al corte.

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

MUESTRA	Capacidad de carga ultima (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
CB-01	130.25	3.26
CB-02	131.07	3.28
CB-03	193.64	4.84
CB-04	196.36	4.91
CB-05	200.66	5.02
CB-06	135.62	3.39
CB-07	201.39	5.03

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

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

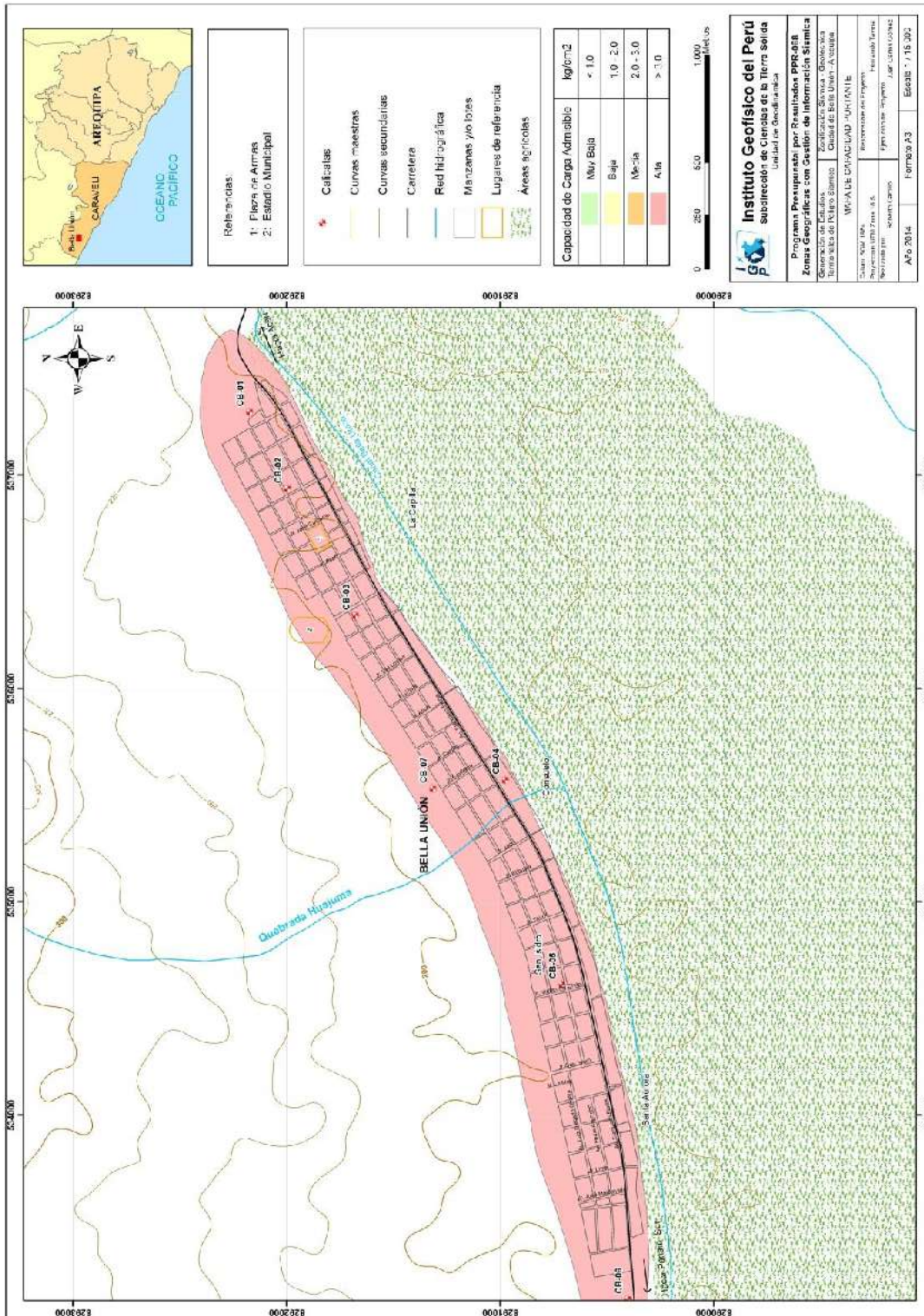


Figura 32: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Bella Unión y alrededores

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada en las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos en los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se procedió a proponer la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Bella Unión. Se ha identificado la existencia de 3 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 33):

*.- **Suelos tipo GW:** Estos suelos están conformados por grava arenosa bien graduada con poco contenido de material fino (2%). El contenido de humedad es de 3.20 %, se constituyen como suelos semi-compactos y no presenta plasticidad (debido al poco contenido de material fino). Los suelos presentan valores de capacidad de carga admisible de 4 Kg/cm². Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 12 % de la superficie en la cual se encuentra la ciudad. Este suelo está presente en la calicata 03 (CB-03) ubicada a 380 m al SO de la plaza central de la ciudad de Bella Unión.*

*.- **Suelos tipo GP:** Están conformados por gravas arenosas mal gradadas con contenido de humedad de 3.20 % a 4.60 %. Estos suelos se consideran como semicompactos, no presentan plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino) y sus valores de capacidad de carga admisible están entre 3.39 y 5.03 Kg/cm². Estos suelos ocupan el 73 % de la superficie de la ciudad de Bella Unión, extremo occidental de la ciudad, desde el Jr. Ático hacia el Oeste.*

*.- **Suelos tipo SW:** Están conformados por arenas gravosas limosas, siendo su contenido de humedad de 3.10% a 3.20%; por lo tanto, su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos, no presentan plasticidad y su capacidad de carga admisible es de 3.26 y 3.28 Kg/cm². Estos suelos representan el 12 % del área de la ciudad.*

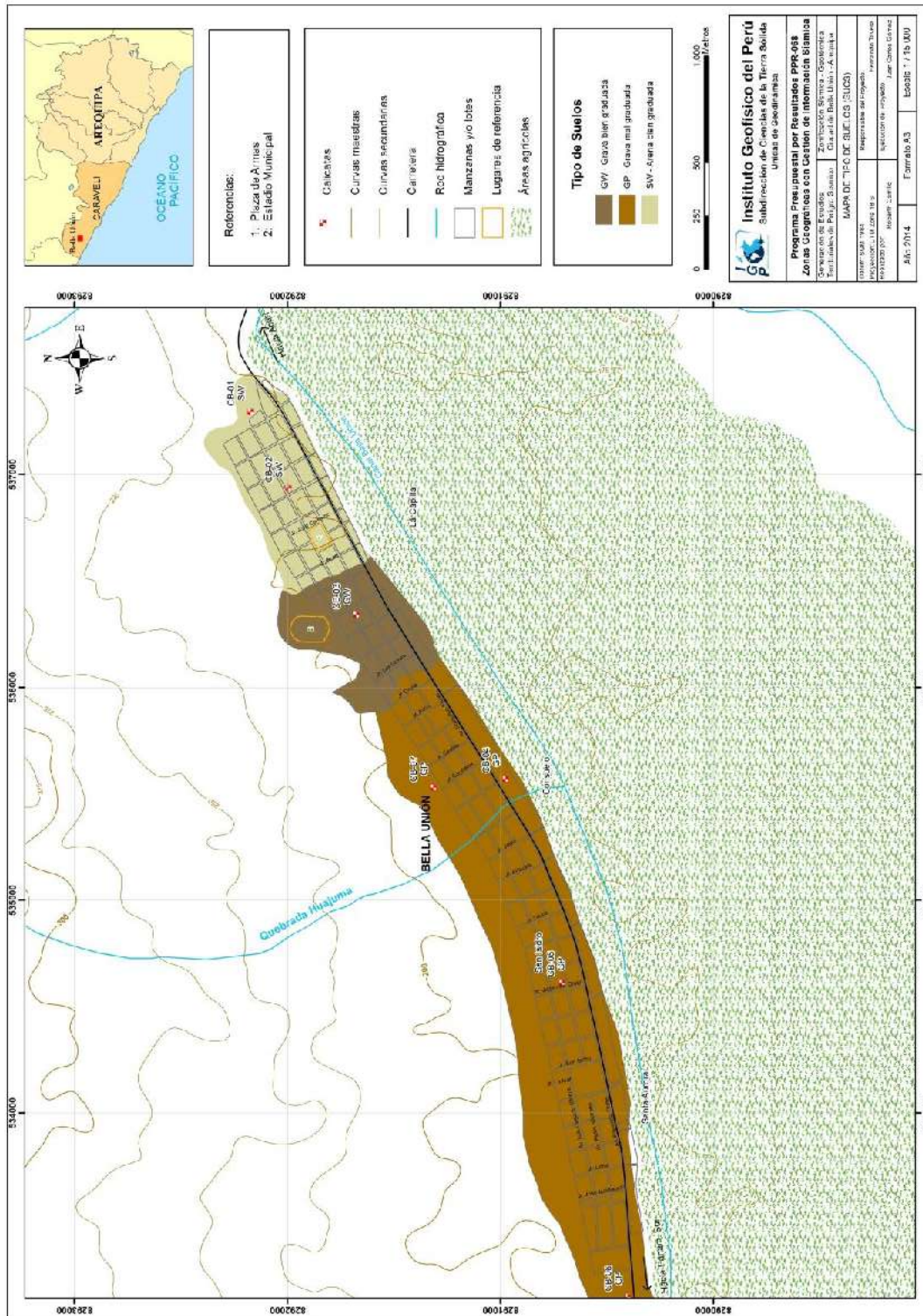


Figura 33: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Bella Unión y alrededores

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

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

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 Bella Unión, a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En la Figura 34 se muestra la distribución espacial de los 95 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa. En la Figura 35 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto BU-67. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 15 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, la frecuencia predominante a 1.26 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que a la frecuencia de 1.26 Hz la energía se irradia en dirección norte-sur. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

