



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



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

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



### ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE TACNA

Lima, Perú  
2018

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Dr. Hernando Tavera

Director Científico: Dr. Danny Scipion

**Autores**

Isabel Bernal

Caracterización Sísmica y Geofísica de la Ciudad de Tacna

Juan Carlos Gomez

Caracterización Geológica- Geotécnica de la Ciudad de Tacna

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Pilar Vivanco/ Mariana Vivanco

Equipo de Evaluación Geofísica: Fabiola Rosado / Henry Salas / Wilfredo Sullá

Liliana Torres / Javier Oyola/ Kelly Pari /Luz Arredondo/ Jesús Huarachi /Jorge Salas

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Marisol Enriquez

**Este Informe ha sido producido por:**

Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169, Mayorazgo IV etapa, Ate  
Teléfono (511) 3172300

**ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD  
DE TACNA**

**(Provincia de Tacna – Región Tacna)**

## RESUMEN

*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 las áreas urbanas de las ciudades/localidades de Tacna (distrito de Cercado), Alto Alianza (distrito de Alto Alianza), Ciudad Nueva (distrito de Ciudad Nueva), Boca del Río (distrito de Sama), Ite (distrito Ite), Ilo, (distrito de Pampa inalámbrica), Moquegua ( Capital de Moquegua) y Torata (Distrito de Torata).*

*Estos estudios permiten conocer el Comportamiento Dinámico de los Suelos a partir de la recolección de datos de campo utilizando técnicas geofísicas, sísmicas, geológicas y geotécnicas.*

*El análisis e interpretación de los datos obtenidos permiten tener como resultado la “Zonificación Sísmica – Geotécnica de los suelos de la Ciudad de Tacna”, información primaria que debe 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. Este documento técnico debe constituirse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.*

*El presente informe está constituido por tres (3) partes, en la primera se realiza la presentación de las características del área de estudio y las conclusiones generales. En la segunda parte, se presenta el desarrollo del estudio realizado para la caracterización geológica y geotécnica de la ciudad de Tacna, y en la tercera, la caracterización sísmica y geofísica. Finalmente, en un DVD se adjunta toda la documentación y mapas temáticos generados durante la realización del presente estudio.*

## **INDICE**

RESUMEN

INDICE

### **PARTE 1**

#### 1.- INTRODUCCIÓN

- 1.1.- Objetivo
- 1.2.- Historia
- 1.3.- Accesibilidad y clima
- 1.4.- Economía
- 1.5.- Estudios previos

#### 2.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

- 2.1.- La Norma Técnica E.030

CONCLUSIONES

### **PARTE 2**

Caracterización geológica y geotécnica de la ciudad de Tacna

### **PARTE 3**

Caracterización sísmica y geofísica de la ciudad de Tacna

### **CONCLUSIONES**

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

Documentos y Mapas se adjunta en DVD

## 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 2017 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollan la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las áreas urbanas de las siguientes ciudades (Figura 1):

- **Tacna**, Cercado, provincia y región Tacna.
- **Alto de la Alianza**, distrito de Alto de la Alianza, provincia y región Tacna.
- **Ciudad Nueva**, distrito de Ciudad Nueva, provincia y región Tacna.
- **Boca del Río**, balneario del distrito de Sama, provincia y región Tacna.
- **Ite**, distrito de Ite, provincia Jorge Basadre y región Tacna.
- **Ilo y Pampa Inalámbrica**, capital de la provincia de Ilo, región Moquegua.
- **Moquegua**, capital de la provincia del mismo nombre, región Moquegua.
- **Torata y Yacango**, distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto y región Moquegua.

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 las regiones de Tacna y Moquegua (Silgado, 1978; Tavera et al. 2016). 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.

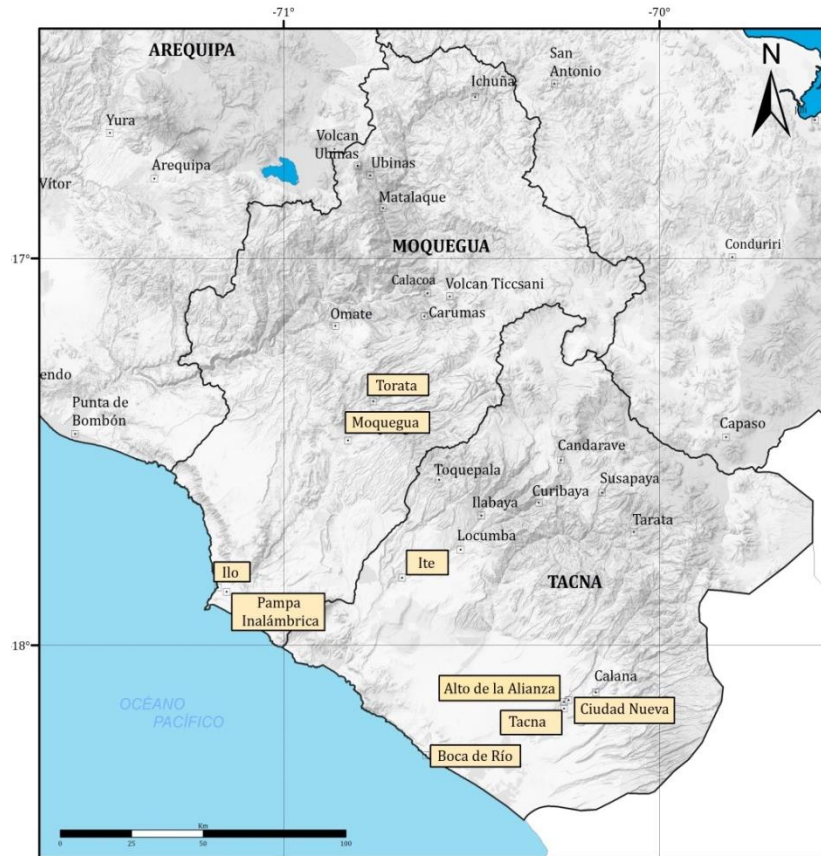


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades intervenidas durante el año 2017: Zonificación Sísmica – Geotécnica de suelos

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 datos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. 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 apropiadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de la Ciudad de Tacna deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente ([www.acerosarequipa.com](http://www.acerosarequipa.com)):

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

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

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

Es importante remarcar que los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica permiten conocer las características dinámicas del suelo y se constituyen como información primaria a ser utilizada por los ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada tipo de suelos identificados en cada zona de estudio. Asimismo, debe considerarse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

### 1.1.- Objetivo

El principal objetivo a cumplir en este estudio es obtener el mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Tacna (Figura 2), provincia de Tacna, Región de Tacna, a partir de la información obtenida con la aplicación de diferentes métodos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. Asimismo, es de interés del presente estudio que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados al ordenamiento territorial y desarrollo sostenible de la ciudad.



Figura 3: Plaza de Armas de la ciudad de Tacna

## 1.2. Historia

La provincia de Tacna está ubicada en una gran extensión de desierto que alberga dos cuencas: la cuenca de Caplina y Sama formando valles donde se inician los primeros asentamientos. En la época incaica predominaba el cultivo de maíz a gran escala. Con la llegada de los españoles, la ciudad de Tacna adquiere importancia por su ubicación geopolítica, sirviendo de estancia de paso entre las rutas Lima – Arica – Puno – Potosí, llegando a consolidar una actividad comercial que la caracteriza hasta la actualidad.

Posterior a la ocupación chilena, Tacna se reinserta a la vida republicana peruana, sufriendo el desmembramiento de su puerto natural Arica. Es en el gobierno de Odría que realzan obras urbanas, infraestructura vial, la irrigación de Mogollo y la firma del contrato con Southern Perú Cooper Corporation para la explotación del cobre, teniendo gran influencia en el desarrollo de la provincia.

A partir de la década de 1960, la ciudad de Tacna empieza un acelerado proceso de urbanización, como consecuencia de un modelo de desarrollo nacional dependiente de la extracción de recursos y su comercialización. Sin embargo, el escaso desarrollo de las actividades productivas se ve limitada por la falta de inversión.

La actividad comercial, se genera con el contrabando, estableciéndose como el principal ingreso económico; además de solucionar los problemas de falta de empleo y de violencia social. Asimismo, genera el abandono de la población de las áreas rurales para obtener mejores condiciones de vida, efecto que atrae la migración de poblaciones aledañas, principalmente de Puno, extendiéndose la ciudad a tal magnitud que llega a dar vida a nuevos distritos (Alto de la Alianza, Ciudad Nueva y Gregorio Albarracín). En la actualidad este crecimiento continúa, tal es así que los centros poblados de los distritos de Pocollay y Calana están próximos a formar parte del proceso de conurbación con la ciudad de Tacna (Municipalidad Provincial de Tacna, 2013).

El distrito de Tacna forma parte de los once distritos de la provincia de Tacna, ubicado en la región de Tacna (Figura 3). Limita por el norte con los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva, por el sur con el distrito de Gregorio Albarracín, por el este con el distrito de Pocollay y al oeste con el sector de Mogollo.

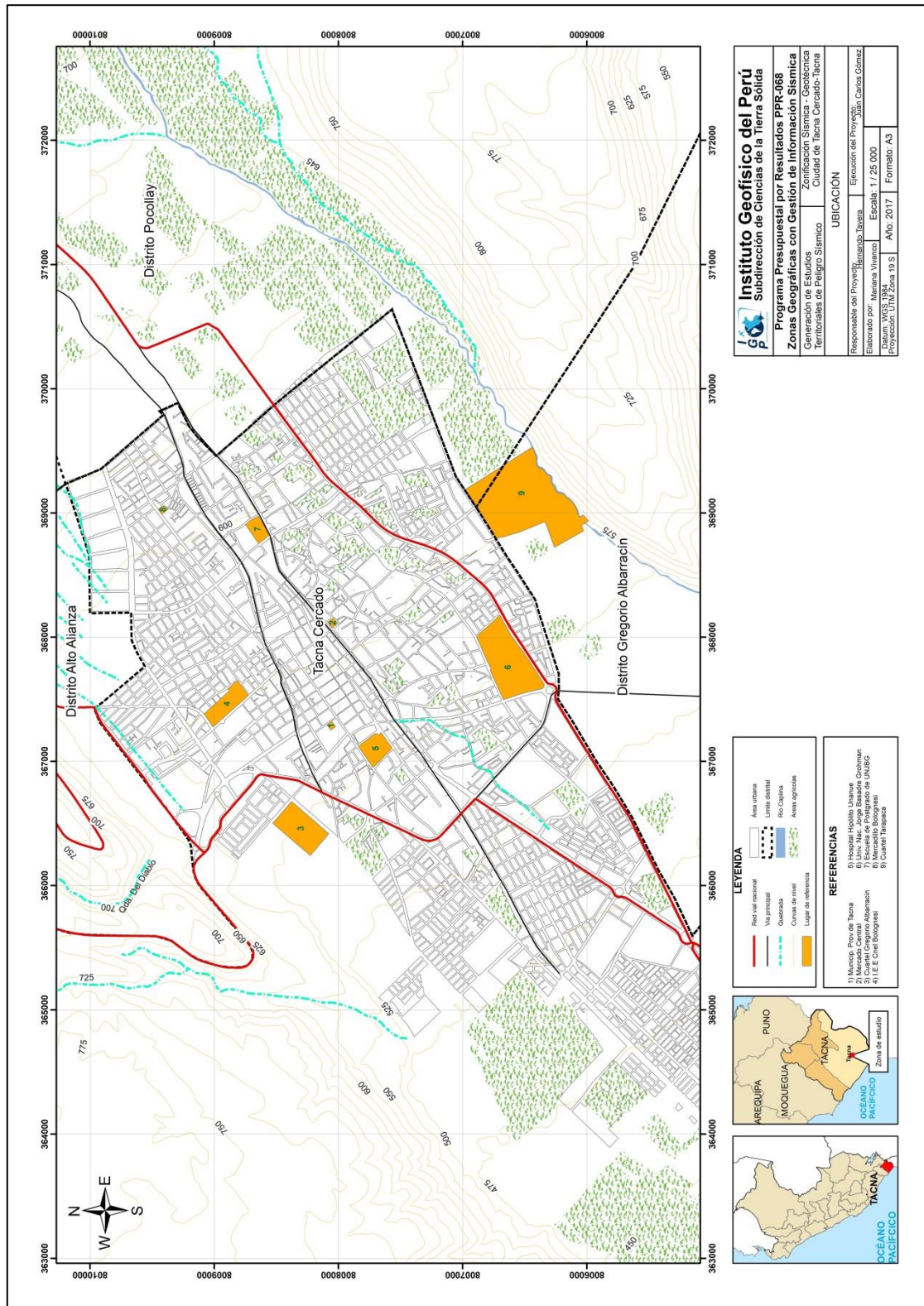


Figura 3: Mapa de ubicación geográfica de la ciudad de Tacna.

El área de estudio comprende de un área de 13 km<sup>2</sup> aproximadamente, abarcando el ámbito urbano de la ciudad de Tacna comprendida por el Cercado, y las urbanizaciones de Villa Hermosa, Las Bugarvillas, Jesús María, Leoncio Prado, Francisco Bolognesi, Caplina, Natividad y Jesús María.

### **1.3. Accesibilidad y Clima**

El acceso a la ciudad de Tacna, por vía terrestre desde Lima, es por la carretera Panamericana Sur recorriendo aproximadamente a 1000 km. Asimismo Tacna cuenta con el Ferrocarril “Tacna- Arica”; que se desplaza desde la ciudad de Tacna hasta la ciudad de Arica (norte de Chile) y viceversa; recorriendo una distancia aproximada de 63 km; asimismo, desde Arica se puede acceder a la ciudad de Tacna por la carretera costanera. Por último, el acceso por vía aérea; Lima- Tacna se realiza en un tiempo aproximado de 1 hora 40 min y desde Arequipa en aproximadamente 35 minutos.

Para determinar las condiciones climáticas de la ciudad de Tacna, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación meteorológica Jorge Basadre está ubicada a 1.40 km al SE de la Plaza principal de la ciudad de Tacna, en las coordenadas geográficas; Latitud: 18° 1´ 36.8", longitud: 70° 15´ 5.5" y cota 538 m.s.n.m. Según la información registrada en esta estación (período 1995 – 2000), se determina que la ciudad presenta un clima templado-cálido. Las temperaturas medias alcanzan la mínima de 9.5°C en invierno (julio) y máxima de 27.2 °C en verano (febrero) (Tabla 1 y Figura 4). Por otro lado, las precipitaciones pluviales son mínimas e irregulares variando de finas garúas en la costa durante el invierno hasta máximas de 80 mm, en verano (años sin presencia del evento “Niño”).

### **1.4. Economía**

La región Tacna cuenta con 237, 524 hectáreas para uso agropecuario, de las cuales 52,4 % son pastos naturales, 45,9 % dedicados a la agricultura y un 1,7 % de superficie forestal. En el área minera cuentan con la extracción de cobre a tajo abierto en la mina de Toquepala y se refina en la fundición de Ilo para su exportación. La región Tacna participa con el 11.99 % de la producción peruana del Cobre, ocupando el cuarto

lugar después de Ancash, Arequipa y Moquegua. Asimismo, se creó la zona franca de Tacna en respuesta al impulso gubernamental que se dio en Chile a la Zona Franca de Iquique y al constante contrabando que generó la importación de productos desde el sur.

Tabla 1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales (1995- 2000). Programa de Ciudades Sostenibles – Primera Etapa, 2007.