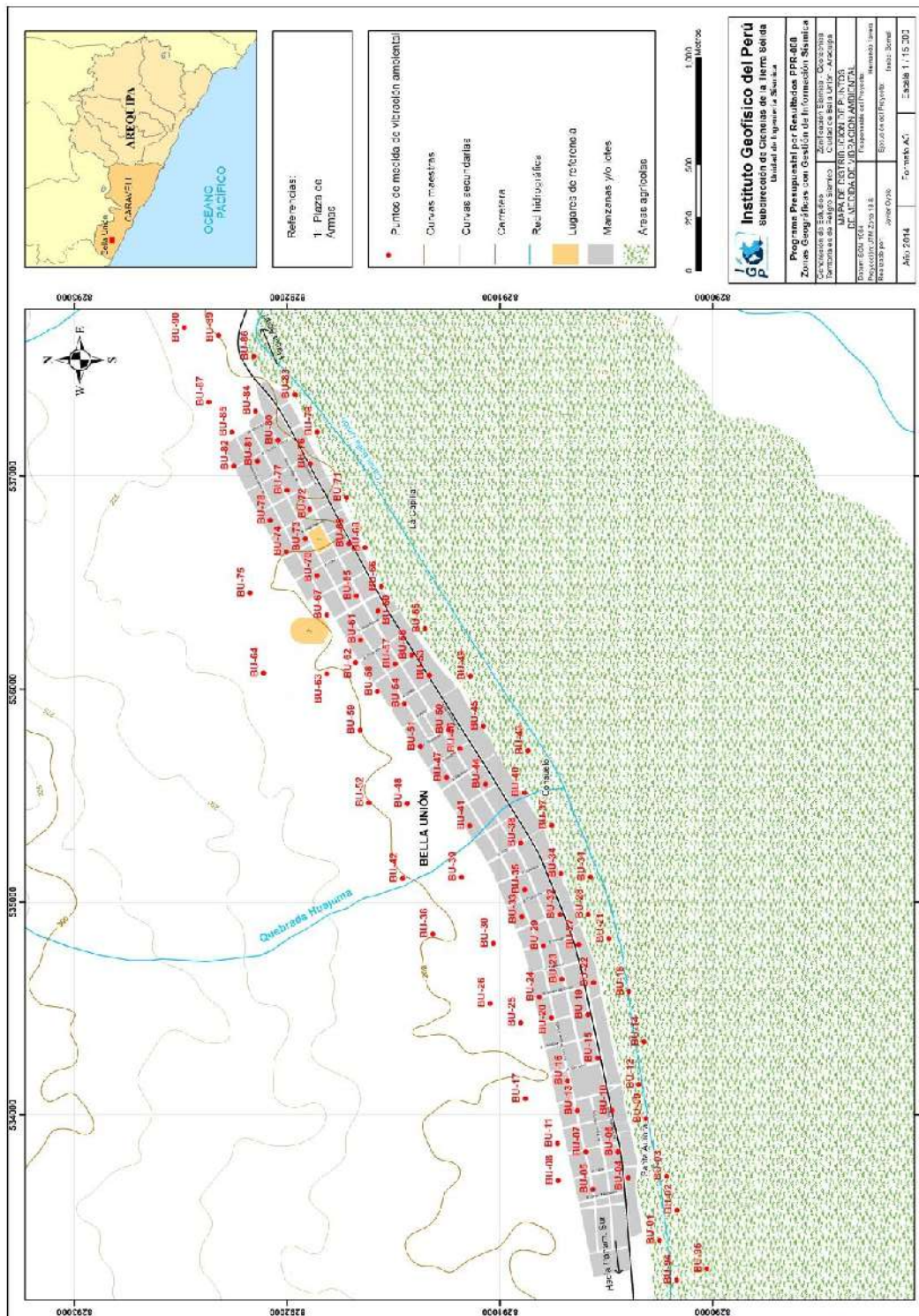


Figura 34: Mapa de la ciudad de Bella Unión y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

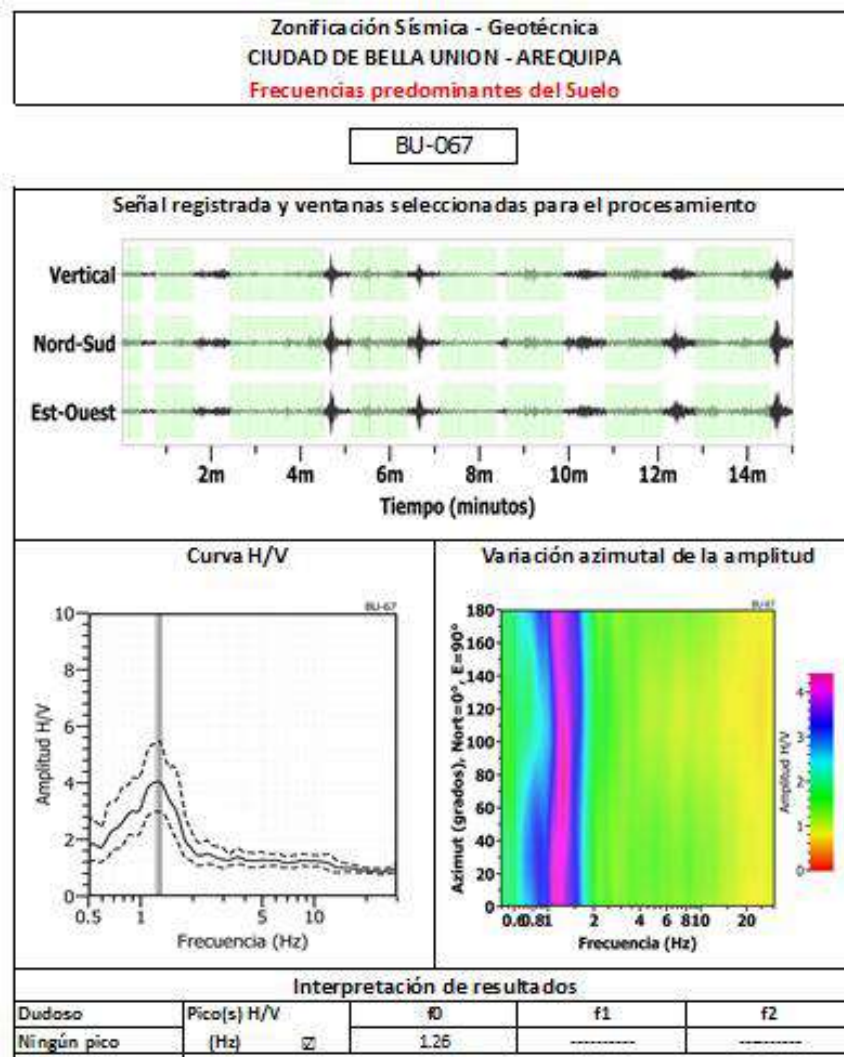


Figura 35: Ejemplo de la ficha H/V para el punto AC-46 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

.- Distribución de frecuencias predominantes: A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados muestran que valores similares para las frecuencias predominantes se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere del análisis detallado para comprender su comportamiento dinámico.

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

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

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

***.- Frecuencias predominantes Fo:** Estas frecuencias se presentan en el 90% de los puntos, en donde se recolecto información (Figura 36). Los puntos en los cuales se identificó frecuencias entre 0.9 y 15 Hz, se distribuyen de manera uniforme sobre toda el área de la ciudad de Bella Unión. En la Figura 37, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos BU-07, BU-40 y BU-73, ubicados en los extremos SO, centro y NE de la ciudad; en todos sobresalen las frecuencias de 1.42, 0.94 y 1.35 HZ con amplificaciones máximas relativas entre 3.4 y 5.6 veces respectivamente. Además, en el punto BU-73 se observa perturbación en la curva de frecuencias que fluctúan entre 3 y 10 Hz con amplificaciones mínimas.*

***.- Frecuencias predominantes F1:** Este rango de frecuencias se presenta en puntos concentrados en el extremo NE de la ciudad de Bella Unión, con valores entre 2 y 9 Hz, y conforme se tiende en dirección de la calle Domingo Sarmiento, los valores decrecen hasta 4 Hz. Una segunda zona de menor dimensión se encuentra en el extremo norte del Jr. Alfonso Ugarte, con valores que fluctúan entre 5 y 9 Hz (Figura 38).*

En la Figura 39, se muestra ejemplos de razones espectrales característicos para cada zona. En los puntos comprendidos entre BU-79 y BU-86, todos ubicados en el extremo NE de la zona de la ciudad, las frecuencias predominantes forman un banda cuyo ancho y valores varían entre 1 y 12 Hz, lo cual evidencian la complejidad de los suelos por debajo de la ciudad de Bella Unión. Las amplificaciones máximas relativas varían entre 3 y 6 veces.

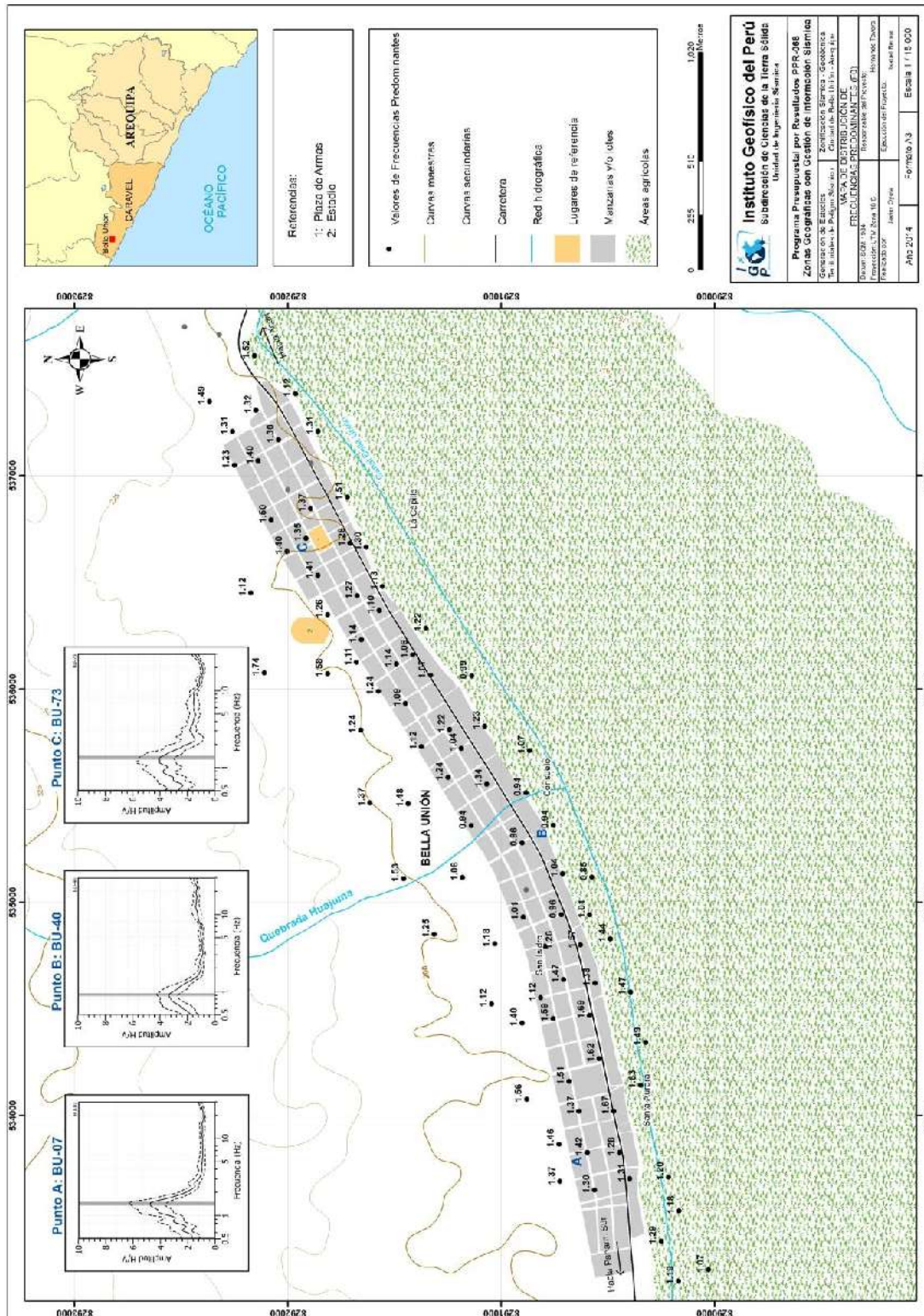
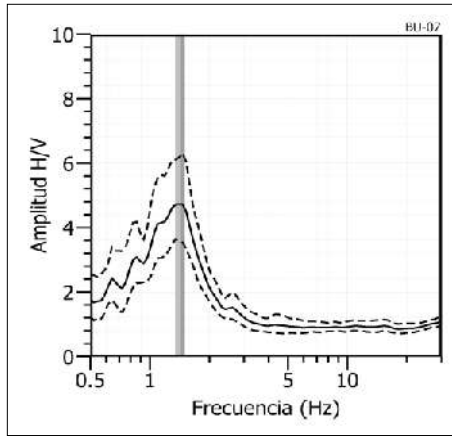
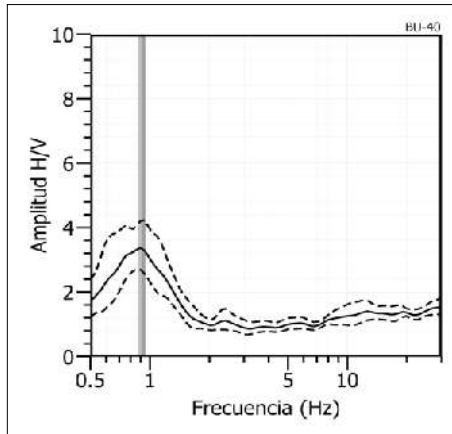


Figura 36: Mapa de la ciudad de Bella Unión y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F_p < 2.0$ Hz). Las letras corresponden a los puntos considerados como representativos para este rango de frecuencias.

BU - 07



BU - 40



BU - 73

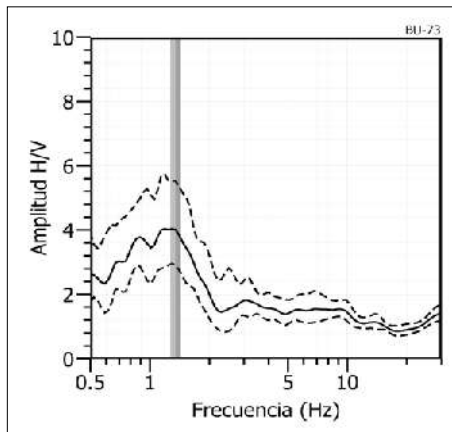


Figura 37: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$): puntos BU-07, BU-40 y BU-73, todos ubicados próximos al cauce del río Acarí. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

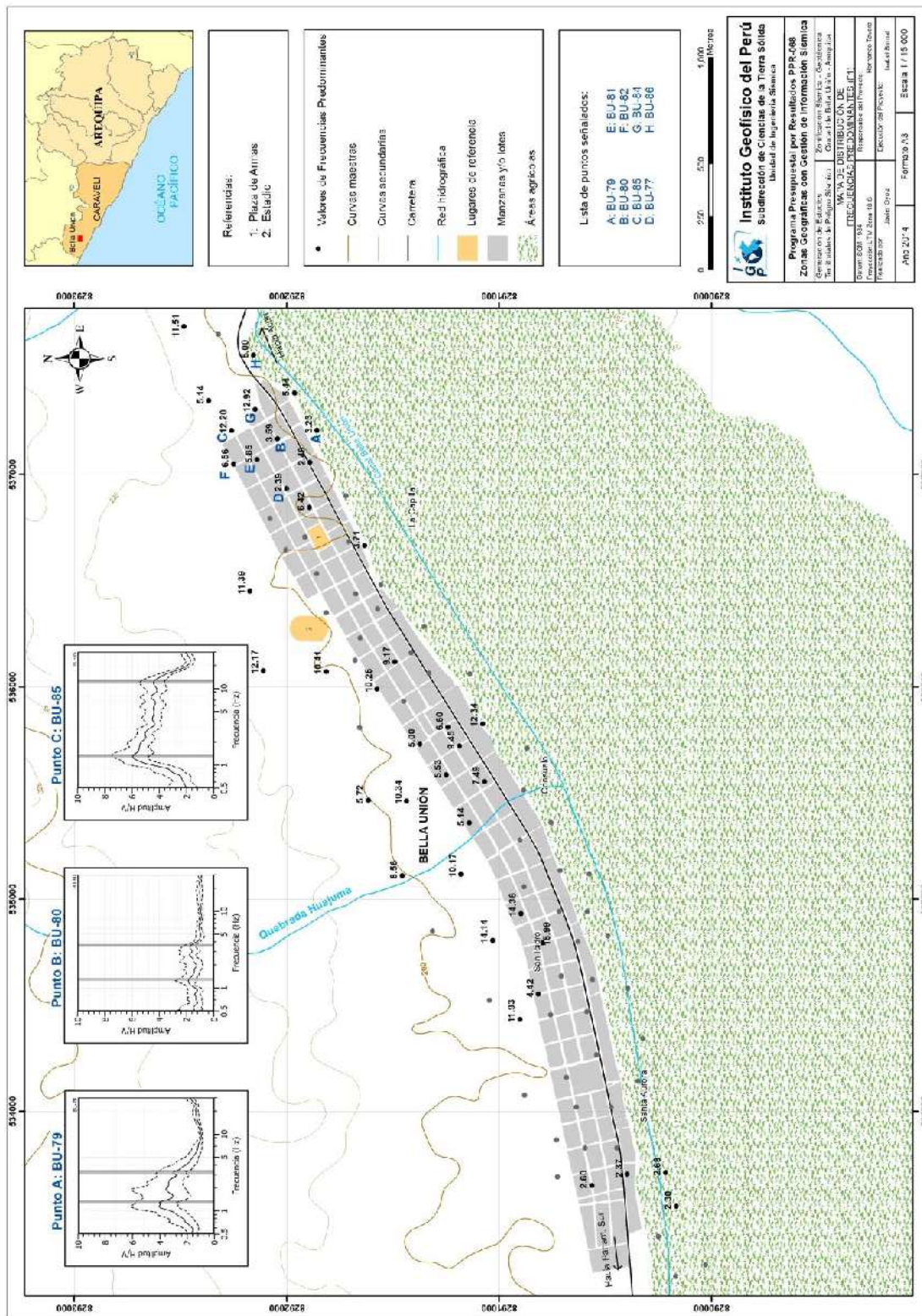
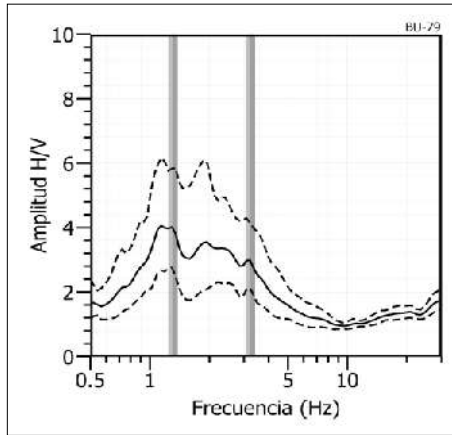
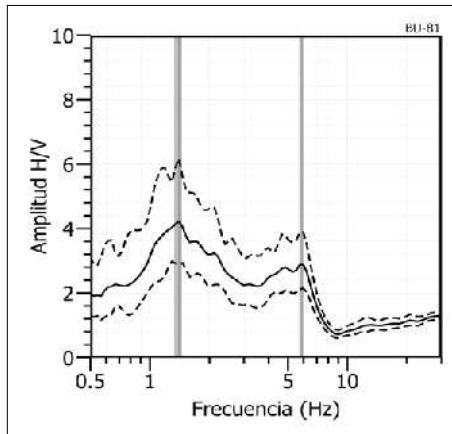


Figura 38: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_1 ($F \geq 2.0$ Hz). Las letras corresponden a puntos considerados como representativos para las diversas zonas y cuyos gráficos se presentan en la Figura 39.

BU - 79



BU - 81



BU - 86

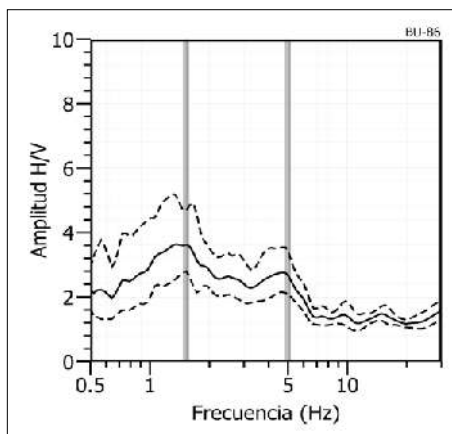
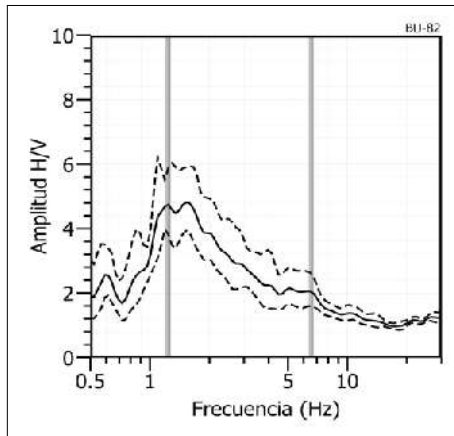
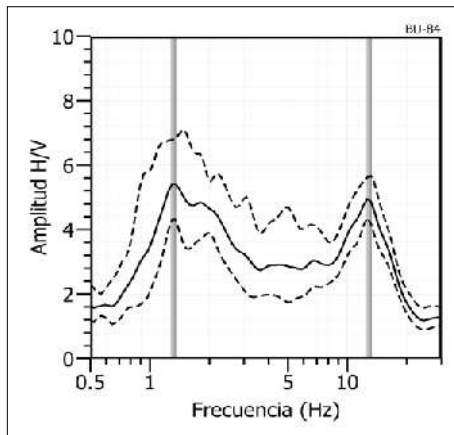


Figura 39: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz): puntos BU-79, BU-81, BU-86, todos distribuidos en el extremo NE de la ciudad de Bella Unión. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