ESTACIÓN METEOROLÓGICA JORGE BASADRE			
AÑO	TEMPERATURAS MEDIAS (°C)		PRECIPITACIÓN TOTAL(mm)
1995	28.5	9.7	5.4
1996	28.1	9.2	10
1997	28	13.1	81.1
1998	29.7	10.4	30.6
1999	27.3	9.5	12.5
2000	27.2	9.5	46.1

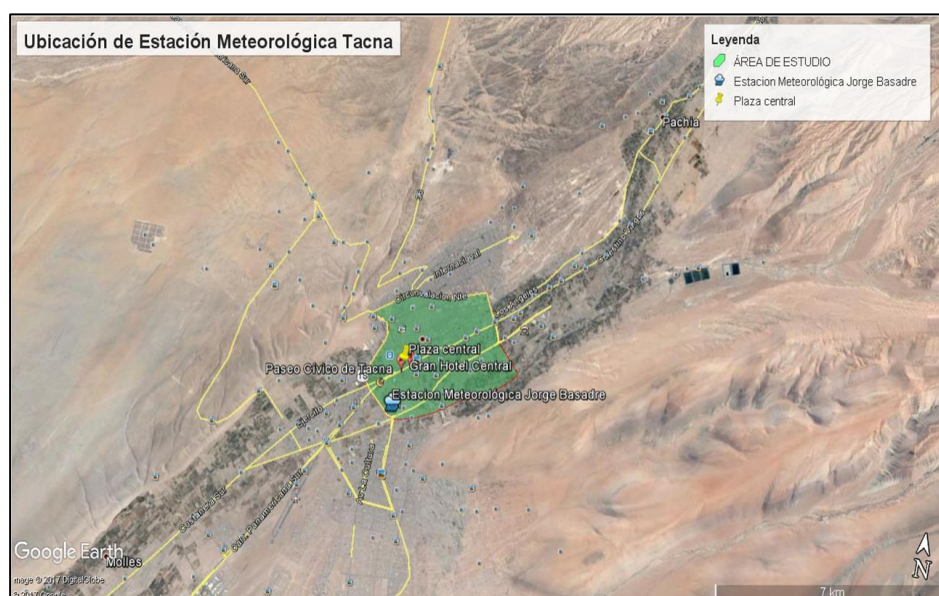


Figura 4: Estación Meteorológica “Jorge Basadre”, ubicada a 1.4 km al SE de la ciudad de Tacna.

El PBI per cápita de la región Tacna calculado en el año 2004 era de 11'580 nuevos soles. La población económicamente activa de Tacna se desempeña mayormente de manera independiente, esto es en negocios propios que alcanzan al 35% de la población. Otro grupo importante lo representan los empleados y los obreros con el 22.3 % y el 21 % respectivamente.

## 1.5. Estudios Previos

Para el distrito y ciudad de Tacna, se ha recopilado información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones a fin de ser considerada para proyectar los objetivos del presente estudio; además de complementar los resultados a obtenerse. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

- En el 2015, en el estudio “Caracterización dinámica de los suelos en la ciudad de Tacna” realizado por Alva y Ortiz (2015), donde determina las características dinámicas de los suelos de la ciudad de Tacna mediante el uso de análisis de información acelerográfica e investigación geofísica (MASW). Además, se realiza una estimación de los parámetros elásticos del suelo (módulo de corte, módulo de Young).
- En el 2014, en la tesis “Geología urbana y procesos de zonificación territorial en la ciudad de Tacna” desarrollada por Chipana (2014), se indica que la ciudad de Tacna presenta alta vulnerabilidad física ante la ocurrencia de un sismo; además incluye la zonificación de uso y ocupación del suelo, agrupándolos en cinco categorías: desde zona A estables independientes (con excelentes condiciones para la intervención urbanística), hasta zona E áreas no utilizables. En este estudio, se clasifica al cercado como zona A y zona B (zonas con restricciones geológicas leves).
- En el 2012, INGEMMET actualiza la “Geología de los cuadrángulos de la Yarada, Tacna y Huaylillas” *Boletín N° 145 – Serie A: Carta Geológica Nacional*. En este informe se señala que Tacna se encuentra asentada en la planicie costanera sobre depósitos aluviales (Qh-al) cuyos aportes provienen desde las partes altas de la cordillera occidental.
- En el 2004, INDECI – PNUD Ciudades Sostenibles realizó el “Mapa de peligros de la ciudad de Tacna”. En este informe se identifica los peligros para la sostenibilidad física de la ciudad teniendo en cuenta el entorno geográfico y las características físicas de los suelos. Este estudio concluye que está probada la existencia de aguas subterráneas a profundidades del orden de los 100m. Asimismo, se estableció dos niveles de peligros múltiples en función a la información recogida en campo: zonas de peligro bajo con suelos con poca

probabilidad de asentamientos (todo el cercado) y zonas de peligro medio, en la cual, frente a una variación del clima con precipitaciones altas, podrían ocasionar inundaciones en las riberas de los ríos y quebradas.

- En el 2004, Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el compendio “El Sismo del 23 de junio 2001 en la región sur de Perú”, muestra la distribución de las intensidades sísmicas en la escala MSK sobre el plano catastral de la ciudad de Tacna. Se observa que, en el centro de la ciudad, por la avenida 28 de Julio y en el AA. HH Leoncio Prado predominan valores de intensidades de 5 y por la Ubr. Caplina, Santa Cecilia, Las Buganvilias, AA. HH Jesús María y el pueblo joven Nuestra Sra. de la Natividad, evaluadas predominaron valores de intensidad de 6, siendo estas las más altas.

## 2. 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 controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en 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 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, 2004; Bernal, 2002), ver Figura 5.



Figura 5: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

La metodología a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, considera estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica a partir de observaciones de campo y la toma de datos 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.

## 2.1. La Norma Técnica E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades mecánicas, tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, o alternativamente, para suelos granulares, considera el promedio ponderado de los  $N_{60}$  obtenidos mediante un ensayo de penetración estándar (SPT), o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada  $S_u$  para suelos cohesivos. Se estable 5 perfiles (Tabla 2):

- **Perfil Tipo  $S_0$ : Roca Dura**, corresponde a las rocas sanas con velocidades de propagación de ondas de corte ( $V_S$ ) mayor a 1500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_1$ : Roca o Suelos Muy Rígidos**, a este tipo corresponden rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda de corte  $V_S$ , entre 500 y 1500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_2$ : Suelos Intermedios**, son suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte  $V_S$  entre 180 y 500 m/s.

- **Perfil Tipo S<sub>3</sub>: Suelos Blandos**, corresponden suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$  menor o igual a 180 m/s.
- **Perfil Tipo S<sub>4</sub>: Condiciones Excepcionales**, corresponde a suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio. Será determinado con un Estudio de Mecánica de Suelos (EMS).

Tabla 2: Clasificación de los perfiles de suelo según la norma E.030

Perfil	$V_{s30}$ (m/s)	Descripción
S <sub>0</sub>	> 1500	Roca dura
S <sub>1</sub>	500 a 1500	Roca o suelo muy rígido
S <sub>2</sub>	180 a 500	Suelo medianamente rígido
S <sub>3</sub>	< 180	Suelo blando
S <sub>4</sub>	Clasificación basada en el EMS	Condiciones Excepcionales

La velocidad de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{V_{si}} \right)}$$

Dónde:

$d_i$  = espesor de cada uno de los estratos n.

$V_{si}$  = velocidad de ondas de corte (m/s)

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 Norma E.030 (Diseño Sismorresistente). De acuerdo a los estudios realizados, se establece la existencia de 4 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, con velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) varía entre 500 y 1500 m/s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana.

**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, con velocidades de las ondas de corte ( $V_s$ ) que varía entre 180 y 500 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana.

**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 0.7 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 ( $V_s$ ) fluctúa alrededor de los 180 m/s.

**ZONA IV:** Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Su comportamiento dinámico 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).

- Zona IVa:** Depósitos eólicos, fluviales, marinos y/o suelos pantanosos.
- Zona IVb:** Zonas de topografía irregular, susceptibles a generar derrumbe, flujos detríticos.
- Zona IVc:** Depósitos de relleno sueltos, desmontes heterogéneos, rellenos sanitarios.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la estructura, no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

## CONCLUSIONES

Para la Ciudad de Tacna se han identificado, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procesamiento establecido en la Norma de construcción Sismoresistente E-030, la existencia de un tipo de suelo S1:

- Los materiales que conforman el subsuelo de la ciudad de Tacna corresponden a depósitos aluviales (gravas, arenas y limos) con un espesor de 10 m. aproximadamente, y depósitos eólicos conformados por arenas. El substrato rocoso de la ciudad en mención lo constituyen rocas tipo volcánicas-sedimentarias (conglomerados polimícticos, tobas retrabajadas, areniscas y lutitas) de la Formación Millo que afloran alrededor de la zona de estudio en la unidad geomorfológica lomas.
- Los eventos geodinámicos identificados en la zona de estudio son los flujos de lodo en la quebrada “Del diablo”, que de ocurrir una precipitación excepcional, se generarían los mismos y afectarían las viviendas del casco urbano de Tacna, sector La Florida, San Antonio, avenidas principales (Av. Circunvalación, Av. Hipólito Unanue), locaciones tales como: Terminal terrestre Nacional e internacional; e inundaciones en la margen derecha del río Caplina que afectaría la infraestructura física de Tacna (Cercado).
- Se identificaron cuatro tipos de suelos en la ciudad de Tacna, entre los cuales predominan: Gravas mal graduadas (GP) en Tacna centro que abarcan el 50% de Tacna Cercado y presentan capacidad de carga admisible alta, Gravas limosas (GM) ubicadas al lado suroeste de Tacna en el sector de Santa Cruz de Para abarca el 15 % del área de estudio (Tacna), estas presentan capacidad de carga admisible muy baja; Arena limosa con gravas (SM) ubicados al suroeste en el sector de Ciudad Perdida y Asociación de Viviendas Alcides Carrión, abarcan el 20% de Tacna (Cercado) estos suelos presentan capacidad de carga muy baja y, Arena arcillosa limosa con grava (SC-SM) ubicado al noreste de Tacna (casco urbano) que abraza el 15% de Tacna (Cercado) presenta capacidad de carga admisible muy baja.
- Los suelos de Tacna responden a periodos de 0.1 y 0.3 segundos, los cuales se distribuyen de manera casi uniforme sobre todo el área de estudio. Asimismo,

hacia el sur por la UNJBG, por la urbanización Justo Arias Argües, las Buganvilias y la zona céntrica, los suelos son influenciados por periodos de 0.7 y 0.9 segundos. Hacia el extremo NO, por la urb. Leoncio Prado, los periodos tienden a valores menores muy bien definidos que fluctúan entre 0.2 segundos. Por otro lado, conforme se tiende al extremo NE, límite con los distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza, los periodos se definen en 0.3 segundos, con amplificaciones mayores que en toda el área estudiada (3 veces). Finalmente, existen áreas donde los suelos no responden a algún periodo predominante: Urb. Señora de la Natividad, por la municipalidad provincial de Tacna y por el mercado central.

- Los resultados obtenidos para la ciudad de Tacna han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo (Figura 6), sus propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de una zona sísmica correspondientes a suelos Tipo S1; es decir, suelos muy rígidos. Asimismo, se define como caso especial, al sector ubicado por el hospital Hipólito Unanue, donde sobresalen periodos de 0.1 y 0.7 con amplificaciones de hasta 4 veces, resultados que sugieren la presencia de suelos con una respuesta dinámica compleja ante la ocurrencia de sismos.

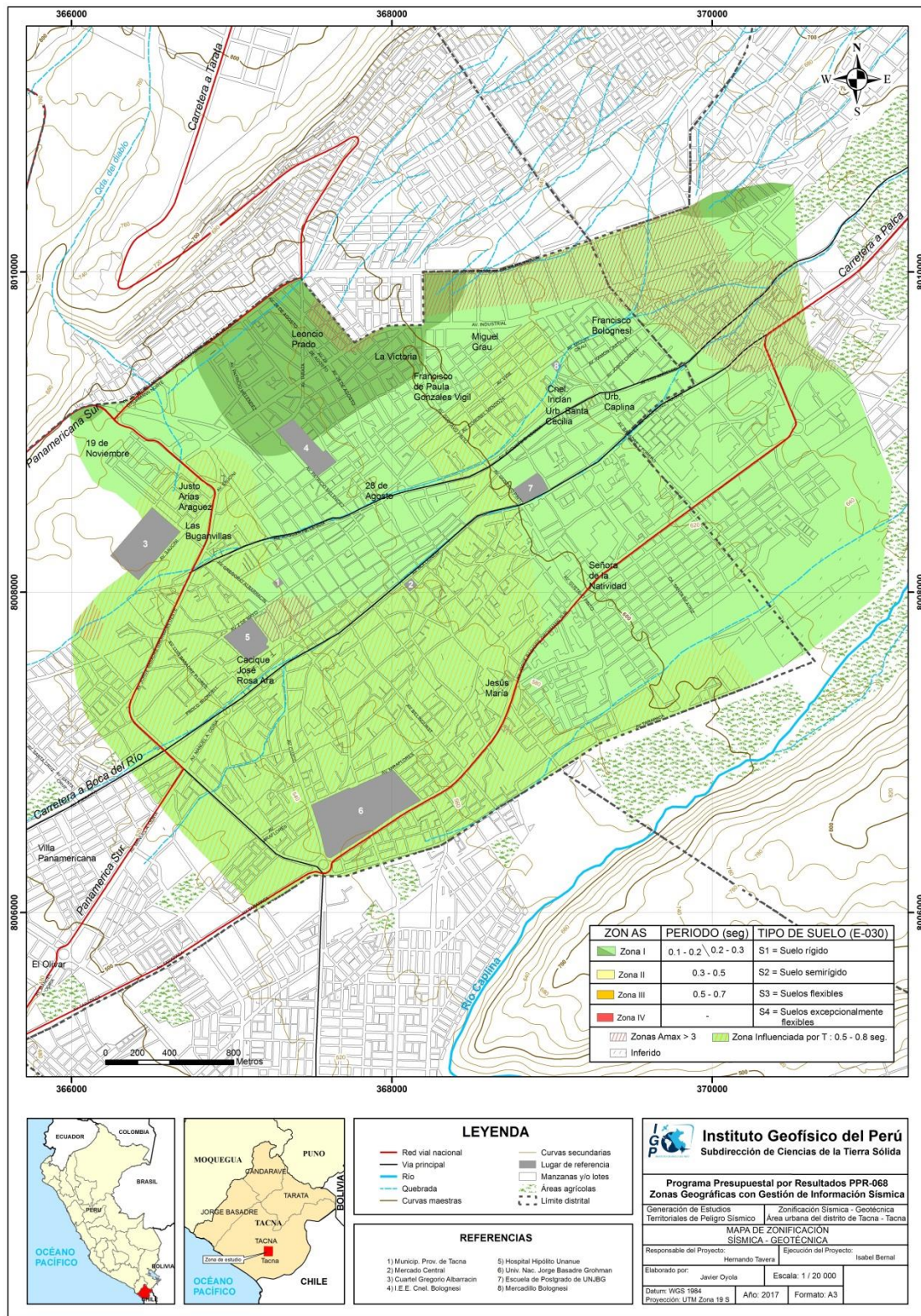


Figura 6: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Tacna.

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA  
DE LA CIUDAD DE TACNA**

## CONTENIDO

### 1. METODOLOGÍA

### 2.- GEOMORFOLOGÍA

#### 2.1. Base topográfica

#### 2.2. Modelo digital del terreno

#### 2.3. Pendientes

##### 2.3.1. Clasificación del grado de pendientes

#### 2.4. Unidades geomorfológicas

##### 2.4.1. Terraza aluvial

##### 2.4.2. Loma

##### 2.4.3. Lecho Fluvial

### 3.- GEOLOGÍA

#### 3.1. Geología regional

##### 3.1.1. Geología histórica

##### 3.1.2. Geología estructural

#### 3.2. Geología local

##### 3.2.1. Formación Huaylillas

##### 3.2.2. Formación Millo

##### 3.2.3. Depósitos Cuaternarios

### 4. GEODINÁMICA

#### 4.1. Procesos de geodinámica interna

#### 4.2. Procesos de geodinámica externa

#### 4.3. Zonas susceptibles a procesos geodinámicos

##### 4.3.1. Flujos de lodo

##### 4.3.2. Zona Susceptible a Inundaciones

## 5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS

### 5.1. Exploraciones a cielo abierto

#### 5.1.1. Descripción de calicatas

### 5.2. Densidad del suelo in-situ

### 5.3. Exploraciones con posteadora manual

### 5.4. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

#### 5.4.1. Correlación entre “N” DPL y el “N” SPT (ASTM D1586)

### 5.5. Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)

### 5.6. Capacidad de carga admisible

#### 5.6.1. Carga última

#### 5.6.2. Tipos de Capacidad de carga admisible

### 5.7. Clasificación de suelos SUCS

## 1. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización geológica y geotécnica de los suelos en la ciudad de Tacna, se ha seguido la siguiente metodología:

- ✓ **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales pancromáticas no estereoscópicas (GeoEye-1 del Servidor Digital Globe, 2013, con resolución 0.60 m), con la finalidad de delimitar la zona de estudio, así como la recopilación de información bibliográfica de la zona a escala regional y local (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
  
- ✓ **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1: 30 000; asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos de la zona: Inundaciones (desborde del río Caplina) y zonas potencialmente susceptibles a la ocurrencia de flujos.
  