BU - 82



BU - 84



BU - 85

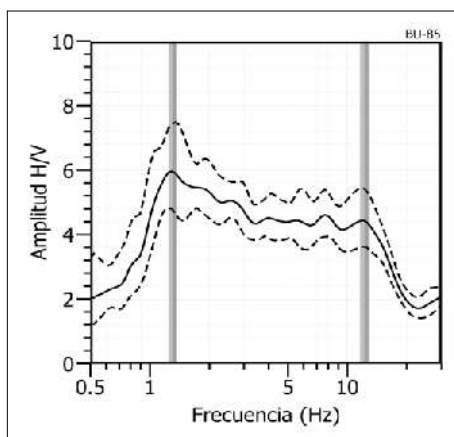
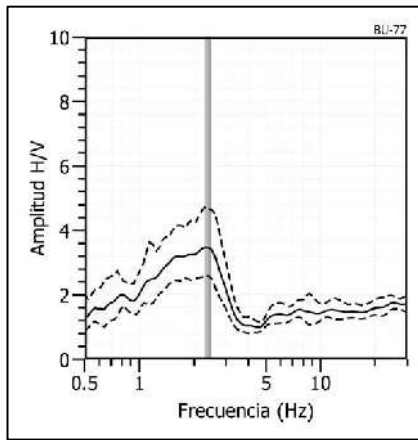
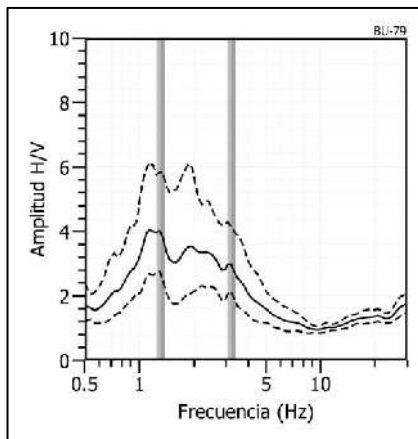


Figura 39: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz): puntos BU-82, BU-84, BU-85, todos distribuidos en el extremo NE de la ciudad de Bella Unión. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

BU - 77



BU - 79



BU - 80

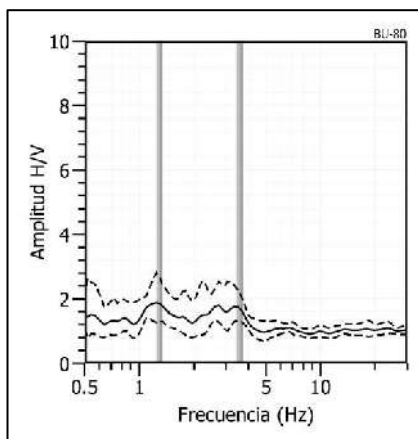


Figura 39: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz): puntos BU-77, BU-79, BU-80, todos distribuidos en el extremo SE de la ciudad de Bella Unión. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

Para los puntos ubicados en el extremo SE de la ciudad, las curvas de razones espectrales tienden a responder en bandas angostas para frecuencias bajas, tal como se observa en los puntos BU-77, BU-79 y BU-80 con picos de frecuencias a 2.5, 3.1 y 3.5 Hz respectivamente. En estos casos las amplificaciones máximas relativas es de hasta 4 veces.

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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

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

En la Figura 40, se presenta el mapa de la ciudad de Bella Unión con la distribución espacial de 5 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-BU,...., LR05-BU. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se considera la clasificación, que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte (V_s):

- .- Rocas duras, velocidades $V_s > 1,500$ m/s*
- .- Rocas moderadamente duras, velocidades V_s de 800 a 1500 m/s*
- .- Suelo muy duro o roca blanda, velocidades V_s de 500 a 800 m/s*

- Suelo duro, velocidades V_s de 180 a 500 m/s
- Suelo blando, velocidades $V_s < 180$ m/s
- Suelo excepcionalmente blando (S4) (condiciones excepcionales)

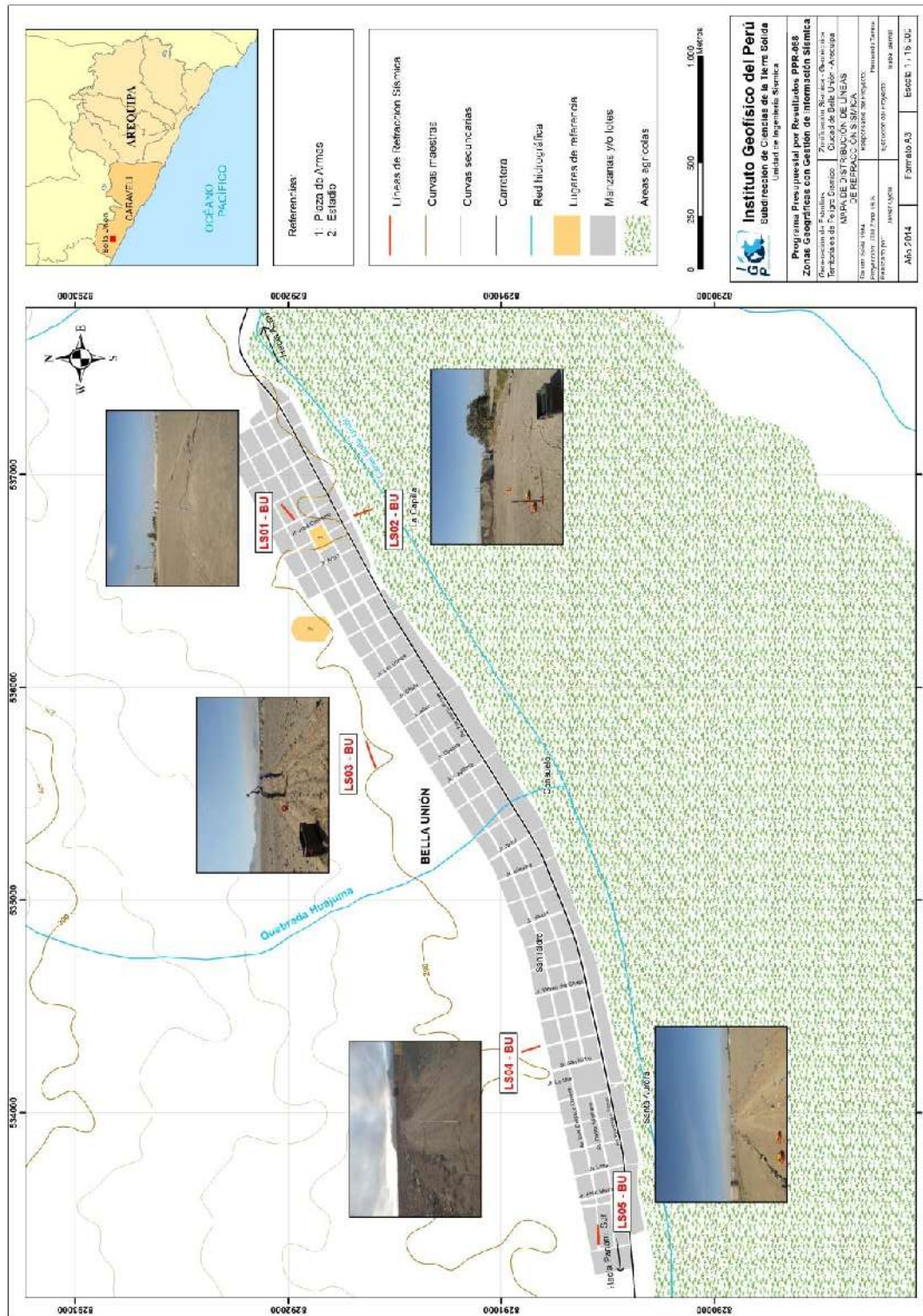


Figura 40: Mapa de la ciudad de Bella Unión y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-BU, ..., LR05-BU.

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 Bella Unión (Figura 54).

Arreglo Lineal LR01- BU: Este arreglo se realizó entre la av. Ángel Escalante y Jr. Catalina Huanca, extremo NE de la ciudad de Bella Unión. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades V_s de 390 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 15 metros y velocidades V_s de 580 m/s. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos duros a muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 900 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 41a).

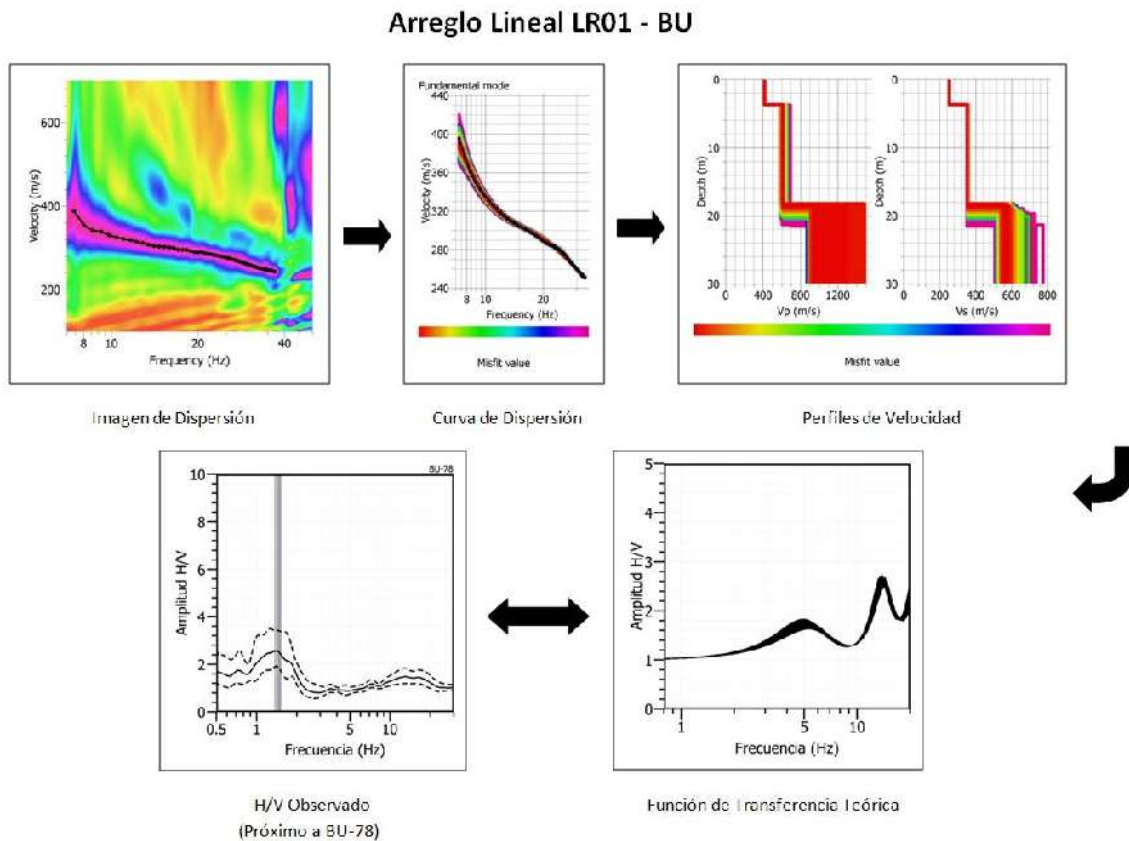


Figura 41a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR01 - BU.

Arreglo Lineal LR02- BU: Este arreglo se realizó en el extremo SE de la ciudad de Bella Unión, a 80 metros de la carretera central. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 3 metros y velocidades V_s de 250 m/s. La segunda capa presenta un espesor de

17 metros y velocidades V_s de 510 m/s. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos duros a moderadamente duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 610 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 41b).

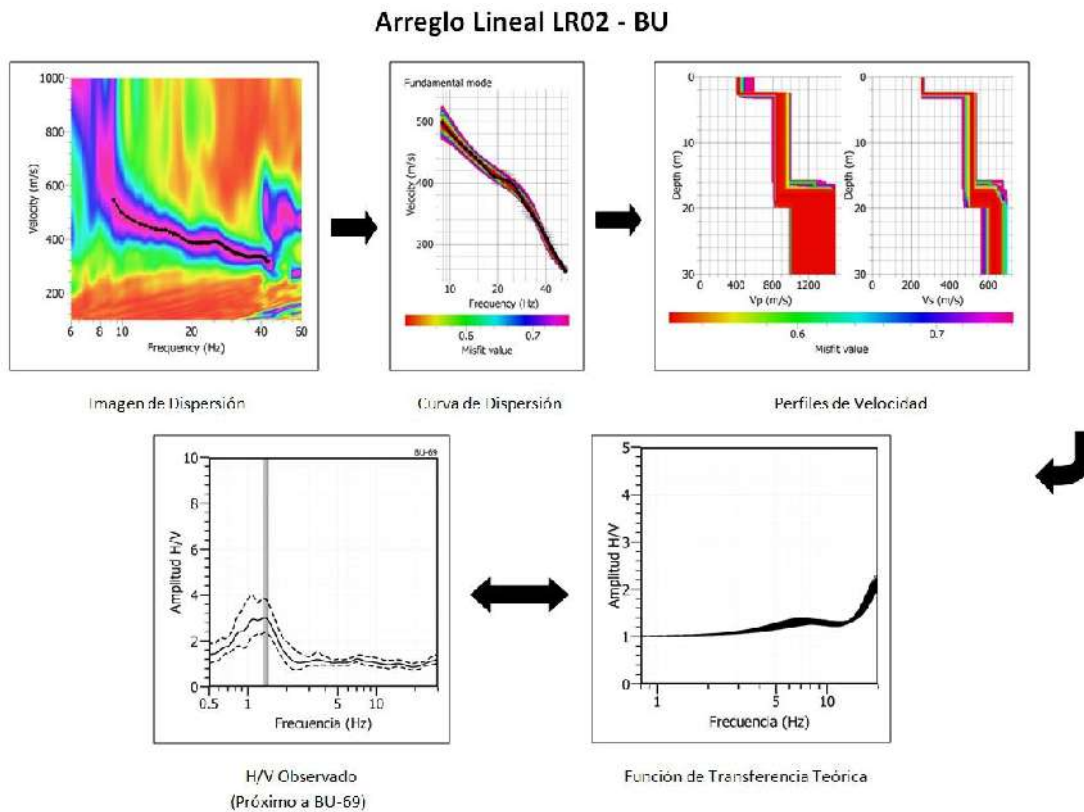


Figura 41b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR02-BU.

Arreglo Lineal LR03- BU, y LR04-BU: Estos arreglos se realizaron en el extremo norte de la ciudad de Bella Unión, el primero a 500 metros del estadio y el segundo, cerca de la calle Jr. Huanca. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 5 metros y velocidades V_s de 330 y 350 m/s. La segunda capa con espesores de 10 y 17 metros y velocidades V_s del orden de 500 m/s. Estas velocidades sugieren la presencia de suelos duros a moderadamente duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de 650 y 880 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras a muy duras (Figura 41c, d).

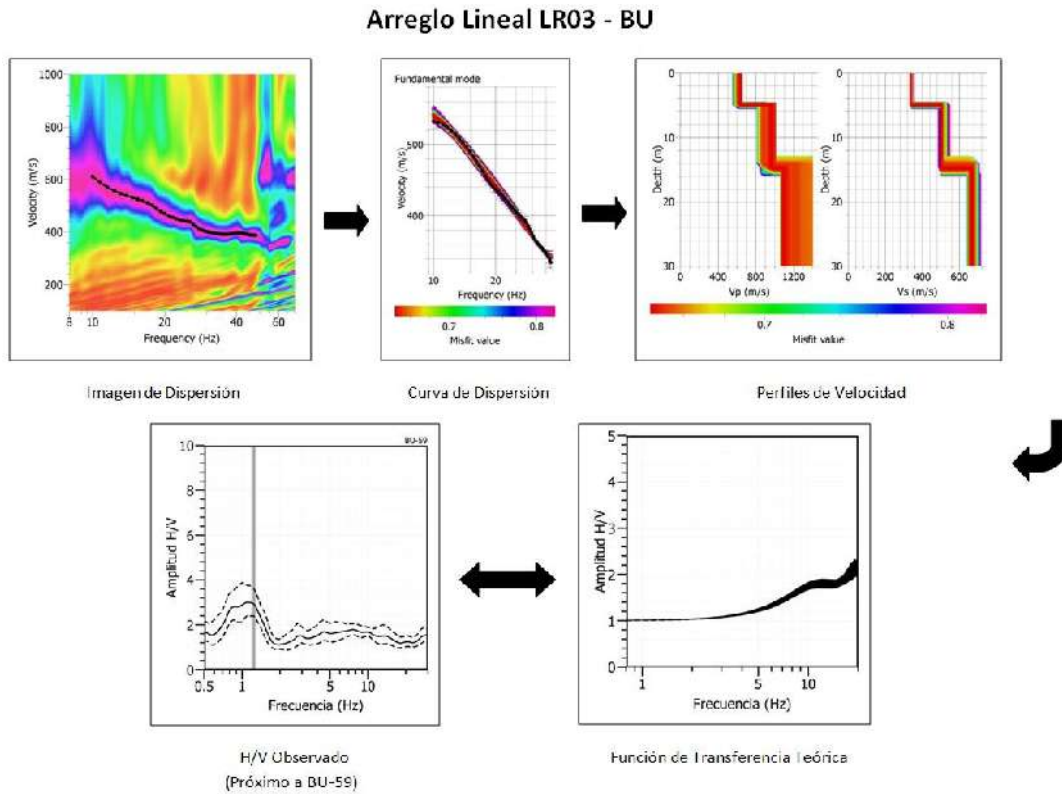


Figura 14c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR03-BU.

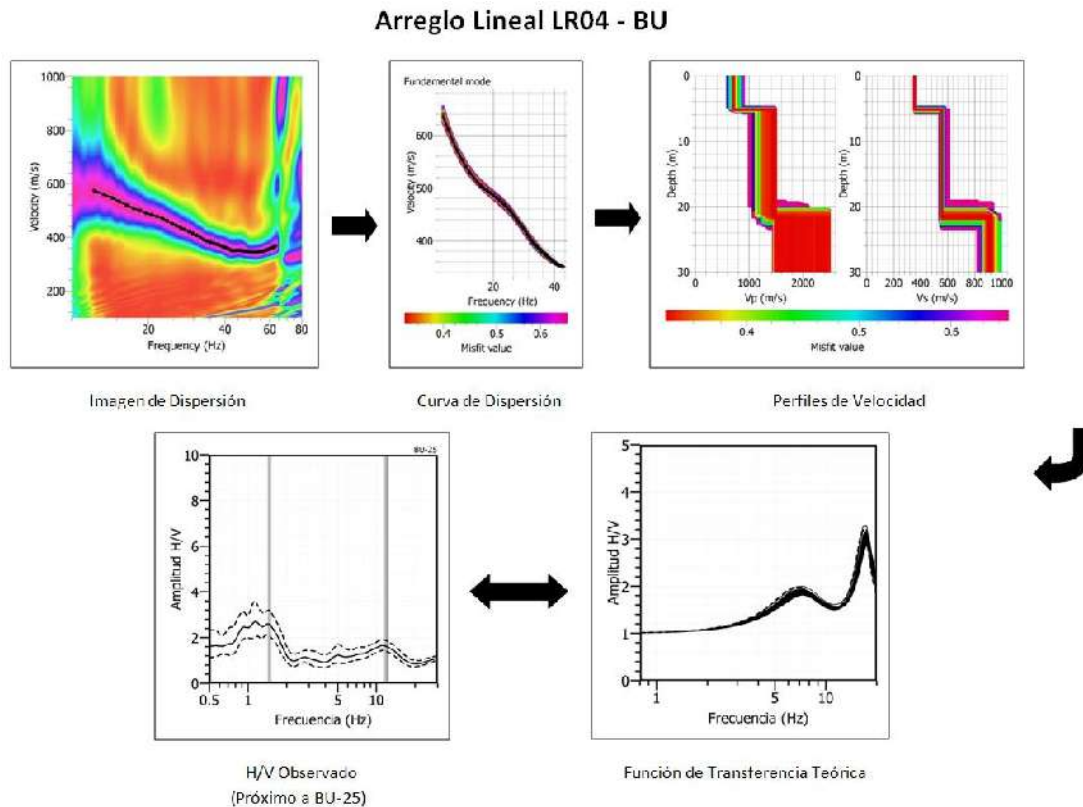


Figura 41d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR04-BU.

Arreglos Lineales LR05- BU: Este arreglo se realizó en el extremo SO de la ciudad de Bella Unión. Los resultados obtenidos muestran la presencia de suelos conformados por dos capas de 5 y 6 metros de espesor, y velocidades V_s entre 400 y 450 m/s. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidad de hasta 500 metros, correspondiendo a suelos moderadamente duros (Figura 41e).