- ✓ **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos de acuerdo al siguiente detalle:
  1. Elaboración de calicatas: Se realizaron 08 calicatas distribuidas equitativamente entre el casco urbano y área de expansión urbana. Estas se realizaron a una profundidad promedio de 3.00 m.
  2. Ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL): se realizaron con el fin de determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados. En la ciudad de Tacna se realizaron 09 DPL.
  3. Ejecución de auscultaciones haciendo uso de posteadora: se distribuyeron en zonas intermedias a la ubicación de las calicatas más próximas, con el fin de complementar la información sobre los tipos de suelos. En el área de estudio se realizaron 10 posteos.
  
- ✓ **Laboratorio:** Procesamiento de las muestras de suelos, a través de ensayos de mecánica de suelos como la granulometría (clasificación SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad de carga admisible).
  
- ✓ **Gabinete II:** Elaboración del informe técnico adjuntando las fichas geotécnicas (calicatas, DPL y posteos), geodinámicas (identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa e inundaciones) y planos temáticos a escala 1:25 000.

## 2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas de relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan. Este relieve es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como creadoras de grandes elevaciones y depresiones producidas fundamentalmente por movimientos en masa de componente vertical; mientras que, las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado; estos últimos llamados procesos de geodinámica externa que agrupa a la cadena de meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008). El estudio de la geodinámica externa se efectúa en un sistema proceso- respuesta, siendo el primero el agente creador (origen) y el segundo, la geoforma resultante. El término geoforma es un concepto genérico que designa a todos los tipos de formas de relieve independientemente de su origen y dimensión (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990). En este capítulo se describen las características físicas de las geoformas existentes en la Ciudad de Tacna.

Previamente, en base al levantamiento topográfico y mediante herramientas computacionales (SIG) se ha elaborado los planos: Modelo Digital del Terreno y de pendientes, con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno. Estos mapas fueron verificados y validados durante el trabajo de campo realizado en la Ciudad de Tacna.

### 2.1. Base topográfica

La base topográfica se obtuvo a partir del levantamiento fotogramétrico realizado en la ciudad de Tacna sobre un área de 620 hectáreas (ha). Este trabajo se realizó con el propósito de obtener la representación digital del relieve que conforman las siguientes unidades: terraza aluvial, lomas y lecho fluvial.

Para realizar el levantamiento, se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (VANT), la metodología y los parámetros empleados para realizar el levantamiento fotogramétrico a escala 1: 25,000 con curvas de nivel equidistantes de 25 m (Figura 1).

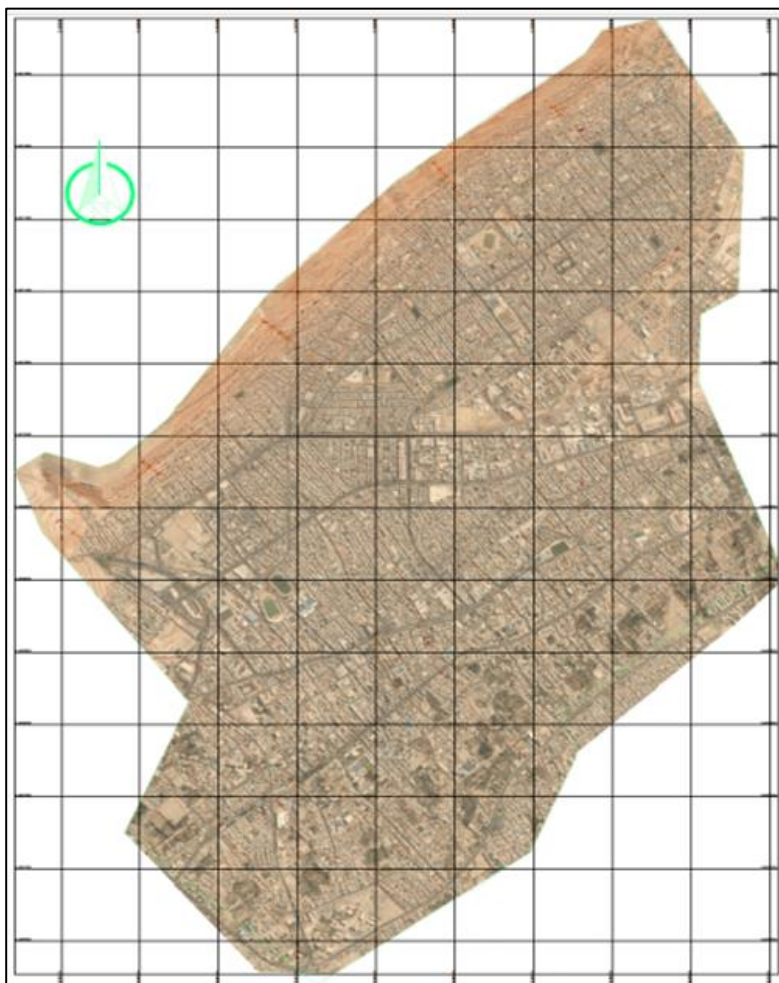


Figura 1: Ortofoto generada con uso del DRONE, con resolución en el terreno 18 cm/pix.

## 2.2. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Los MDT son representaciones gráficas de la superficie del terreno, conformado por un número de puntos con información altimétrica y planimétrica. Por su naturaleza digital, son utilizados para realizar mapas de pendientes, acumulación de horas de radiación y parámetros morfométricos, entre otros (Felicísimo, 1994).

Para la elaboración del MDT de la ciudad de Tacna, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel diseñadas anteriormente, obteniendo como resultado; la representación digital de la superficie del terreno de la localidad sobre un área de 36 km<sup>2</sup> (Figura 2). En base al MDT elaborado para la ciudad de Tacna se ha reconocido que la zona urbana se asienta sobre una terraza aluvial con cotas entre 574 a 600 m.s.n.m. En los alrededores, hacia la parte noroeste y noreste de la ciudad de Tacna, se observan lomas que presentan un desnivel máximo de 200 m con respecto al área urbana.

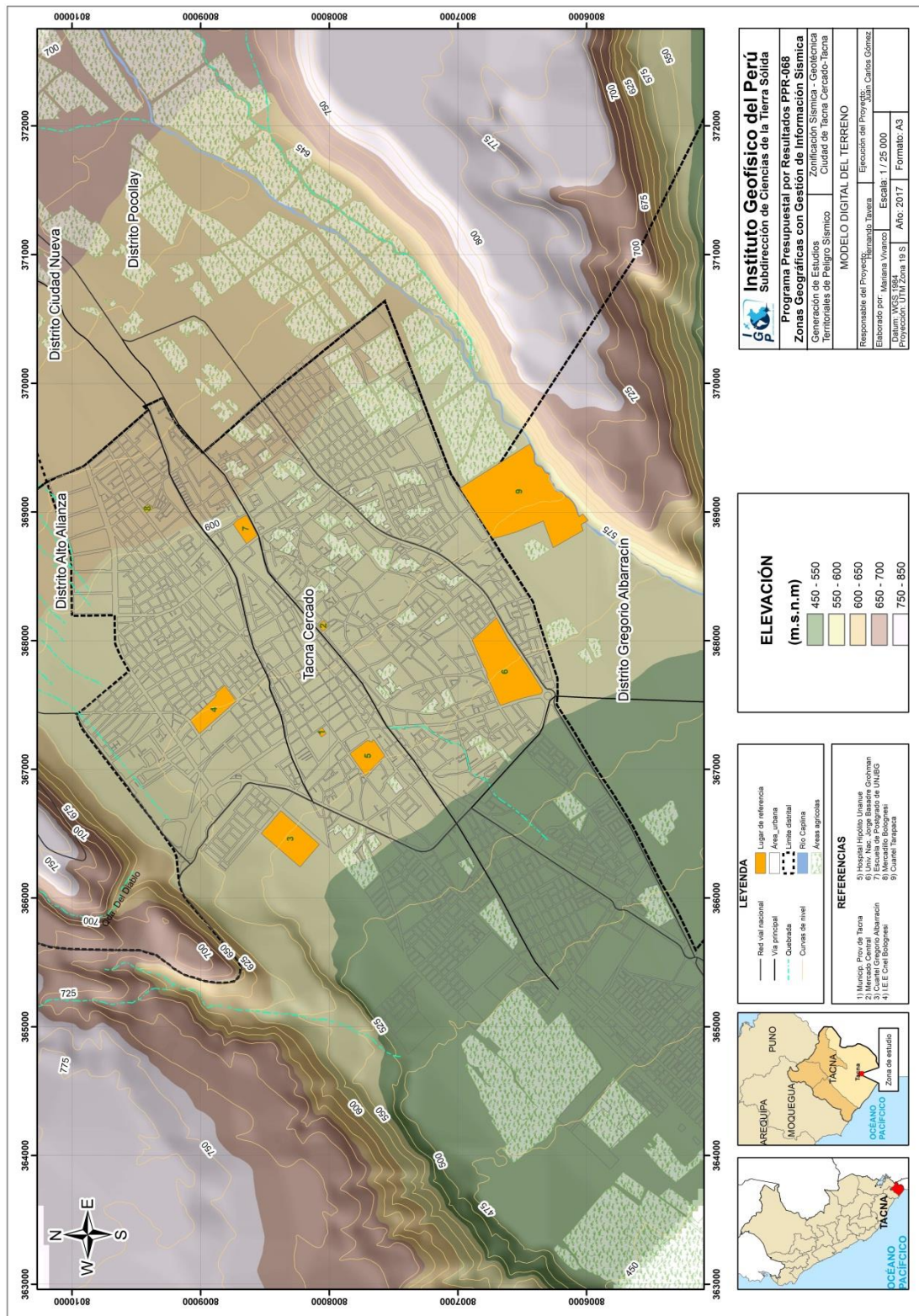


Figura 2: Mapa de modelo digital del terreno para la ciudad de Tacna y alrededores.

## 2.3. Pendientes

Este parámetro influye en la formación de los suelos y condiciona el proceso erosivo, puesto que, mientras más pronunciada sea la pendiente, la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999).

El mapa de pendientes de la ciudad de Tacna (Figura 3), fue obtenido a partir del MDT elaborado anteriormente, haciendo uso de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc.) y así diferenciar gráficamente, los ángulos de inclinación del relieve en el área de estudio.

### 2.3.1. Clasificación del grado de pendientes

Para la clasificación de los rangos de pendientes se usó la hipótesis de Fidel et al. (2006), siendo su contribución los valores de la Tabla 1:

Tabla 1: Rangos de pendientes del terreno.

PENDIENTE EN GRADOS (°)	CLASIFICACIÓN
<5	Muy baja
5 - 20	Baja
20 - 35	Media
35 - 50	Fuerte
>50	Muy fuerte

La ciudad de Tacna, se encuentra asentada sobre una terraza aluvial con pendientes menores a 10°; mientras que en los extremos noroeste y noreste las laderas de lomas presentan inclinaciones que varían entre 20° y 35° (Figura 3).

## 2.4. Unidades geomorfológicas

Estas unidades con ciertas características físicas son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno (procesos internos) y exógeno (procesos externos) formando relieves positivos y negativos.

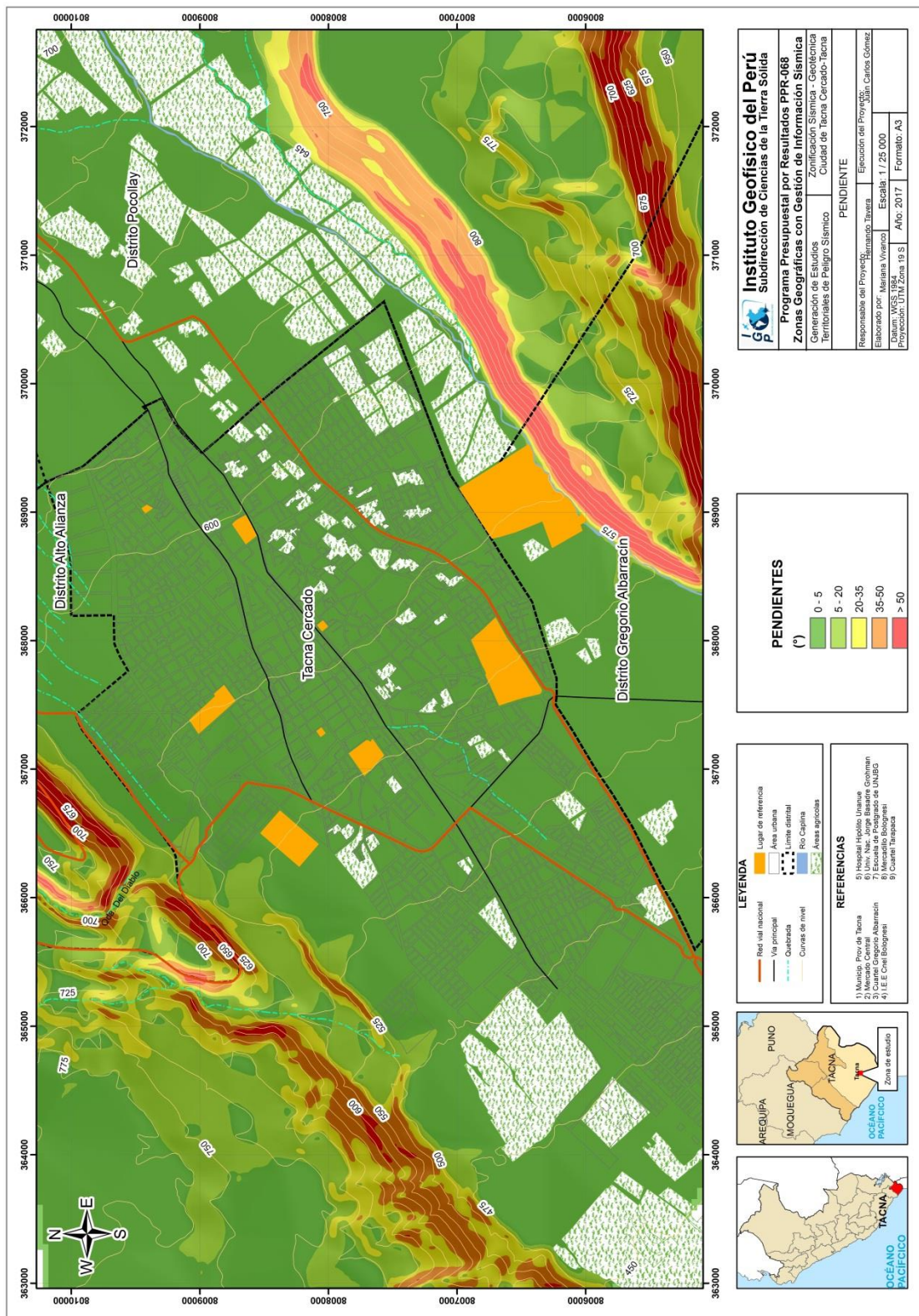


Figura 3: Mapa de pendientes y alrededores para la Ciudad Tacna.

**a) Características físicas**

Las características físicas de las unidades geomorfológicas; es decir, su relieve expresa una combinación de parámetros como: pendiente, altura, geometría y drenaje (modificado de Pike et al., 2009), las cuales son directamente accesibles a la percepción visual proximal o distal, sea humana o instrumental.

**b) Procesos**

Los agentes modeladores como el agua, viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos como el intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación, generando diferentes geoformas que pueden ser clasificados de acuerdo a su origen, en depositacional y denudacional (erosional). Otros procesos internos como el magmatismo y tectonismo, generan unidades de origen estructural. En el área de estudio se han delimitado tres unidades geomorfológicas y sus características físicas y su origen, son descritas en la Tabla 2 y Figura 4.

Tabla 2: Descripción de las unidades geomorfológicas, de la ciudad de Tacna, en base a sus características físicas y origen.

GEOMORFOLOGÍA TACNA				
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		PROCESO		UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Pendiente	<5°	Origen	Depositacional	Terraza aluvial
Geometría	irregular			
Drenaje	irregular			
Pendiente	<35°	Origen	Denudacional	Loma
Altura	<300 m			
Geometría	alargada			
Drenaje	dendrítico			
Pendiente	<5°	Origen	Denudacional	Lecho fluvial
Geometría	alargada			
Drenaje	variable			

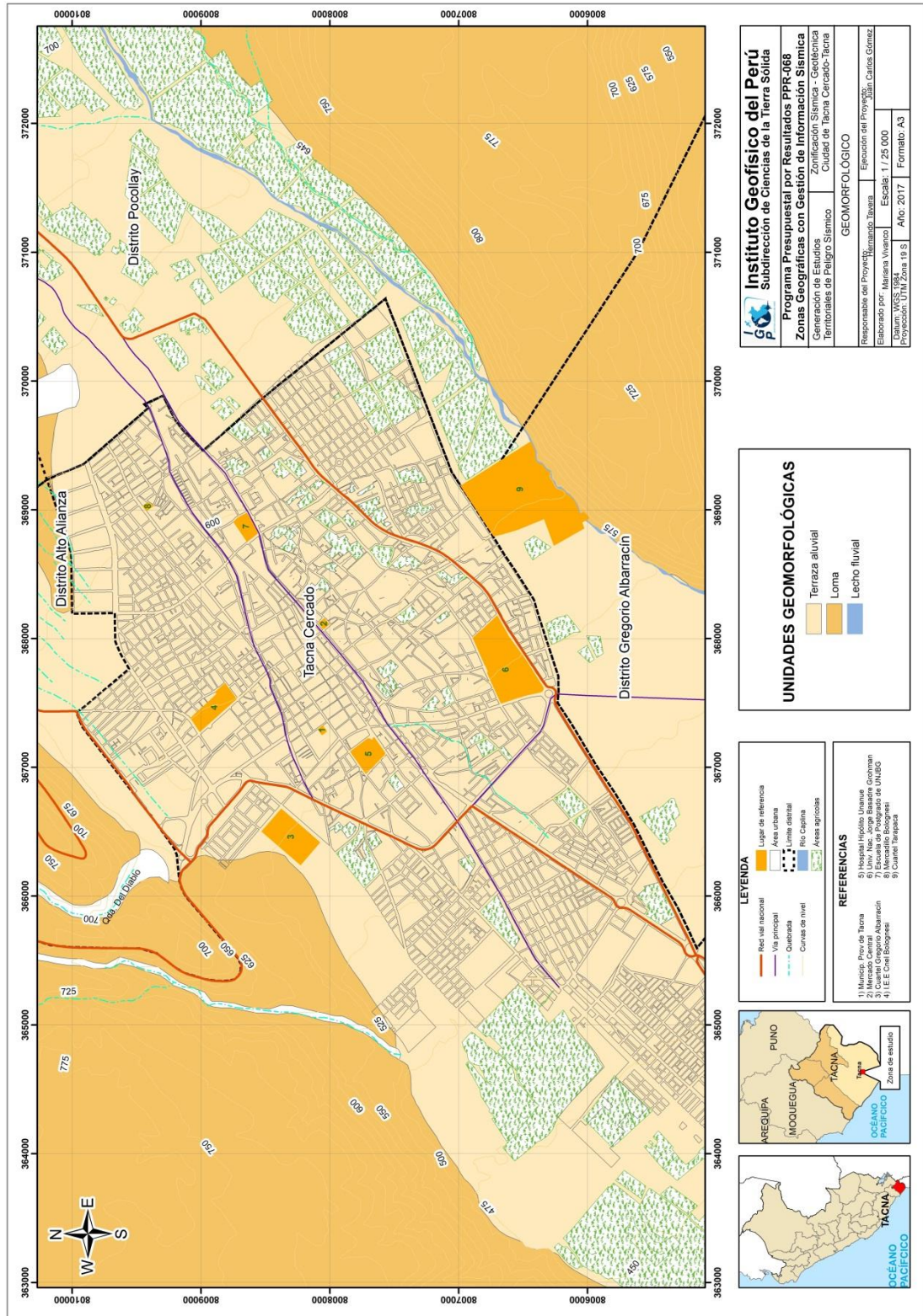


Figura 4: Mapa geomorfológico para la ciudad de Tacna.

### 2.4.1. Terraza aluvial

Esta unidad geomorfológica, de origen depositacional, presenta una pendiente  $<5^\circ$ , así como una geometría irregular y drenaje variable. Abarca el 70% de la zona en estudio. El 100% de las viviendas del distrito de Tacna, se asientan sobre esta geoforma (Figura 5).



Figura 5: Terraza aluvial producto de la acción erosiva del río Caplina. Sobre esta unidad se asienta la ciudad de Tacna.

### 2.4.2. Lomas

Esta unidad geomorfológica presenta una pendiente  $<35^\circ$ , altura  $<300$  m, geometría alargada, drenaje dendrítico y origen denudacional. Abarca el 20 % de la zona de estudio.

Se ha identificado la presencia de lomas al noroeste, suroeste, noreste y sureste de la ciudad de Tacna (Valle del río Caplina). Sobre la loma de la margen derecha del río Caplina, que recibe el nombre de cerro Intiorko, se asientan los distritos de Ciudad Nueva y Alto de La Alianza; mientras que, en la margen izquierda, la loma recibe el nombre de cerro Arunta, que pertenece al cuartel Tarapacá (Figuras 6 y 7).



Figura 6: Loma (cerro Arunta) ubicada a la margen izquierda del río Caplina.



Figura 7: Loma (cerro Intiorko) ubicada en la margen derecha del río Caplina.

### 2.4.3. Lecho Fluvial

Esta unidad geomorfológica, de origen denudacional, presenta una pendiente  $<5^\circ$ , así como una geometría alargada y drenaje variable. Abarca el 10% de la zona en estudio.

En la ciudad de Tacna, el río Caplina está ubicado al noreste de la misma, y su cauce discurre por la parte baja del cerro Arunta recorriendo aproximadamente 5 km en el área de estudio, y llevando consigo materiales por arrastre (gravas, arenas y limos), saltación y rodamiento en el fondo (Figura 8).



*Figura 8: Tacna se asienta en la margen derecha del río Caplina.*

## **GEOLOGÍA**

La geología es la ciencia que estudia la composición, estructura interna y externa de los materiales que componen al planeta Tierra y los procesos por los cuales ha venido evolucionando a lo largo de millones de años desde su origen hasta la actualidad. Para entender la geología de un lugar, se estudia la litología de las formaciones geológicas o unidades litoestratigráficas, determinando las características físicas de los componentes de las rocas, comprendiendo que estas son originadas por procesos internos (tectónica de placas, ascenso de magma, etc.) como también, por procesos externos que modelan la superficie terrestre tales como: Meteorización, erosión, transporte y depositación de rocas preexistentes, en base a estos procesos también se puede entender cuál es la dinámica de formación de los suelos.

De esta manera, para tener una idea clara de la geología local, se parte por conocer primero la geología histórica, es decir se estudian los eventos geológicos que ocurrieron en el pasado, que fuerzas actuaron en la formación de las estructuras geológicas, que tipos de rocas que se depositaron o emplazaron en un determinado tiempo y espacio geológico a escala regional, esta ciencia es complementada con otras ramas de la geología como son: la geología estructural, estratigrafía, sedimentología, geodinámica, geomorfología etc., todas estas disciplinas permiten explicar la complejidad o simplicidad geológica local sobre la cual se asienta una población.

### **3.1. Geología regional**

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Es así que, para la zona de estudio se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2012) a escala 1:50, 000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Neógeno (1.6 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

#### **3.1.1. Geología histórica**

Acosta et al (2012), señalan que el cuadrángulo de Tacna se halla esencialmente en la planicie costanera, en el límite de la Cordillera de la costa y la ladera oeste de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales. La unidad

geomorfológica local es conocida como la superficie de Huaylillas considerada por su gran dimensión, de mayor importancia debido a que es una prueba de la orogenia andina y del vulcanismo a gran escala.

Acosta et al (2012), sostiene que, desde el cretáceo hasta el Paleoceno, la zona de la Cordillera de la Costa es una zona positiva que delimitaba los sedimentos hacia el este; en el Oligoceno se depositan los conglomerados y areniscas continentales de la Formación Moquegua Superior, seguidos de niveles ignimbríticos importantes de la Formación Huaylillas (Mioceno). A partir de los 10 Ma se inicia el socavamiento de la unidad geomorfológica conocida como pampas costeras, producto del levantamiento acelerado de la Cordillera Occidental y la parte Este y Noroeste de la cuenca Moquegua, donde la actividad tectónica del sistema de fallas Incapuquio juega un rol importante. Asimismo, se inicia la sedimentación de la Formación Millo, que utiliza como cuenca sedimentaria el espacio producido por la erosión de las quebradas de los ríos Sama, Caplina, Hospicio y Escritos, que transportan conglomerados, arenas y limos hasta el mar. No queda claro hasta donde se puede considerar como el límite superior de la Formación Millo y donde inicia los depósitos detríticos recientes o del cuaternario; puesto que, los fenómenos que ocurrieron a partir de 10 Ma hasta la actualidad, no variaron en cantidad considerable como para modificar la dinámica de los ríos existentes en la zona.

La hidrogeología regional indica que las direcciones de escurrimiento del flujo subterráneo en el acuífero de La Yarada están regidas por los controles estructurales actuales, debido al sistema de fallas NO-SE Incapuquio, como es la Falla Calientes.

Dentro del área de estudio (Tacna), se considera importante el lineamiento Caplina que recorre el valle del mismo nombre, y en este caso se confirma que el descenso del caudal de las aguas del río Caplina se debe en parte porque discurren por este lineamiento y desemboca en la conexión subterránea con el acuífero de La Yarada. La Formación Huaylillas en el subsuelo se comporta como semiconfinante (impermeable) del acuífero de La Yarada.

### 3.1.2. Geología estructural

Geológicamente, el área de la ciudad de Tacna, se encuentra ubicada dentro de la Cuenca de Arequipa y en donde, los rasgos estructurales son mayormente consecuencia de las últimas fases de deformación andina iniciadas, desde el intervalo Turoniano-Coniaciano (Cretácico Superior), hasta la actualidad. Acosta et al (2012), en base a sus estudios en la cuenca Arequipa, manifiestan numerosas épocas de actividad tectónica pre Cretácica que configuró la inmensa cuenca. Las investigaciones de los sucesos tectónicos observables en el campo demuestran que la evolución geodinámica de la cuenca Arequipa se inició muy probablemente en el Triásico Superior.

Las familias de fallas presentes en la zona de estudio (cuadrángulo La Yarada-Tacna y Huaylillas del Boletín N°145, INGEMMET) tienen direcciones NO-SE como parte del sistema de fallas Islay-Ilo. Este sistema representa los rasgos estructurales más importantes y notorios en la Cordillera de la Costa. Mientras tanto, los rasgos estructurales del sistema de fallas Incapuquio son evidentemente notorios en los extremos norte y noreste de los cuadrángulos de Tacna y Huaylillas. Estas fallas podrían corresponder a los últimos indicios de movimiento de este sistema de fallas en el extremo oeste de la Cordillera Occidental. Es evidente que estos sistemas de fallas también configuran la actual geomorfología de los cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas, conformando los límites de la Cordillera de la Costa, Pampas Costaneras y la vertiente oeste de la Cordillera Occidental (Figura 9).

**Zona de Lineamiento:** Acosta et al, (2012), describe que en el área de estudio se observa la presencia de un lineamiento principal en dirección NE-SO, al que se le denomina lineamiento Caplina.

Este lineamiento se extiende, desde la costa peruana hasta la Cordillera Occidental; encontrándose en el curso principal del río Caplina. En los estudios de geofísica realizados en pampas de la Yarada se pone de manifiesto la existencia en el subsuelo, de fallas o trazas de fallas que fueron identificadas mediante estudios SEV (Martínez et al, 1996), siendo fallas normales y subverticales que se extienden a lo largo de toda la quebrada de los ríos Caplina, Cauñani y Escritos (Figura 10). La información de superficie hallada en

los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x) en el sector Cruz de Pallagua y río Caplina (Acosta et al., 2011), indica la presencia de fallas normales de dirección N 40° y con buzamiento de 57° al SE; y la otra ubicada a 500 m río arriba con dirección N 55° y con buzamiento de 75° al NO. Esta información corrobora la presencia de fallas normales en las pampas de La Yarada (Martínez et al. 1996).

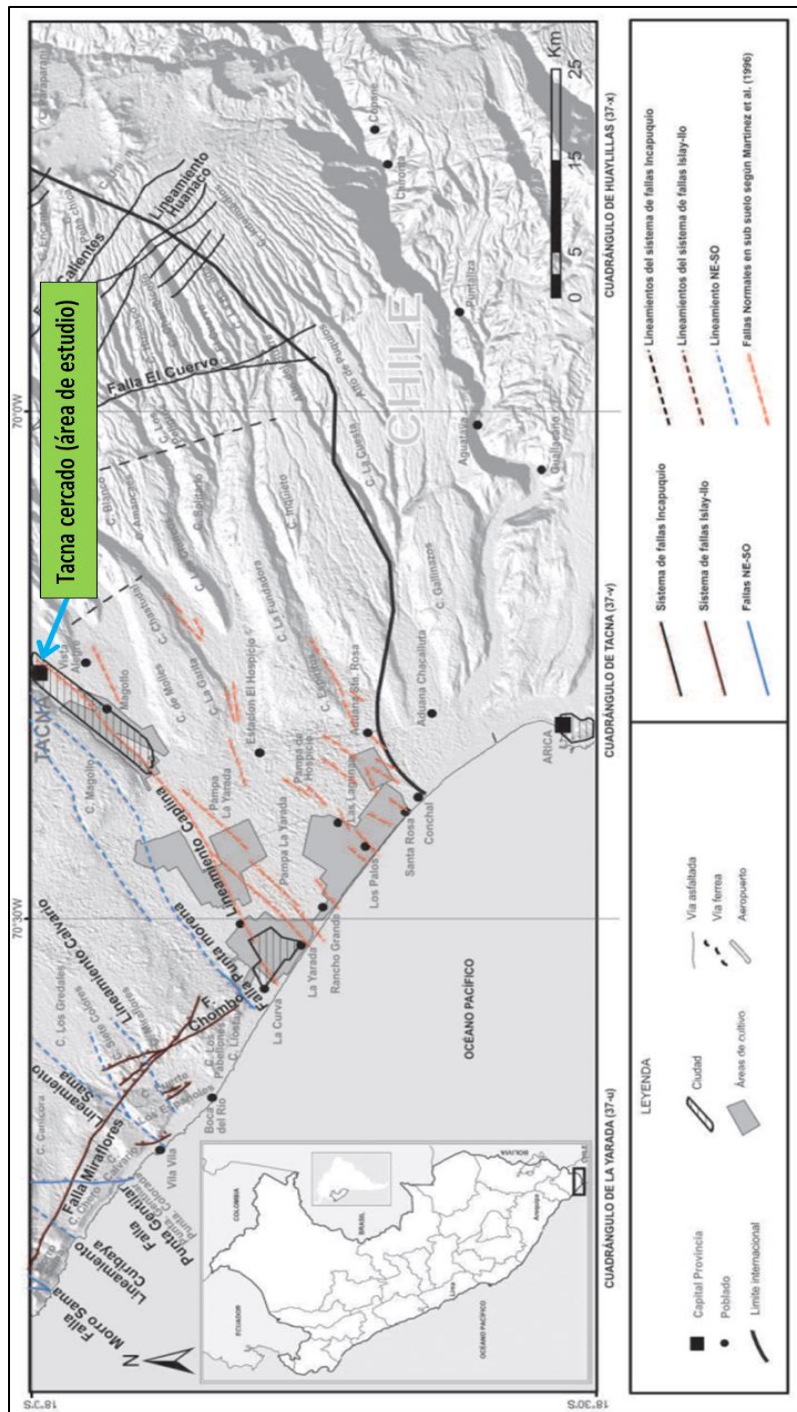


Figura 9: Ubicación de fallas y lineamientos en la zona de la ciudad de Tacna (INGEMMET, 2012).