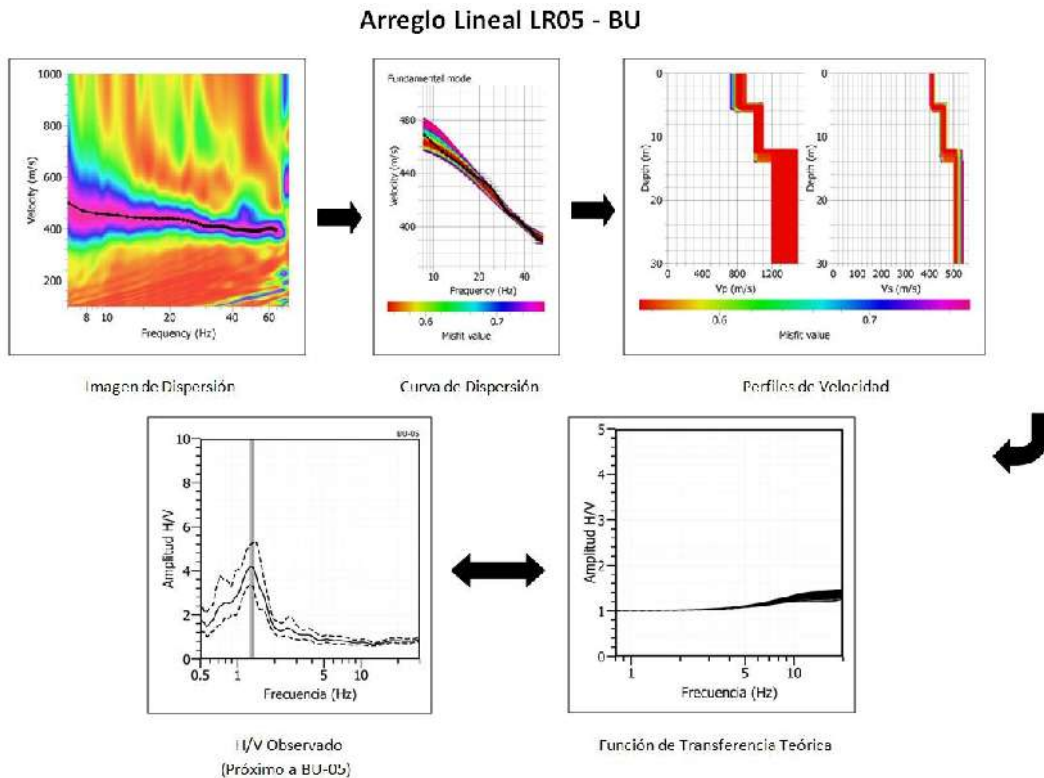


Figura 54e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR05-BU.

En resumen, se ha identificado la presencia de dos capas cuyos espesores varían de NE a SO. La primera tiene espesores entre 4 y 11 metros, con velocidades de 330 a 450 m/s respectivamente y la segunda capa, con espesores que varían entre 10 y 17 metros con velocidades de 500 a 580 m/s. Estos resultados evidencian la presencia en el extremo NE de la ciudad de Bella Unión de depósitos superficiales heterogéneos poco consolidados y mejor consolidados en su extremo SO. Además, los resultados obtenidos en el perfil LR02-BU sugieren que en el extremo sur de la ciudad, en la capa superficial de 3 metros de espesor, las ondas sísmicas pueden alcanzar velocidades de 250 m/s, evidenciando la presencia en el subsuelo de estratos de moderada consistencia.

11.3.- Periodos Dominantes

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

En la Figura 42 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Bella Unión y los resultados obtenidos permiten definir la existencia de tres áreas, la primera presenta periodos de 0.3 a 0.4 segundos, la segunda de 0.1 a 0.2 segundos y la tercera, en un área de menor dimensión con periodos que fluctúan entre 0.1 a 0.4 segundos. Los periodos de 0.3 a 0.4 segundos se agrupan en el extremo NE y SE de la zona de estudio; así como, en una franja angosta a lo largo del canal de Bella Unión ubicada en el extremo sur de la ciudad. En dirección norte se identifica la presencia de valores de 0.1 y 0.2 segundos, y hacia los extremos NE y SE de la ciudad, los suelos presentan variedad de periodos que evidencian su dinámica inestable. Asimismo, en la mayor superficie de la ciudad se ha identificado la presencia de periodos mayores a 0.7 segundos, los mismos que por su amplitud menor deben ser considerados como secundarios y posiblemente tengan su origen en el aporte de la topografía regional.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Bella Unión están relacionados por sus condiciones físico - dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$ (T_0 , periodo dominante; H, espesor del estrato y V_s , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte (V_s), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo. Asumiendo, velocidades de 250 y 500 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.2 y 0.4 segundos para el comportamiento dinámico de los suelos, se estima para la capa superficial espesores entre 15 y 25 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra que en la ciudad de Bella Unión los suelos responden generalmente a periodos de 0.1 y 0.2 segundos; mientras que, en un área pequeña, ubicada en su extremo Este, el suelo responde a periodos entre 0.1 y 0.4 segundos, lo cual define la presencia de suelos muy complejos en su constitución.

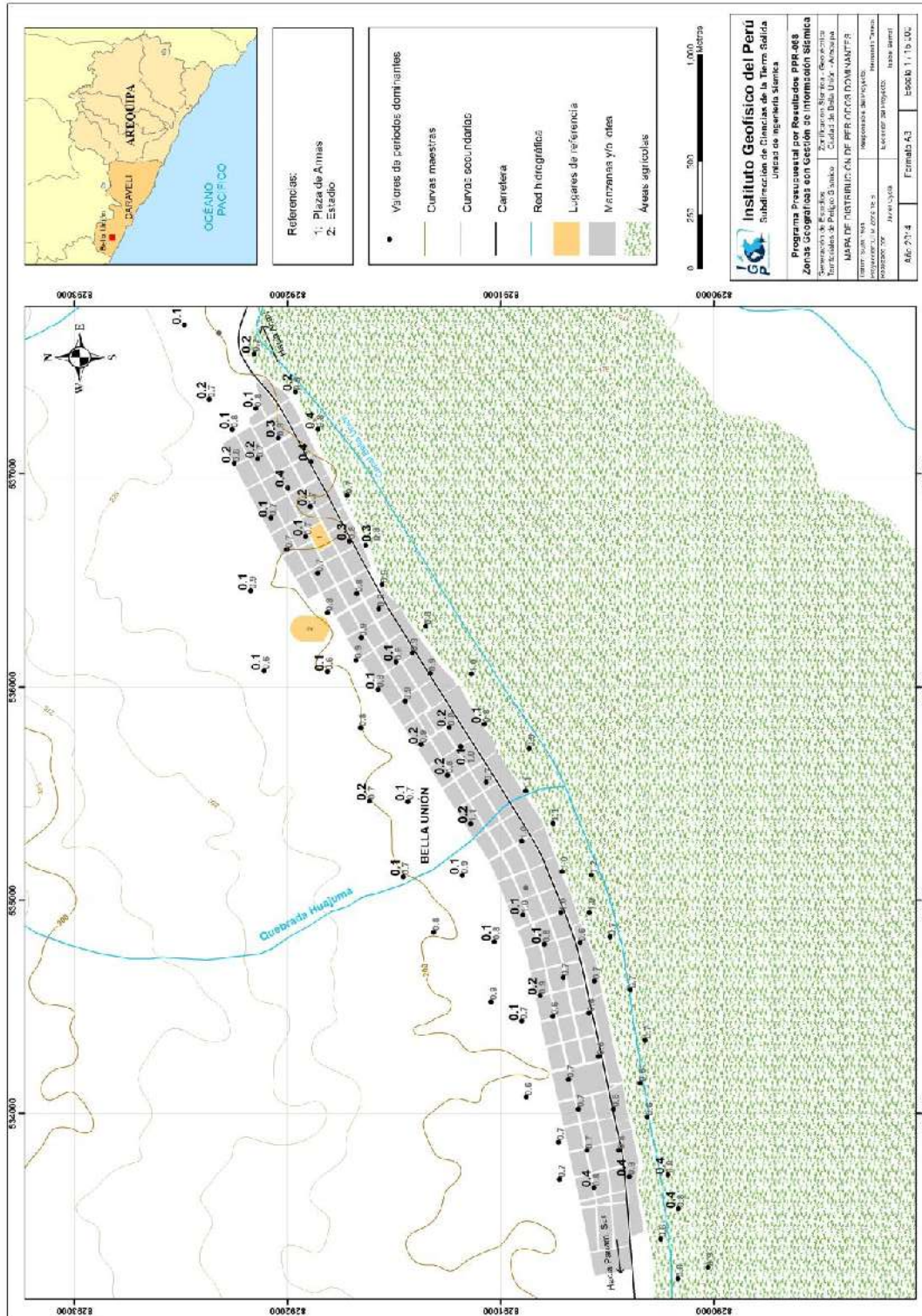


Figura 42: Mapa de la ciudad de Bella Unión y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes fundamentales y en gris, los secundarios.

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Bella Unión se han realizado 3 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo, la distribución de 25 electrodos con un espaciamiento de 5 a 10 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 120 a 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 20 metros (Figura 43).

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

Sección geo-eléctrica L01-BU: Sección realizada a 300 m de la plaza principal de Bella Unión y los resultados muestran la presencia de valores de resistividad que van desde muy bajo resistivos (97 ohm-m) a muy resistivos en la superficie (1810 ohm-m). Los materiales que conforman la parte superficial alcanzan espesores de aproximadamente 8 metros y estarían compuestos por suelos de tipo arenoso, arcilloso y gravas de diferentes tamaños. Asimismo, se observó la presencia de material de desmonte (Figura 44a).

Sección geo-eléctrica L02-BU: Sección realizada a 170 m de distancia a la plaza principal, próxima a terrenos de cultivo y a unos 20 m de un canal de regadío. En la sección, se identifica el predominio de valores correspondientes a bajos resistivos (entre 151 – 400 ohm-m), aunque a una distancia de 110 a 180 metros y a 25 metros de profundidad, los valores de resistividad se incrementan hasta 1800 ohm-m. Estos valores se podrían asociar al diferente grado de compactación de los suelos, ya que se trata de una zona de relleno. Los valores de bajos resistivos se deberían a la saturación de los suelos por esta próximos al canal de regadío y áreas de cultivo (Figura 44b).

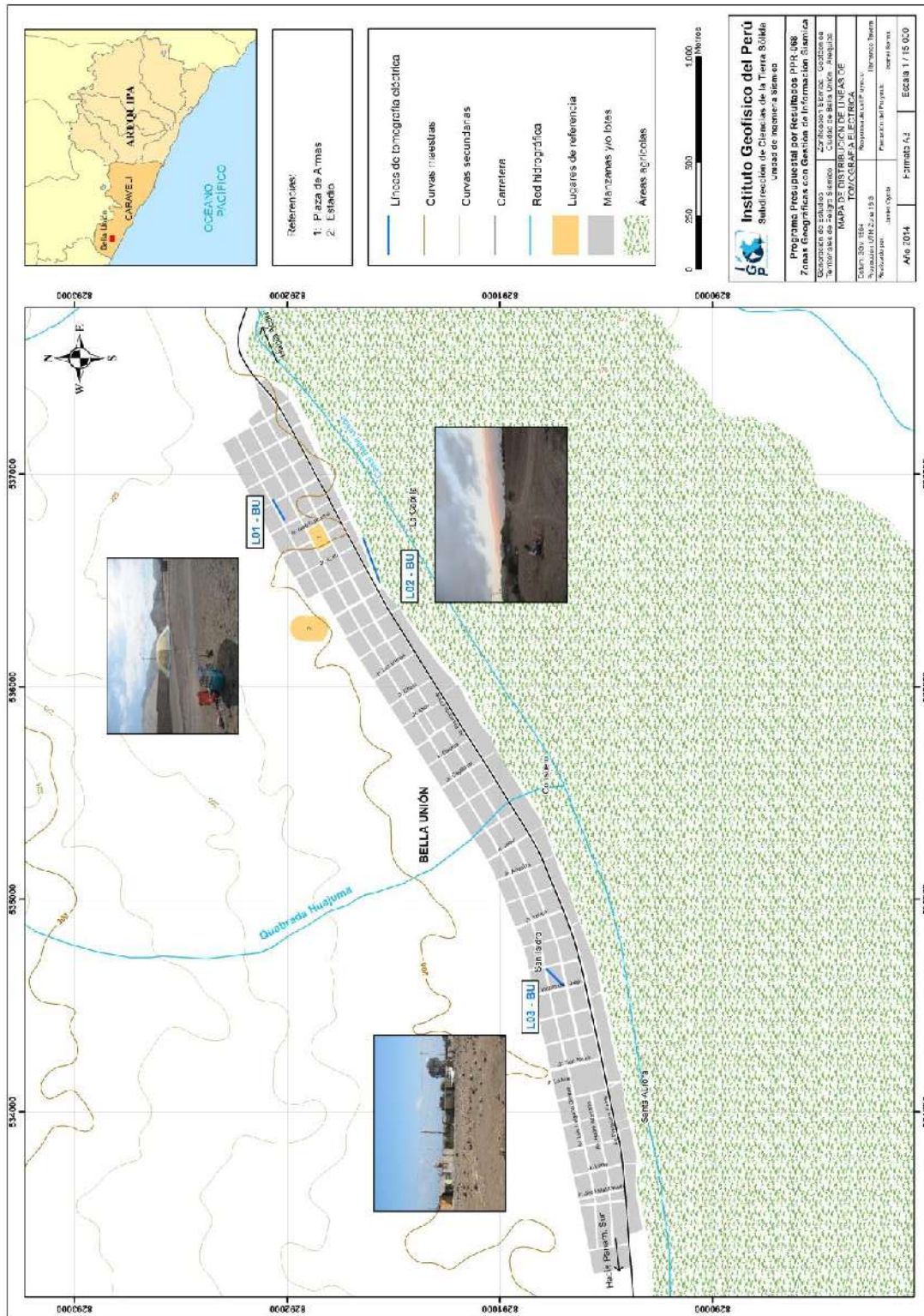


Figura 43: Mapa de la ciudad de Bella Unión y ubicación de las 3 líneas de tomografía eléctrica.

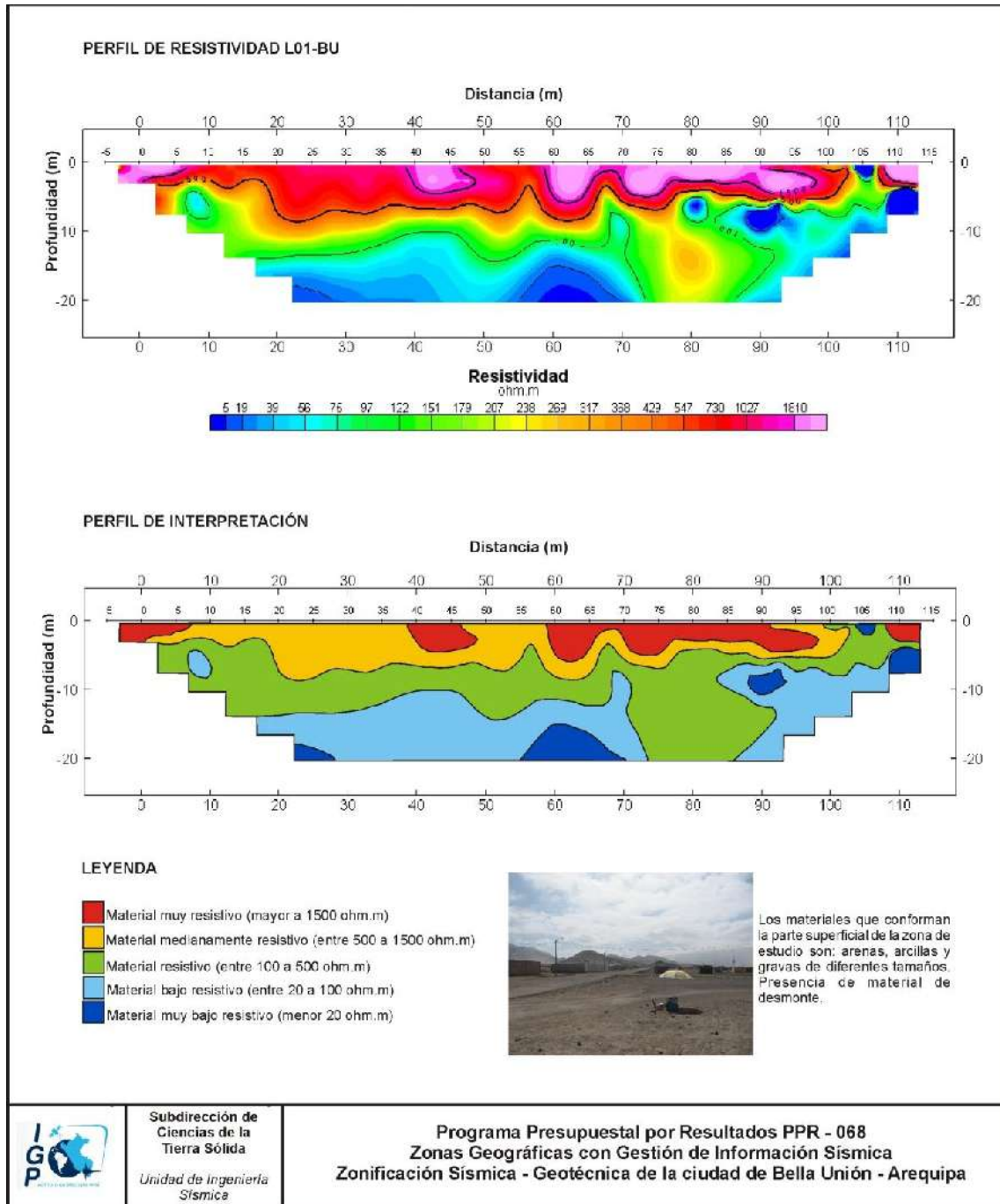


Figura 44a: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-BU.

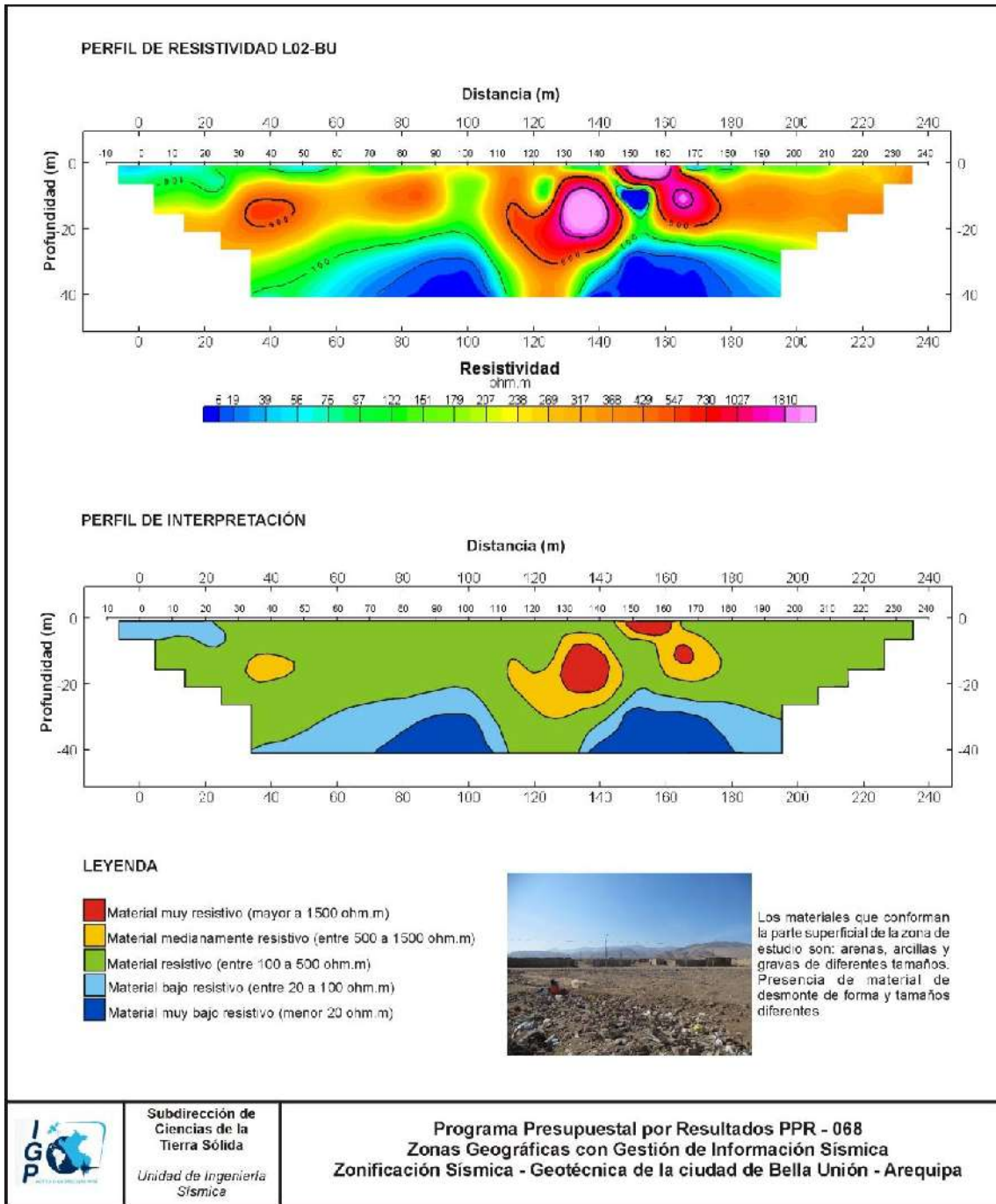


Figura 44b: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-BU.

Sección geo-eléctrica L03-BU: Sección realizada en el extremo SO de la ciudad de Bella Unión, a 2 km de la plaza principal. En esta sección predominan valores resistivos a medianamente resistivos, estando los valores más altos distribuidos a lo largo de toda la sección y hasta una profundidad de 8 metros (700-1800 ohm-m). Hacia los extremos de la sección (entre 65 y 80 metros de distancia), los valores alcanzan la profundidad de 4 metros, lo cual define la presencia de una capa superficial e irregular. A mayor profundidad, los valores de resistividad disminuyen hasta 230 ohm-m.