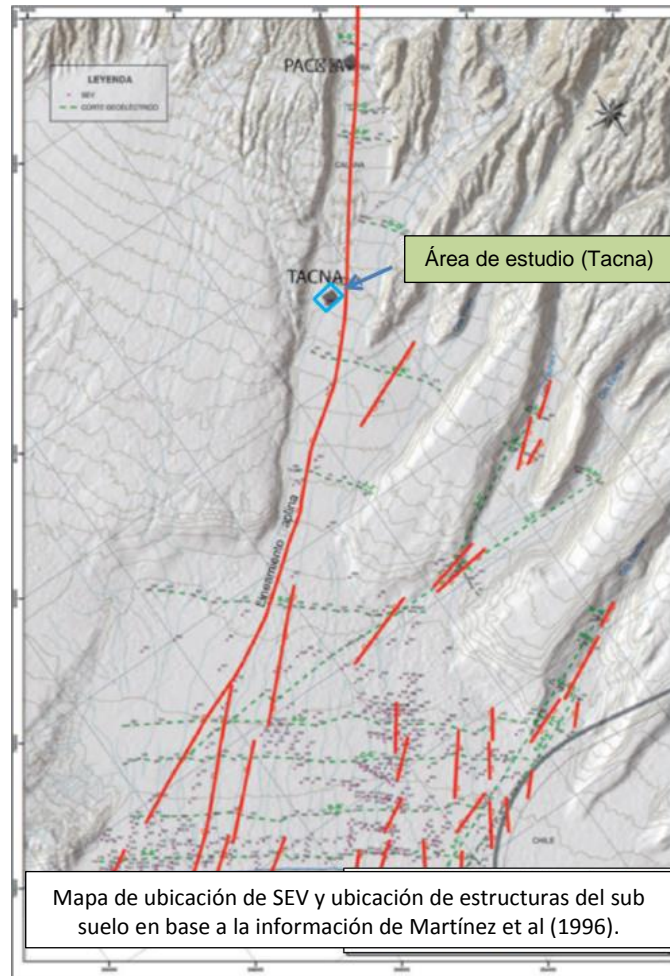


Figura 10: Ubicación del Lineamiento Caplina con respecto a Tacna, (INGEMMET, 2012).

### 3.2. Geología local

Las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Tacna han sido cartografiadas a escala 1:25,000, sobre un área de 36 km<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 11), y sus características se describen a continuación (Tabla 3).

Tabla 3: Columna cronolitoestratigráfica de la zona de estudio.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	SIMBOLO	LITOLOGÍA
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENA	Depósito eólico	Qh-e	Arenas finas
			Depósito aluvial	Qh-al	Bloques, arenas y limos
		PLEISTOCENA	Formación Millo	Np-mi	Conglomerados polimícticos intercalados con tobas retrabajadas
	NEÓGENO	PLIOCENO	Formación Huaylillas	Nm-hu_s	Secuencia de conglomerados intercalados con niveles delgados de limolitas, areniscas y tobas riolíticas, roidacitas de color rosaceo

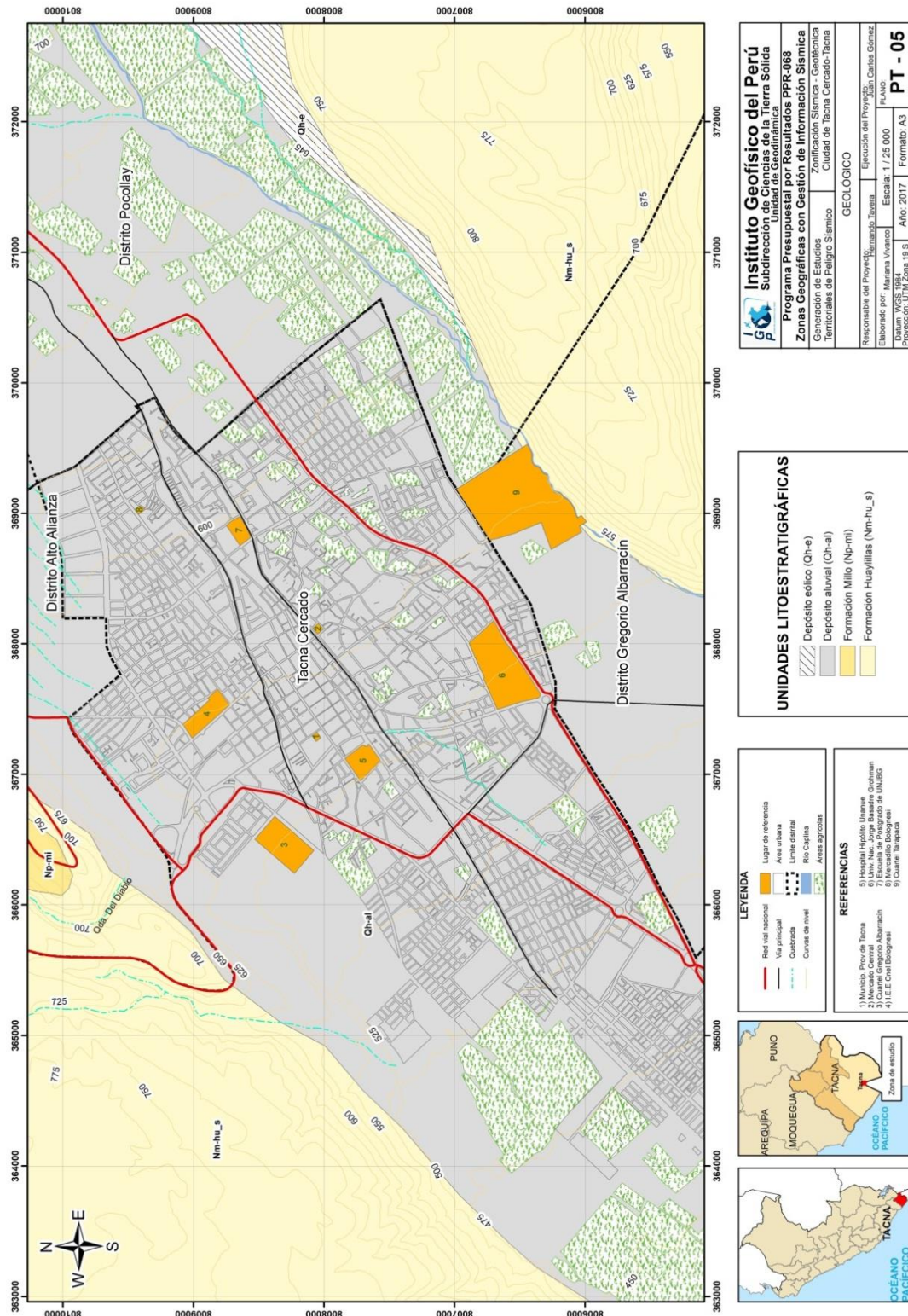


Figura 11: Mapa de la geología local de la ciudad de Tacna y alrededores.

### 3.2.1. Formación Huaylillas (Nm-hu\_s)

La Formación Huaylillas (Wilson y García 1992), comprende una gran superficie piroclástica que cubre, tanto el extremo sur del territorio peruano como el norte chileno. Esta Formación cubre gran parte de las unidades geomorfológicas como la Cordillera de la Costa, planicies costaneras y Cordillera Occidental. Su composición litológica, en mayoría se conforma de tufos ácidos de composición dacítica y riolítica. Algunas de estas secuencias fueron interrumpidas por periodos cortos de abanicos aluviales. Ha sido dividida en tres unidades cuyas sucesiones constan de eventos sedimentarios y volcánicos con características propias. El primer miembro está directamente sobre los sedimentos de la Formación Moquegua (Wilson y García, 1992), el segundo corresponde a la sucesión volcánica más abundante y el tercer miembro, ubicado en las partes bajas de las pampas costaneras (INGEMMET, 2012), este último aflora en las lomas del área de estudio (Tacna).

La serie de sedimentos de la Formación Huaylillas consta de una intercalación de conglomerados y areniscas de color gris oscura con clastos, mayormente de roca volcánica andesíticos en matriz de arenosa cuarzo feldespática y delgados niveles evaporíticos (yeso) (Figura 12). Las rocas que conforman la Formación Huaylillas han sido redepositadas por episodios fluviales intensos, donde la orogenia andina y las precipitaciones regularmente periódicas han interactuado juntas. Se considera que la orogenia andina fue muy activa, puesto que, la actividad volcánica era constante y alcanzó grandes extensiones en sus emanaciones de piroclástico a distancias muy lejanas.



Figura 12: Afloramiento de la Formación Huaylillas en la loma “cerro Arunta”, ubicada a la margen izquierda del río Caplina.

### 3.2.2. Formación Millo (Np-m)

Los materiales que conforman la Formación Millo afloran en el fondo de las quebradas, en zonas amplias y planas que sirven como base de los ríos Caplina, Sama, entre otros. Al norte de la ciudad de Tacna, la litología de la Formación Millo está compuesta por conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas, limolitas y tobas retrabajadas. En el distrito de Tacna, la Formación Millo aflora en la parte noroeste de la loma “Cerro Intiorko” ubicado a la margen derecha del río Caplina (Figura 13).

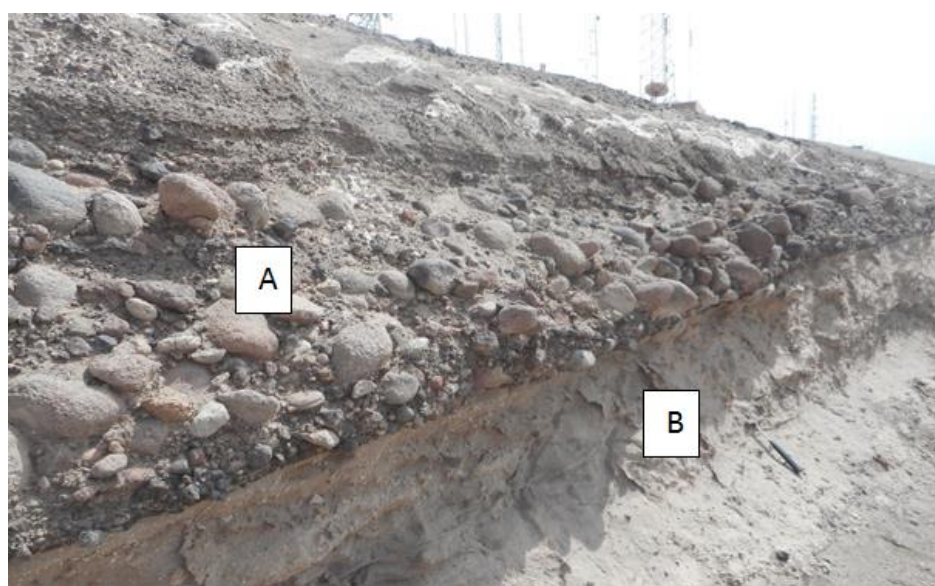


Figura 13: Conglomerados (A) y tobas (B), materiales que constituyen la Formación Millo. Aflora en la loma denominada cerro Intiorko.

### 3.2.3. Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo al sustrato rocoso, conformado por rocas volcano sedimentarias (conglomerados, tobas, areniscas y lutitas), se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente aluvial, y eólicos, los que se describen a continuación

#### a) Depósitos eólicos (Qh-e)

Corresponden a arenas bien seleccionadas y proceden del litoral playero. Este depósito se reconoce en la ladera de la loma “cerro Arunta” ubicada en la margen izquierda del río Caplina, al lado noreste de Tacna (Figura 14).



Figura 14: Depósito eólico (cerro Arunta).

**b) Depósitos aluviales (Qh-al)**

Conformados por conglomerados (gravas, arenas y limos), de origen volcánico sedimentario, y que han sido reconocidos en la llanura aluvial. En la Figura 15 se aprecia el tipo de depósito sobre el cual se asienta el 100 % de la población de Tacna.



Figura 15: Llanura aluvial de Tacna conformada por gravas, arenas y limos.

## **4.-GEODINÁMICA**

Comprende todos aquellos eventos geodinámicos producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que dan como producto eventos que modifican el actual relieve. Es importante recalcar que, analizar factores como la litología permite explicar el origen de los materiales que constituyen las geoformas (colinas, lomas, entre otras) y en las cuales se generan procesos como meteorización y erosión que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

### **4.1. Procesos de geodinámica interna**

Son transformaciones de la estructura interna de la Tierra en relación con los agentes magmáticos, sísmicos y tectónicos. El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana, considerada como la principal fuente sismogénica en el Perú, produciendo los eventos de mayor magnitud conocidos hasta el presente. Otra fuente, la constituye la deformación de la zona continental, que ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores (Cahill & Isacks, 1992; Tavera & Buforn, 2001).

### **4.2. Procesos de geodinámica externa**

Entre estos procesos se encuentran la meteorización (física o mecánica) y la erosión (fluvial, eólica y marina). Estos procesos aprovechan la fuerza de la gravedad; es decir, las rocas descienden algunos metros debido a desplazamientos masivos de terreno o son transportados por medio de las corrientes fluviales hasta depositarse. En general, estos procesos, transportan materiales desde la parte alta de la cuenca hacia la parte baja.

Asimismo, estos procesos tienen como factores condicionantes a la geomorfología (formas de relieve), litología (tipos de rocas y/o suelos), y estructuras geológicas (pliegues y disposición de estratos) que interactúan con los factores detonantes como sísmicos (sismicidad de la zona), climatológicos (incremento de las precipitaciones) y antrópicos (urbanismo, uso del suelo y construcción de vías de comunicación).

**a) Meteorización:** Las rocas que afloran en la superficie terrestre están expuestas a una lenta, pero a la vez efectiva, alteración. Ésta, puede ser física (la simple rotura de un bloque al caer), como química (la oxidación de un metal como resultado de la acción de los agentes externos, el tiempo de exposición de las rocas a estos agentes, de la naturaleza de la roca y del clima).

**b) Erosión:** Considera el desgaste de los suelos y rocas de la superficie terrestre como resultado de la acción combinada de varios factores como la temperatura, los gases, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal; así como, la erosión acelerada como el resultado de la acción humana. La erosión presenta tres fases: desgaste, transporte y depósito de los materiales, esto trae como consecuencia que se formen relieves por desgaste (degradación) y por depósito (agradación).