En la ciudad de Bella Unión, la distribución de los valores de resistividad, evidencian la existencia de una capa superficial de 5 a 10 metros de espesor caracterizada por presentar valores altos de resistividad. Esta capa estaría compuesta por suelos de tipo arenoso, arcilloso y gravas de diferentes tamaños. La presencia de material de desmonte permite obtener valores de resistividad alta.

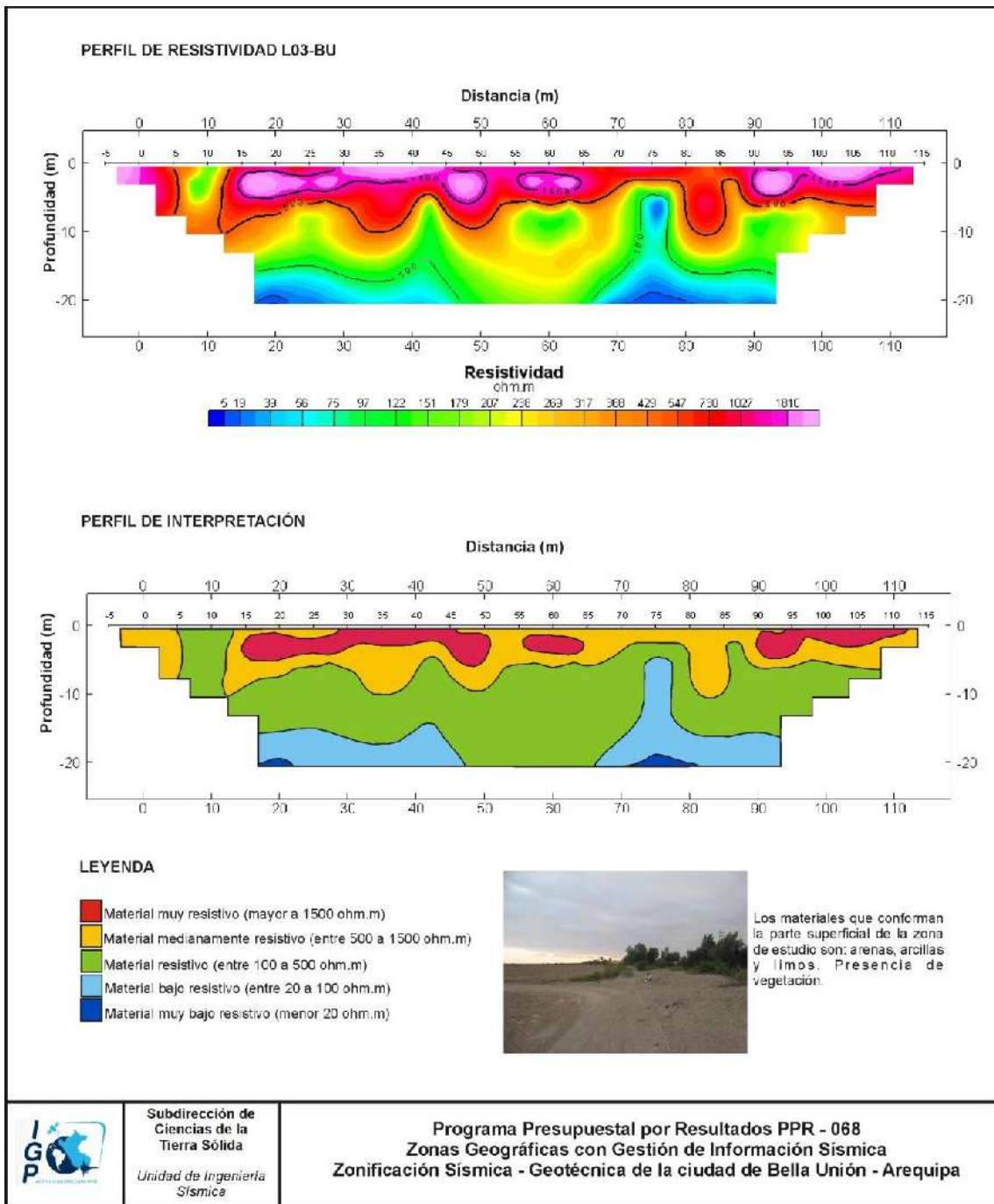


Figura 44c: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-BU.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

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

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Bella Unión se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 45):

ZONA I: *Conformada por estratos de grava cubiertos por un manto areno-limoso poco consolidado y de poco espesor. En profundidad, el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la Norma Sismorresistente peruana. Las velocidades de ondas de corte pueden variar de 300 a 450 m/s para la capa superficial de 4 a 11 metros de espesor, y de 500 a 580 m/s la capa más profunda (10 a 20 metros de espesor). En la Figura 45, algunas áreas de la zona se muestran con líneas paralelas y definen aquellas en donde los picos de periodos presentan amplitudes relativas menores a 2; es decir, en dichas áreas el sacudimiento del suelo tendría menor amplitud. Esta zona presenta una capacidad portante alta con valores mayores a 3 kg/cm².*

Adicionalmente, se observa la presencia de suelos que responde a periodos que fluctúan entre 0.6 y 0.8 segundos, evidenciando el aporte topográfico en la respuesta dinámica de los suelos de la localidad de Bella Unión.

ZONA II: *Conformada por capas superficiales de suelos granulares finos y arcillosos con espesores entre 10 y 17 metros, subyaciendo a estas capas se tiene material de origen ígneo y sedimentario. La zona abarca el extremo sur de la ciudad y considera periodos predominantes del terreno que varían entre 0.3 y 0.4 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente*

peruana. En la Figura 45, algunas áreas de la zona se muestran con líneas paralelas y definen aquellas en donde los picos de periodos presentan amplitudes relativas menores a 2; es decir, en dichas áreas el sacudimiento del suelo tendría menor amplitud. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte (V_s) entre 450 y 580 m/s; además de una capacidad portante de alta a media.

ZONA III: No se identificó suelos Tipo S3.

ZONA IV: El comportamiento dinámico de la zona ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la Norma Sismorresistente Peruana (Según la Norma E-030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales). La zona considera suelos conformados por arcillas afectadas por la filtración del agua de regadío y otros de relleno, donde el comportamiento dinámico es incierto; por lo tanto, se requiere de estudios específicos.

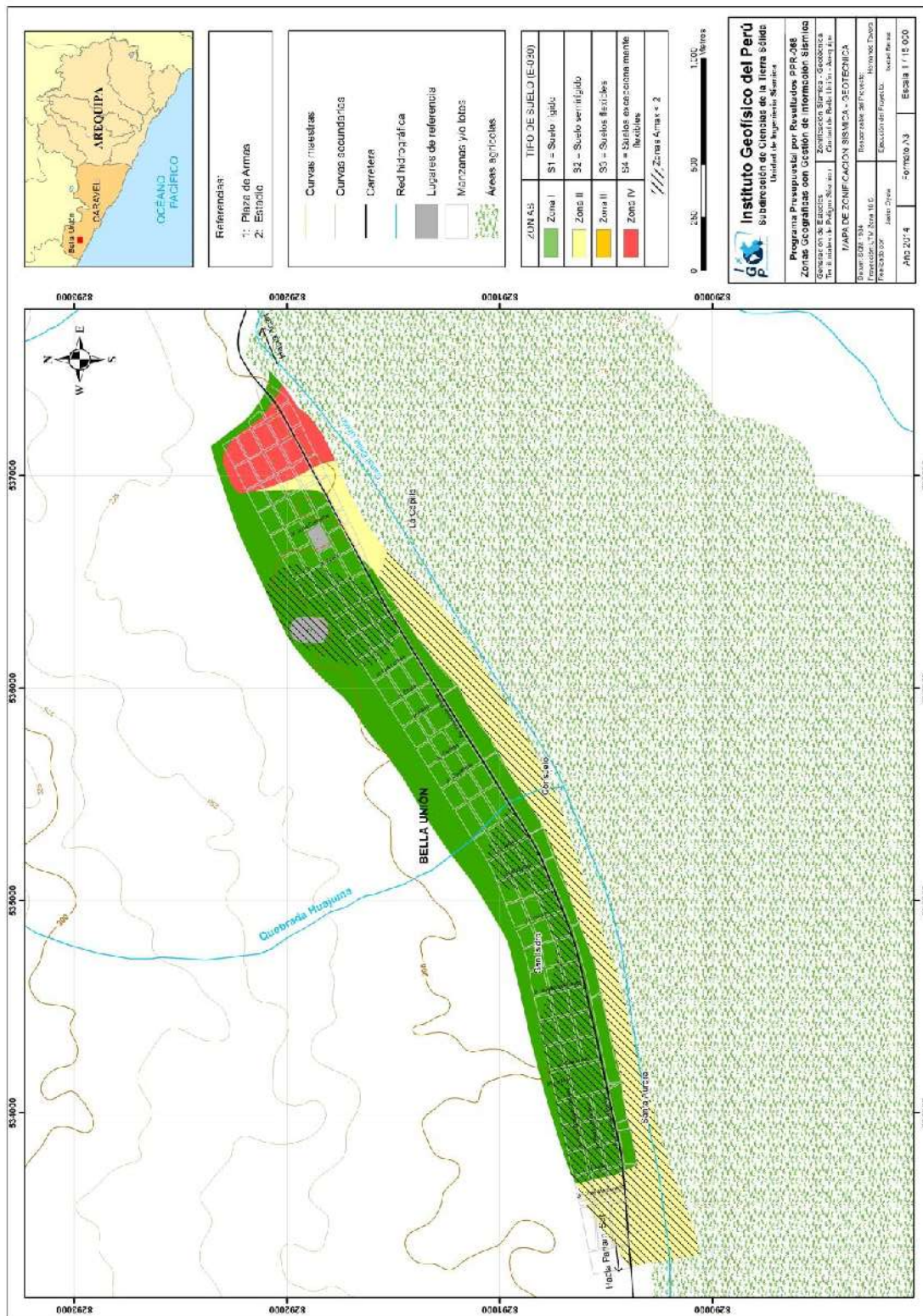


Figura 45: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Bella Unión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

En la ciudad de Bella Unión, la capacidad de carga admisible define la existencia de suelos con capacidad portante alta ($>3 \text{ kg/cm}^3$) en al menos un 80% del total de su superficie; es decir, se cuenta con suelos bien compactados.

Del mismo modo, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que la ciudad de Bella Unión se encuentra sobre suelos Tipo S1, S2 y S4; es decir, los correspondientes a las zonas: Zona I, Zona II y Zona 4. Esta última, según la Norma Sismorresistente Peruana, corresponde a suelos de condiciones excepcionales y requieren de estudios específicos.

RECOMENDACIONES

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

BIBLIOGRAFÍA

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

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

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

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

MAPAS