La acción por separado o en conjunto de los factores que dan origen a los procesos externos, favorecen a la ocurrencia de los eventos geodinámicos (Figura 16), los cuales se dividen según su origen en: fluvio-aluvial e hidro-gravitacional y cuyas características son:

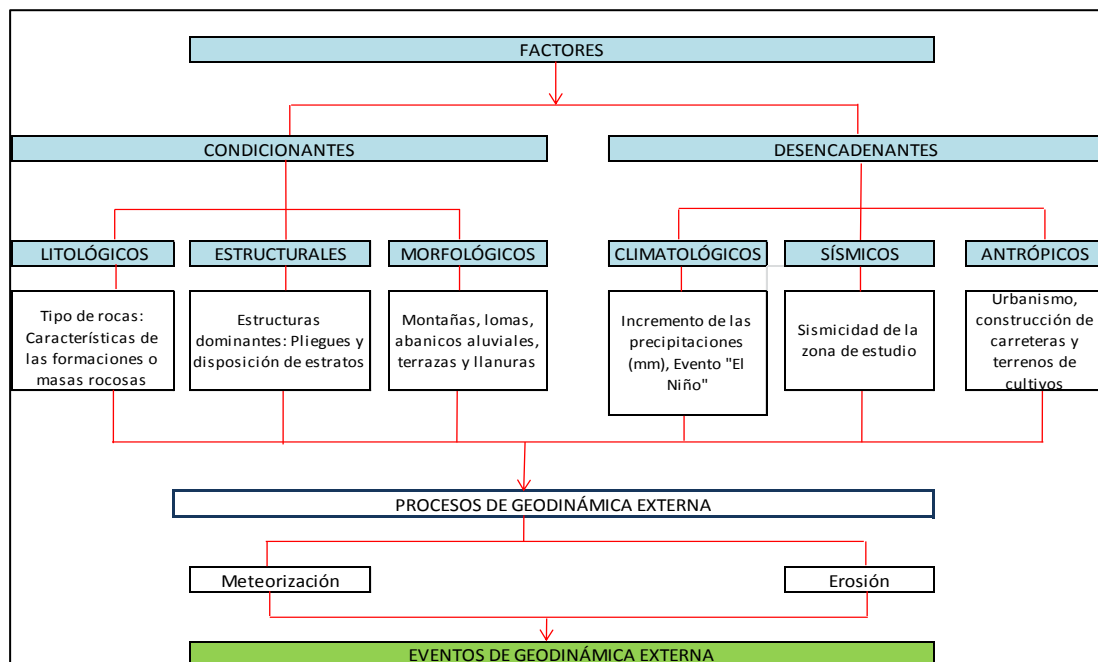


Figura 16: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

**a). - Fluvio-aluvial:** Estos procesos de erosión (carcaveo, incisión y desgaste laminar), son originados por las precipitaciones que se presentan en la cuenca

fluvial, generando la escorrentía superficial que provoca el arrastre progresivamente de los materiales a posiciones de menor energía potencial (menor pendiente). La carga de sedimentos transportados por la quebrada o río incrementen la acción erosiva y son capaces de producir la remoción de los materiales como (Brusi, 2013): Flujos de detritos e inundación. Los eventos geodinámicos originados por procesos pluviales son descritos a continuación:

**Flujos de detritos (huaicos):** movimiento de materiales sin cohesión (materiales sueltos) que se comportan como fluidos a causa del agua (provoca la pérdida total de resistencia de estos materiales) y se desplazan sin presentar superficies de rotura definidas. En algunos casos depositan sus materiales en forma de conos de deyección (Figura 17).

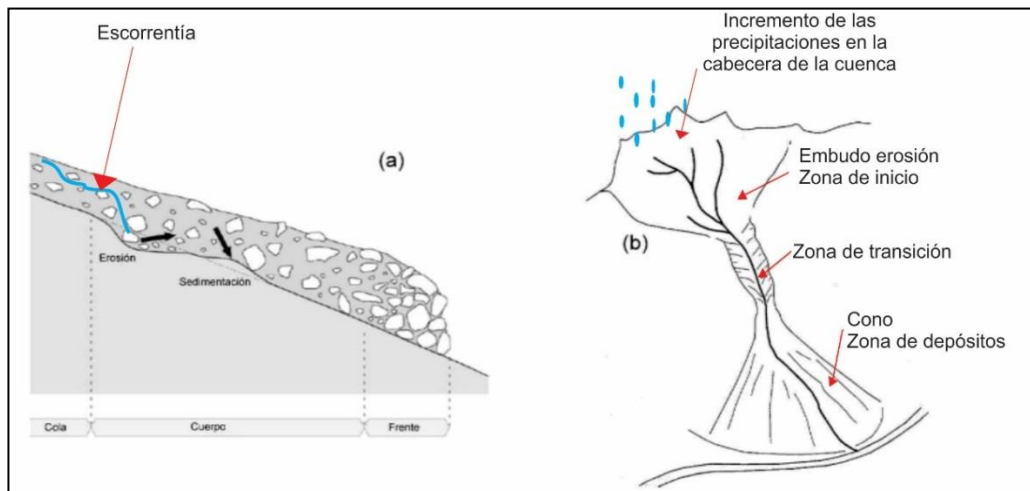


Figura 17: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la deposición del material), modificado del GITS (Grupo de investigación de transportes de sedimentos).

**Inundación:** Es el resultado del comportamiento de la cuenca hidrográfica durante un período de incremento de precipitaciones. Es la ocupación ocasional de terreno por el agua de un río o una quebrada. Puede ocurrir en zonas litorales debido a tsunamis o a la superposición de oleajes y mareas; pero las más frecuentes son las inundaciones en el interior de los continentes. Son producidos por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes); es decir, atribuida al incremento brusco del volumen de agua, denominado crecida (CENEPRED, 2013).

Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (mayor al 50%) de una zona, se le denominan “lluvias extraordinarias” o tormentas extremas. Estas al desarrollarse, generan crecidas causando inundaciones de las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico (Figura 18).

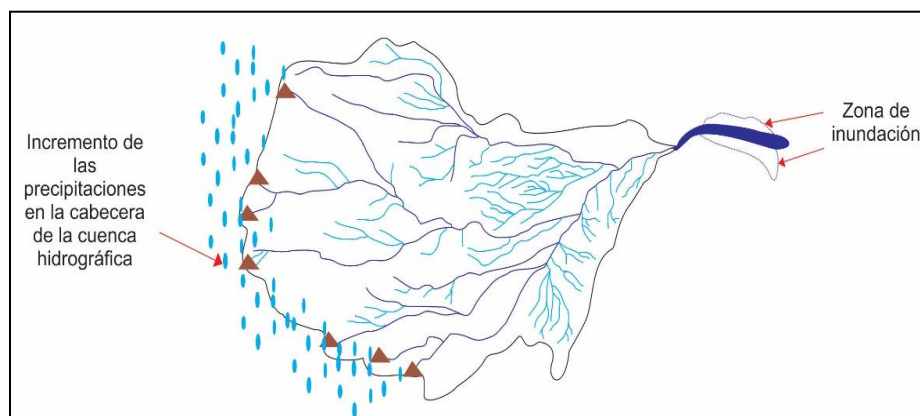


Figura 18: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica

**b) Hidro-gravitacional:** En este mecanismo interviene el agua y la gravedad. Se presentan en los fondos de los valles y en las partes bajas de las vertientes. En estos se encuentran los movimientos en masa (MM) que son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de rocas, detritos o tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Para la descripción de los MM, se ha tomado en cuenta la clasificación de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), las cuales se basan en dos elementos: el tipo de movimiento (caída, volcamiento y deslizamiento) y el material, sean rocas y/o suelos (divididos en detritos y tierras).

Asimismo, Wyllie y Norrish (1996), indican como causas de las caídas de roca: la lluvia, la roca fracturada, el viento, la escorrentía, la infiltración, las fracturas planares, la erosión, las raíces de los árboles, fuentes de agua superficial, la descomposición del suelo, los sismos, los cortes de las vías, la explotación de materiales, el uso de explosivos, las vibraciones de la maquinaria, los vehículos y las diversas actividades antrópicas.

**Caída de rocas:** Es resultado del debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral, produciendo un deterioro en la estructura del talud por la acción de la meteorización. En este caso se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, que caen por gravedad (Figura 19).

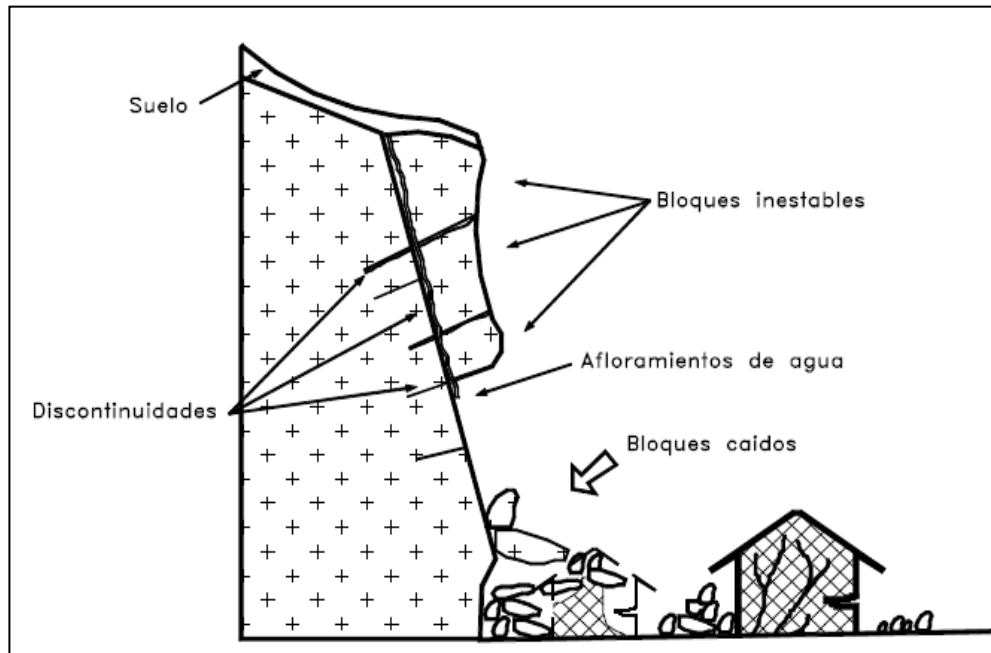


Figura 19: Proceso de caída de rocas (Suárez 1998).

**Deslizamiento:** Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. El movimiento puede ser progresivo; es decir, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla (Figura 20). Estos deslizamientos se pueden clasificar en:

**D. Rotacional** cuando la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento.

**D. Traslacional** cuando el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada

**Flujo de lodos:** Define a los desplazamientos de partículas y/o masas que se mueven como unidades deformadas, viscosas, sin un plano discreto de ruptura. En algunos casos se depositan en forma de conos de deyección. Se forman en el momento en que la tierra es debilitada considerablemente por el agua, generalmente en eventos con lluvias muy intensas que ocurren en épocas excepcionalmente lluviosas, alcanzando gran fuerza cuando se incrementa la intensidad de las lluvias y su duración (Suarez y Suarez, 2006).

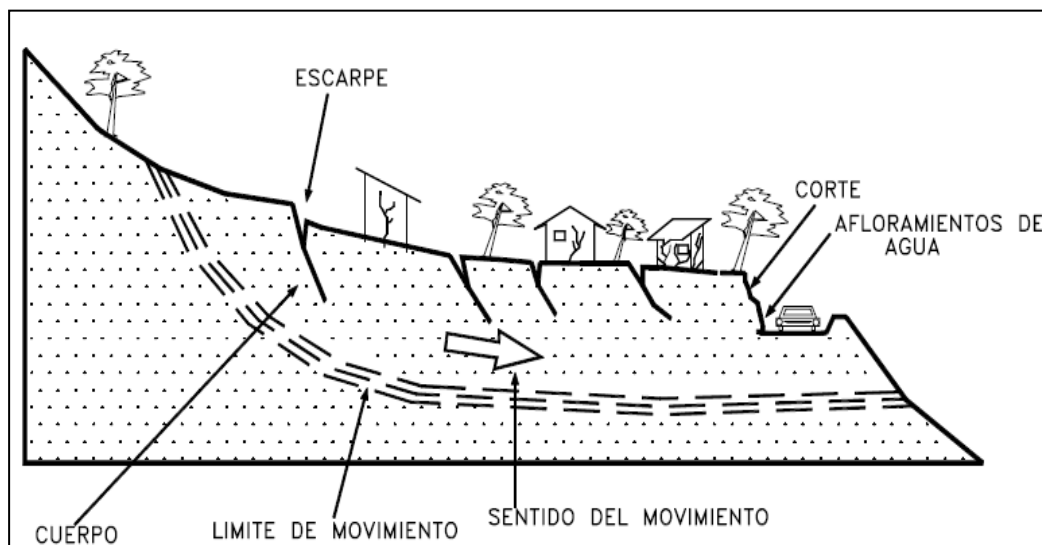


Figura 20: Deslizamiento en laderas (Suárez, 1998)

### 4.3.- Zonas susceptibles a procesos geodinámicos

La susceptibilidad se define como la mayor o menor predisposición a que un proceso geodinámico suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico y tiempo (Hauser, 1985 y 1993) y depende de factores como: litología, tectonismo, agentes geológicos y actividad humana (taludes de corte). Para identificar y delimitar las zonas susceptibles se utilizó la información recopilada en campo durante el cartografiado, así como en la descripción contextual de los eventos geodinámicos ocurridos en zonas adyacentes (Figura 21).

#### 4.3.1.- Flujos de lodo

Al lado noroeste de la ciudad de Tacna, se ubica la quebrada “Del diablo” y ante una precipitación excepcional en la zona, se generaría un flujo (activación de la quebrada) que descendería por la misma haciendo su ingreso al distrito de Tacna por las avenidas principales afectando el terminal nacional e internacional (Figura 22).

#### 4.3.2.- Zona Susceptible a Inundaciones

En el área de estudio se determinó que ante un eventual incremento del caudal en el río Caplina, producido por las precipitaciones estacionales, podría afectar las viviendas que se encuentran aledañas a este (margen derecha del río Caplina), ver Figura 23.





Figura 22: Área delimitada con el interlineado que demarca la zona que podría ser afectada en Tacna si se activara la quebrada "Del diablo".



Figura 23: Río Caplina que ante el incremento de su caudal que sobre pasa la capacidad de embalse produciría un desborde que afectaría la infraestructura física de Tacna.

## 5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los suelos son materiales inconsolidados conformados por minerales, materia orgánica, agua y aire entre sus poros, que se generan a partir de la alteración de la roca madre por agentes atmosféricos, erosionándola y formando una cobertura de variado espesor de sedimentos denominado suelo, que posteriormente han sido transportados y redepositados en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, conformando actualmente los suelos sobre los cuales se asientan las áreas urbanas. En geotecnia para clasificar los tipos de suelos se hace uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para determinar las características físico-mecánicas de los materiales (arcillas, limos, arenas, gravas y clastos) condicionadas por las propiedades litológicas de las rocas pre-existentes y la dinámica con que fueron depositados. En el diagrama de la Figura 24, se indica el origen de los diferentes tipos de suelos.



Figura 24: Diagrama del origen de los suelos.

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas, así como, el comportamiento en condiciones estáticas de los suelos y rocas, mediante la aplicación de técnicas de exploración, entre las cuales se tienen: calicatas, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio; a fin de determinar las propiedades físicas de los suelos de cimentación. En la ciudad de Tacna se realizó el estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, postes y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) (Figura 25). Asimismo, de las calicatas se extrajeron 08 muestras que fueron enviadas al laboratorio de suelos, con el fin de realizarse los ensayos de mecánica de suelos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad de carga admisible.

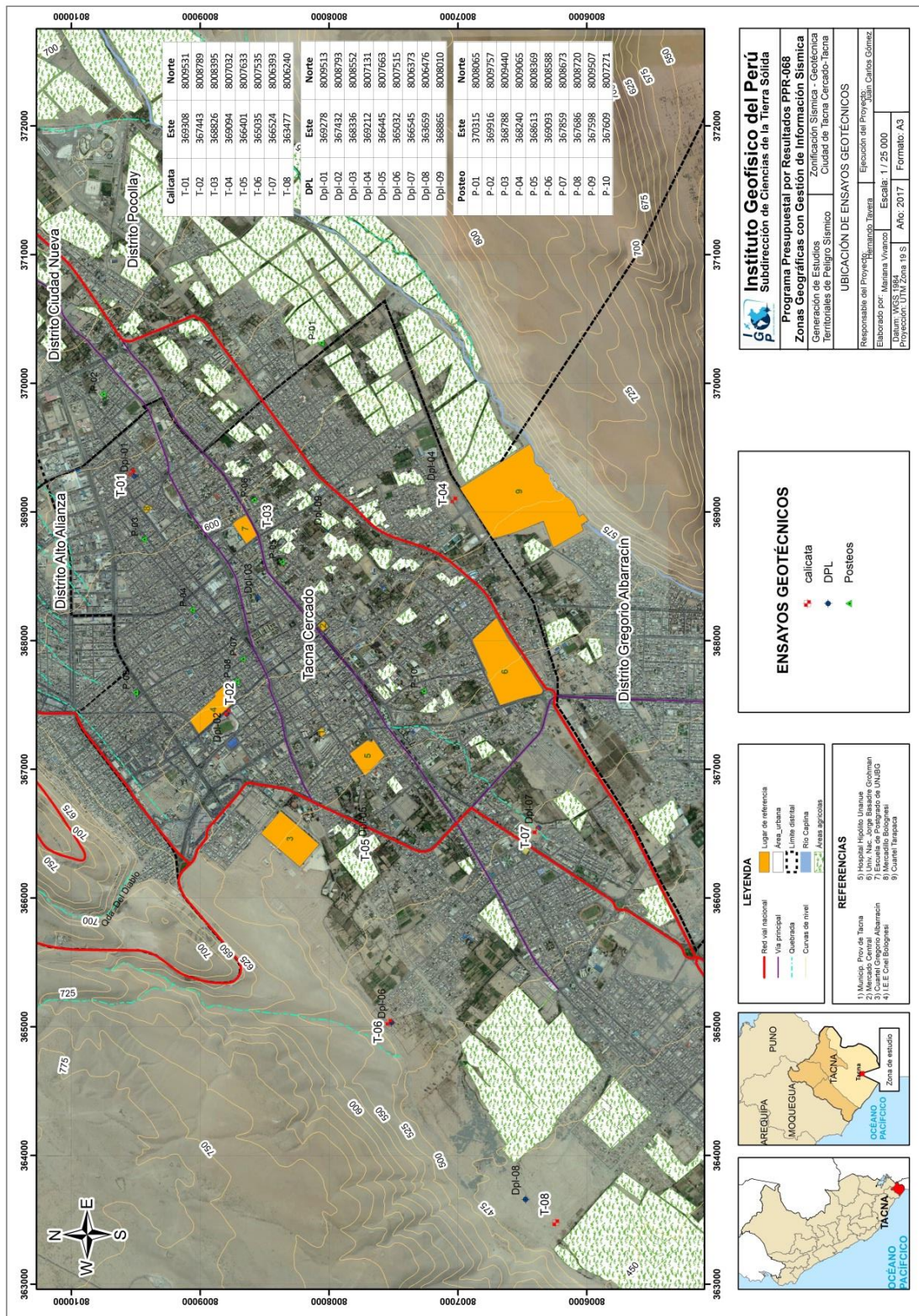


Figura 25: Mapa de ubicación de las exploraciones geotécnicas realizadas en la ciudad de Tacna.

## 5.1. Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM D420)

Es un método directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación del suelo. Estas exploraciones se realizaron hasta profundidades de 3.00 m, a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras para la realización de ensayos de suelos y su análisis.

### 5.1.1 Descripción de calicatas

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo, para ello se han elaborado 08 fichas de descripción de calicatas, las mismas que se adjuntan en el Anexo. La ubicación geográfica de las excavaciones se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Ubicación geográfica de las calicatas elaboradas en la ciudad de Tacna.

CALICATA	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)
1	8008789	369308	630	1.50	N.P
2	8008789	367443	565	1.60	N.P
3	8008395	368826	602	2.50	N.P
4	8007032	369094	581	1.80	N.P
5	8007633	366401	532	1.80	N.P
6	8007535	365035	505	2.20	N.P
7	8006393	366524	520	2.10	N.P
8	8006240	363477	457	2.20	N.P

## 5.2. Densidad del suelo in-situ (Norma ASTM D1556)

Este método permite conocer la densidad o peso unitario de los suelos in situ con cierto grado de compactación natural. Consiste en extraer material del suelo, a fin de obtener una relación entre la masa de éste y el volumen conocido que ocupa la arena calibrada del cono de densidad. En cada estrato muestreado, se debe realizar un ensayo de densidad de campo con el método del cono, a fin de obtener el grado de compactación o consistencia y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales y en otros casos, para obtener el grado de compactación. Esta información es necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo; sin embargo, este ensayo no es aplicable en suelos que contengan cantidad excesiva de roca o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm).

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados de densidad natural y cuyos valores son corroborados con los mostrados en la Tabla 6 (otros ver Anexo).

Tabla 5: Resultado de densidades in – situ

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
1	T-01	1.50	1.45	1.41
2	T-02	1.60	1.82	1.69
3	T-03	2.50	1.05	1.02
4	T-04	1.80	2.50	2.06
5	T-05	1.80	1.10	0.91
6	T-06	2.20	1.60	1.56
7	T-07	2.10	1.22	1.16
8	T-08	2.20	1.46	1.38

En base a la Tabla 6, se conoce que los suelos de la ciudad de Tacna, presentan rangos de densidad entre 1.22 – 2.50 gr/cm<sup>3</sup>; es decir, medio densas a densas.

Tabla 6: Valores típicos de densidad de suelos. Fuente: CISMID, 2016.

MATERIALES		DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
ARENA Y GRAVA	MUY SUELTA	1.70 – 1.80	1.30 – 1.40
	SUELTA	1.80 – 1.90	1.40 – 1.50
	MEDIO DENSA	1.90 – 2.10	1.50 – 1.80
	DENSA	2.00 - 2.20	1.70 – 2.00
	MUY DENSA	2.20 – 2.30	2.00 – 2.20
ARENA	POBREMENTE GRADUADA (SP)	1.70 – 1.90	1.30 – 1.50
	BIEN GRADUADA (SW)	1.80 – 2.30	1.40 – 2.20
	MEZCLA DE ARENA (SW Y SP)	1.90 – 2.30	1.50 – 2.20
ARCILLA	LODO NO CONSOLIDADO	1.60 – 1.70	0.90 – 1.10
	BLANDA, AGRIETADA	1.70 – 1.90	1.10 – 1.40
	TÍPICA (CONS. NORMAL)	1.80 – 2.20	1.30 – 1.90
	MORRENA (SOBREC.)	2.00 – 2.40	1.70 – 2.20
SUELOS ROJOS TROPICALES		1.70 – 2.10	1.30 – 1.80

### 5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452)

Una posteadora es un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta profundidades del orden de 6 m. El objetivo es obtener muestras del suelo, que, aunque estén trituradas y completamente alteradas, son muy útiles para identificar y describir los suelos de manera visual.

Los puntos de exploración fueron distribuidos entre las calicatas; tratando de cubrir el área de estudio o distribuirlas en los lugares donde no existía información geotécnica para obtener una mejor zonificación de los suelos de la ciudad de Tacna. En la Tabla 7, se muestra la ubicación geográfica de los puntos de posteos y en los anexos sus fichas de análisis.

Tabla 7: Ubicación de los puntos en Coordenadas UTM-WGS84

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELOS (SUCS)	NIVEL FREÁTICO (m)
P-01	370315	8008065	598	1.70	SC	N.P
P-02	369916	8009757	644	0.70	SP	N.P
P-03	368788	8009440	609	0.30	SM	N.P
P-04	368240	8009065	591	0.40	SM	N.P
P-05	368613	8008369	593	2.10	SP	N.P
P-06	369093	8008588	609	1.00	SC	N.P
P-07	367859	8008673	588	0.50	SM	N.P
P-08	367686	8008720	583	0.40	SM	N.P
P-09	367598	8009507	584	0.60	SP	N.P
P-10	367609	8007271	558	0.60	SP	N.P

La profundidad máxima alcanzada en los ensayos realizados con posteadora es de 2.10 m que corresponden a suelos arenosos con presencia de limos. La profundidad mínima es de 0.30 m (P-03) que corresponden a arenas limosas con gravas. La auscultación en este punto no se pudo profundizar debido a la probable presencia de gravas que impide que el barreno siga descendiendo.

#### 5.4. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

El DPL, es un equipo de campo de registro continuo, dónde se contabiliza el número de golpes dados por un martillo de 10 Kg (N), en la parte superior del tambor de acero. Se pretende profundizar tramos mediante una punta cónica de 60° que se encuentra en el extremo inferior. Este tipo de ensayo es aplicable en terrenos arenosos, areno-arcillosos y limos arenosos; y no recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

Este ensayo permite estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, y los valores obtenidos ayudarán a calcular, mediante fórmulas empíricas, la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos en Kg/cm<sup>2</sup>; además de, las propiedades de

compacidad de los suelos. Los ensayos de DPL fueron realizados en las inmediaciones de una o dos calicatas, a fin de conocer la resistencia al corte de los distintos estratos, sobretodo donde los suelos son conocidos.

En la Tabla 8, se indica la ubicación geográfica de los ensayos DPL realizados en las inmediaciones de la ciudad de Tacna, la profundidad total alcanzada y los datos obtenidos del ensayo (número de golpes y ángulo de fricción) para profundidades comprendidas entre 0.90 y 1.20 m, debido a que en este nivel se calculará los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción y cohesión) para el cálculo de la capacidad portante. Las fichas de los ensayos se adjuntan en los Anexos (09 DPL).

Tabla 8: Ubicación geográfica de los ensayos DPL y el parámetro de ángulo de fricción obtenido ( $\phi$ : Ángulo de fricción interna).

DPL	ESTE (m)	NORTE (m)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD (m)	NÚMERO DE GOLPES ALCANZADOS	ALCANZADO
Dpl-01	369278	8009513	592	0.50	45	39.7
Dpl-02	367432	8008793	567	0.40	45	39.5
Dpl-03	368336	8008552	588	2.30	45	39.5
Dpl-04	369212	8007131	580	0.50	45	39.5
Dpl-05	366445	8007663	536	1.90	45	39.5
Dpl-06	365032	8007515	476	1.50	39	38.2
Dpl-07	366545	8006373	515	0.60	24	34.4
Dpl-08	363659	8006476	470	0.80	21	33.6
Dpl-09	368865	8008010	589	1.70	45	39.7

En los ensayos DPL se ha logrado alcanzar una profundidad máxima de 2.30 m (Dpl-03) para la plaza “La Cultura” y mínima de 0.40 (DPL 2) en el exterior del estadio “Jorge Basadre” al lado oriente. Este último debe su profundidad a la presencia de materiales granulares, conformados por gravas y arenas de grano grueso con alta resistencia a la penetración. Asimismo, la profundidad alcanzada a través de la elaboración de estos ensayos permitió inferir que los suelos en Tacna el 60 % presentan consistencia compacta y el 40% representa consistencia semi compacta.

#### 5.4.1. Correlación DPL – SPT / Capacidad portante

##### a) Correlación entre el “N” del DPL y “N” del SPT (ASTM D1586)

El ensayo DPL no cuenta con correcciones normadas para la obtención del ángulo de fricción interna, es por ello que, los valores obtenidos del número de

golpes (NDPL), fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar (NSPT), a fin de determinar el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente, calcular la capacidad de carga admisible.

Para la correlación, se consideró las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), y luego se utilizó una fórmula empírica que relaciona el peso del martillo, la altura de caída del martillo, el área de la punta cónica, el espesor de la hinca y el número de golpes obtenidos con el DPL:

$$N_1 = N_2 \frac{W_1 * H_1 * A_2 * e_2}{W_2 * H_2 * A_1 * e_1}$$

Dónde:

N1= Número de golpes equivalente en SPT

N2= Número de golpes obtenidos en DPL

W1= Peso del martillo del DPL

W2= Peso del martillo SPT

H1= Altura de caída de DPL

H2= Altura de caída del SPT

A1= Área de la punta cónica del DPL

A2= Área de la punta cónica del SPT

e1= Espesor de la hinca del DPL

e2= Espesor de la hinca del SPT

#### **b) Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del “N” SPT**

Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen diversas fórmulas empíricas y para el caso de la ciudad de Tacna, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), debido a que, es la más usada internacionalmente y sus resultados son conservadores para arenas con ángulo de fricción mayor a 30°.

$$\Phi = (20 N^{0.5}) + 15$$

Para el caso, en donde la densidad relativa (Dr) es menor al 5% (arenas muy finas), se debe emplear la fórmula de Meyerhof (1956):

$$\Phi = 30^\circ + 0.15 * Dr$$

Dónde:

$\Phi$ =ángulo de fricción interna

Dr: Densidad relativa

En la Tabla 9, se muestran los resultados obtenidos para los DPL que hayan alcanzado la profundidad deseada de estudio: entre 1.00 y 1.20 m de profundidad.

Tabla 9: Cálculo del ángulo de fricción interna, usando valores del  $N_{SPT}$ .

ENSAYO	$N_{SPT}$ CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\Phi'_{NSPT}$ )	$N_{SPT}$ CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\Phi'_{NSPT}$ )
DPL -03	2.66	22.3	4.11	24.1
DPL -05	5.81	25.8	5.32	25.3
DPL -06	21.53	35.8	20.81	35.4
DPL -09	8.47	28.0	15.97	32.9
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO	1.00 – 1.20 m		1.30 - 1.50 m	

Tabla 10: Compacidad relativa y consistencia de los suelos con sus respectivos ángulos de fricción interna en base al  $N_{spt}$ . (Adaptado de Crespo, 2014).

COMPACIDAD RELATIVA DE SUELOS GRANULARES			CONSISTENCIA EN SUELOS COHESIVOS		
VALOR DE $N_{SPT}$	COMPACIDAD RELATIVA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\square$ )	VALOR DE $N_{SPT}$	CONSISTENCIA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\square$ )
0 - 4	Muy Suelta	< 28°	< 2	Muy blanda	0°
4 - 10	Suelta	28° - 30°	2 - 4	Blanda	0° - 2°
10 - 30	Media	30° - 36°	4 - 8	Media	2° - 4°
30 - 50	Compacta	36° - 41°	8 - 15	Compacta	4° - 6°
> 50	Muy Compacta	> 41°	15 - 30	Muy compacta	6° - 12°
			> 30	Dura	> 14°

En la ciudad de Tacna, los suelos están conformados por gravas y arenas con contenido de limos y arcillas, en estas últimas los ensayos de DPL alcanzaron profundidades mayores a 1.00 m; por lo tanto, el análisis de cálculo de fricción interna se realizó en los DPL que se muestran en la Tabla 10.

De acuerdo a los datos de la Tabla 10 (Figura 26), el ángulo de fricción de los materiales analizados para 1.00 m a 1.20 m están en el rango es de 22.3 a

35.8; por lo tanto, presentan compacidad relativa suelta a media; mientras que, de 1.30 m a 1.50 m varían de 24.1 a 35.4; por lo tanto, los suelos tienen compacidad relativa suelta a media. En la ciudad de Tacna los suelos tienen compacidad relativa media a suelta con profundidades entre 1.00 m a 1.20 m y 1.30 m a 1.50 m.

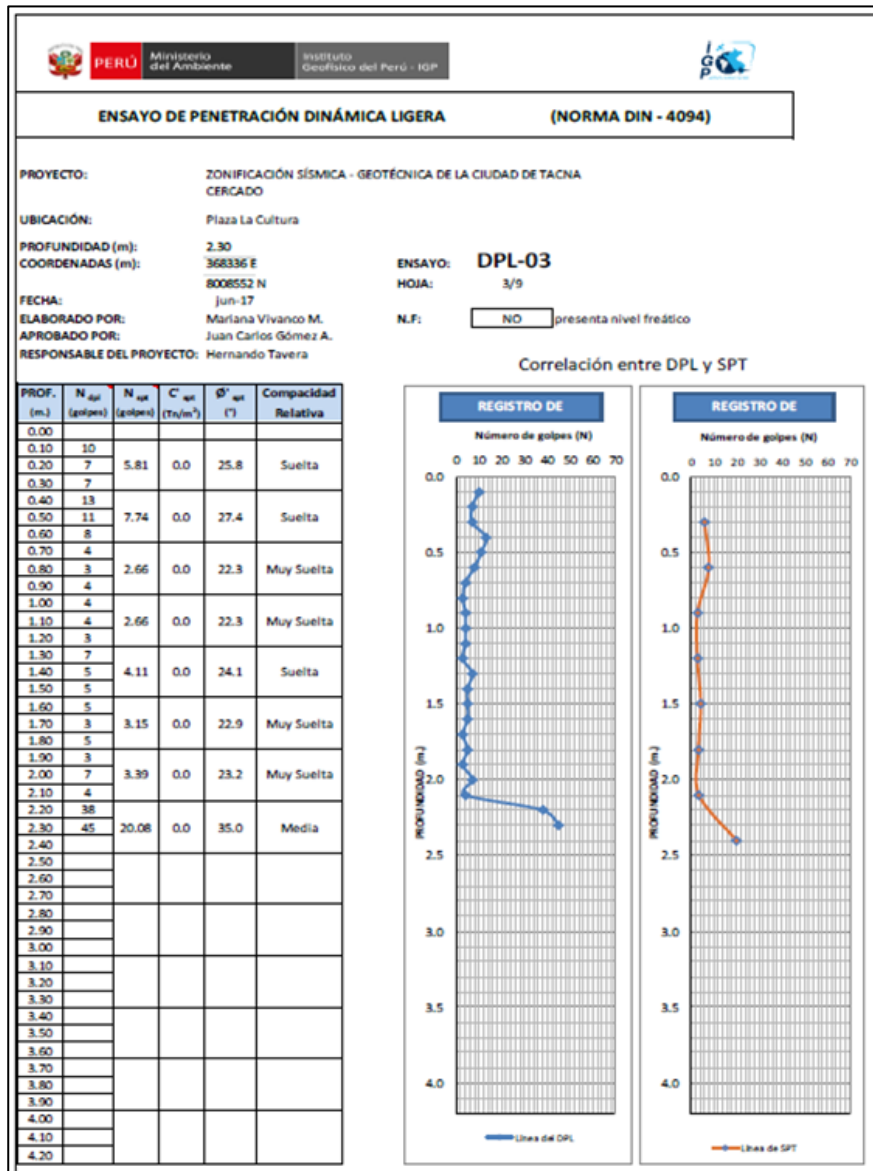


Figura 26: Ficha de correlación de DPL Tacna.

### 5.5. Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)

La finalidad de este ensayo, es determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo sometida a deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales), se trata de disimular las deformaciones del terreno producto de la aplicación de una carga.

La resistencia del suelo al corte se debe a dos componentes: la cohesión (comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares). Para conocer esta resistencia al corte, en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más usado una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con dos placas de piedra porosa y en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento ( $P_v$ ), luego una carga horizontal ( $P_h$ ) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra. Los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Valores obtenidos del ensayo de corte directo

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ )	Cohesión aparente del suelo ( $T_n/m^2$ )	Densidad natural ( $T_n/m^3$ )
01	35.10	0.00	1.85
02	36.40	0.00	1.86
03	28.31	0.01	1.05
04	35.62	0.00	1.86
05	25.30	0.12	1.16
06	19.00	0.13	1.60
07	35.64	0.00	1.85
08	19.00	0.13	1.60

De los resultados obtenidos, se evidencia que los suelos de la ciudad de Tacna presentan cohesión baja y los valores del ángulo de fricción interna varían entre  $19^\circ$  a  $36^\circ$  aproximadamente, característico de suelos granulares (arenas con presencia de limos, arcillas y gravas).

## 5.6. Capacidad de carga admisible

Se define como el esfuerzo máximo que puede ser aplicado a la masa de suelo de tal forma que se cumplan los requerimientos básicos. Se encuentra establecido por la relación entre la carga última y un factor de seguridad cuyo valor es de 3, esto de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones E.050.

$$(q_{ad} = \frac{q_u}{F_s})$$

### 5.6.1 Carga última ( $q_u$ )

Es la máxima presión ejercida por el área de una cimentación soportada por el suelo hasta producir una falla por corte (Sin factor de seguridad, Norma E.050). Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo y en base al  $N_{SPT}$  (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usaran para determinar la capacidad portante (Tabla 12), última mediante las fórmulas por corte general y local de Terzaghi (1943), según sea el suelo a ensayar, y utilizando las siguientes expresiones:

Fórmula para falla por corte general:

$$q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local:

$$q_u = \frac{2}{3} \cdot c \cdot N'_c + q \cdot N'_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N'_\gamma$$

$C$ : cohesión

$q$ : carga ( $\gamma \cdot D_f$ )

$N_c, N_q, N_\gamma$ : Factores de carga.

En base a los resultados de la carga última ( $q_u$ ), se calculó la capacidad admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m; así como, para profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad de carga admisible de los suelos analizados se presentan en las Tablas 13 y 14 (Figura 27).

Tabla 12: Factores de cohesión, carga y volumétricos.

TERZAGHI (según Kumbhojkar, 1993)				Modificado por TERZAGHI			
Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng	Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng
0	5.7	1	0	0	5.7	1	0
1	6	1.1	0.01	1	5.9	1.07	0.005
2	6.3	1.22	0.04	2	6.1	1.14	0.02
3	6.62	1.35	0.06	3	6.3	1.22	0.04
4	6.97	1.49	0.1	4	6.51	1.3	0.055
5	7.34	1.64	0.14	5	6.74	1.39	0.074
6	7.73	1.81	0.2	6	6.97	1.49	0.1
7	8.15	2	0.27	7	7.22	1.59	0.128
8	8.6	2.21	0.35	8	7.47	1.7	0.16
9	9.09	2.44	0.44	9	7.74	1.82	0.2
10	9.61	2.69	0.56	10	8.02	1.94	0.24
11	10.16	2.98	0.69	11	8.32	2.08	0.3
12	10.76	3.29	0.85	12	8.63	2.22	0.35
13	11.41	3.69	1.04	13	8.96	2.38	0.42
14	12.11	4.02	1.26	14	9.31	2.55	0.48
15	12.86	4.45	1.52	15	9.67	2.73	0.57
16	13.68	4.92	1.82	16	10.06	2.92	0.67
17	14.6	5.45	2.18	17	10.47	3.13	0.76
18	15.12	6.04	2.59	18	10.9	3.36	0.88
19	16.56	6.7	3.07	19	11.36	3.61	1.03
20	17.69	7.44	3.64	20	11.85	3.88	1.12
21	18.92	8.26	4.31	21	12.37	4.17	1.35
22	20.27	9.19	5.09	22	12.92	4.48	1.55
23	21.75	10.23	6	23	13.51	4.82	1.74
24	23.36	11.4	7.08	24	14.14	5.2	1.97
25	25.13	12.72	8.34	25	14.8	5.6	2.25
26	27.09	14.21	9.84	26	15.53	6.05	2.59
27	29.24	15.9	11.6	27	16.3	6.54	2.88
28	31.61	17.81	13.7	28	17.13	7.07	3.29
29	34.24	19.98	16.18	29	18.03	7.66	3.76
30	37.16	22.46	19.13	30	18.99	8.31	4.39
31	40.41	25.28	22.65	31	20.03	9.03	4.83
32	44.04	28.52	26.87	32	21.16	9.82	5.51
33	48.09	32.23	31.94	33	22.39	10.69	6.32
34	52.64	36.5	38.04	34	23.72	11.67	7.22
35	57.75	41.44	45.41	35	25.18	12.75	8.35
36	63.53	47.16	54.36	36	26.77	13.97	9.41
37	70.01	53.8	65.27	37	28.51	15.32	10.9
38	77.5	61.55	78.61	38	30.43	16.85	12.75
39	85.97	70.61	95.03	39	32.53	18.56	14.71
40	95.66	81.27	115.31	40	34.87	20.5	17.22
41	106.81	93.85	140.51	41	37.45	22.7	19.75
42	119.67	108.75	171.99	42	40.33	25.21	22.5
43	134.58	126.5	211.56	43	43.54	28.06	26.25
44	151.95	147.74	261.6	44	47.13	31.34	30.4
45	172.28	173.28	325.34	45	51.17	35.11	36
46	196.22	204.19	407.11	46	55.73	39.48	41.7
47	224.55	241.8	512.84	47	60.91	44.45	49.3
48	258.28	287.85	650.67	48	66.8	50.46	59.25
49	298.71	344.63	831.99	49	73.55	57.41	71.45
50	347.5	415.14	1072.8	50	81.31	65.6	85.75

Tabla 13: Capacidad de carga admisible (criterio falla local) para muestras de suelo extraídas en la ciudad de Tacna.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
T-01	9.30	3.10	9.67	3.22
T-02	14.63	4.88	15.20	5.06
T-03	1.15	0.38	1.53	0.51
T-04	21.00	7.00	22.50	7.5
T-05	2.13	0.71	2.89	0.96
T-06	2.10	0.70	2.39	0.80
T-07	12.30	4.10	13.60	4.53
T-08	1.95	0.65	2.05	0.68
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 14: Capacidad de carga admisible en base a los ensayos de NSPT.

ENSAYO	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga última (Tn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
DPL – 03	0.58	0.19	0.97	0.32
DPL – 05	0.85	0.28	1.16	0.39
DPL – 06	3.42	1.14	4.56	1.52
DPL – 09	0.97	0.32	2.26	0.75
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 15: Rangos de capacidad de carga admisible.

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

De los resultados citados anteriormente y tomando en cuenta la Tabla 15, se ha determinado que, la zona urbana de la ciudad de Tacna, en su mayoría, ha sido construida con cimentaciones de 1.00 m de profundidad.

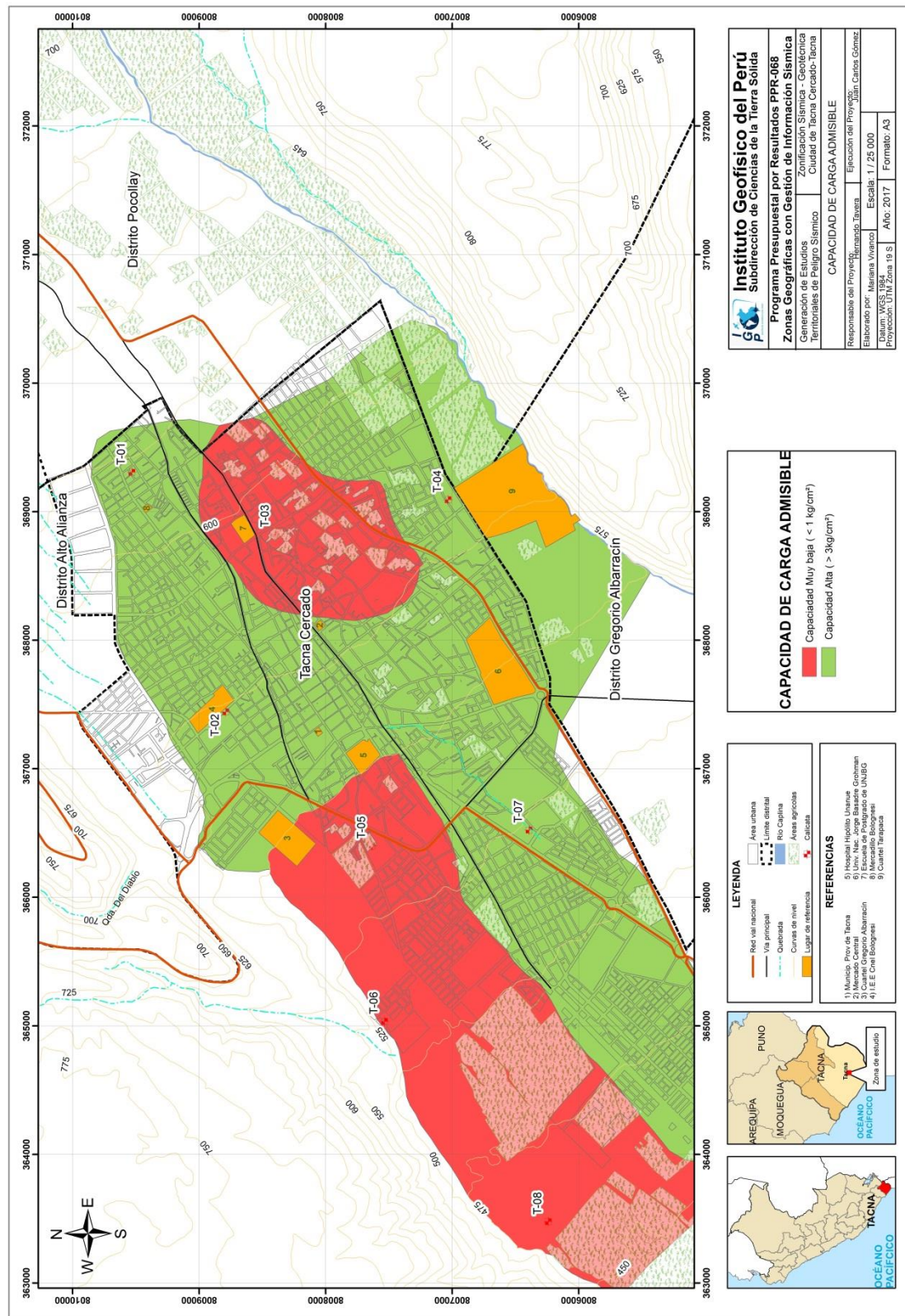


Figura 27: Mapa de capacidad de carga admisible para la ciudad de Tacna.

### 5.6.2 Tipos de capacidad de carga admisible

En la ciudad de Tacna se han identificado los siguientes tipos de capacidad de carga admisible:

#### a.) Capacidad de carga admisible Muy baja

Comprende rangos de capacidad de carga admisible menor a 1.00 kg/cm<sup>2</sup> y corresponde al tipo de suelo arena limosa arcillosa (SC-SM) con arena limosa (SM), cuyo grado de compactación es medio a bajo. Estos suelos abarcan el 50 % del área de estudio, identificado al noreste y suroeste Tacna.

#### b.) Capacidad de carga admisible alta

Comprende rangos de capacidad de carga admisible mayores a 3.00 kg/cm<sup>2</sup> y corresponde a suelos gravosos (GP), cuyo grado de compactación es alto. Estos suelos abarcan el 50% del área de estudio y se ubican al lado noreste, sureste y suroeste de Tacna.

### 5.7. Clasificación de suelos, SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas y posteos, realizados en la ciudad de Tacna, así como los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad, se ha identificado 04 tipos de suelos que fueron agrupados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Tabla 16 y Figura 28).

#### Suelos tipo GP

Están conformados por gravas mal graduadas con contenido de humedad de 17.52 % a 2.89 %. Constituyen suelos con grado de compactación medio y no presentan plasticidad debido a la presencia de arenas. Estos suelos representan 50% en el área de estudio y se han identificado en las calicatas 01, 02, 04, 07.

#### Suelos tipo GM

Están conformados por gravas limosas con contenido de humedad de 5.16%.

Constituyen suelos con grado de compactación medio a bajo con índice de plasticidad de 4.50 %. Estos suelos representan el 15% del área de estudio y se han identificado en la calicata 08.

### **Suelos tipo SM**

Están conformados por arenas limosas con contenido de humedad es de 17.52 % a 5.16 %. Constituyen suelos con grado de compactación bajo con índice de plasticidad bajo (5.60 % y 19.62 %). Estos suelos representan el 20 % del área de estudio y se han identificado en las calicatas 05, 06.

### **Suelos tipo SC-SM**

Están conformadas por arena arcillosa con grava y con contenido de humedad de 4.00 %. Constituyen suelos con grado de compactación media e índice de plasticidad de 5.60%. Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 15% del área de estudio y se han identificado en la calicata 03 ubicado al noreste de Tacna.

Tabla 16: Clasificación SUCS para los úselos identificados en la ciudad de Tacna.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.0074mm, <4.76mm)	FINOS % (>0.074%)	LIMITE LÍQUIDO (%)	LIMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO (%)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
01	1.50	NP	53.6	41.7	4.70	NP	NP	NP	2.89	GP	Grava mal graduada
02	1.60	NP	65.6	31.0	3.48	NP	NP	NP	6.92	GP	Grava mal graduada
03	2.50	NP	30.00	42.40	27.70	25.40	19.80	5.60	4.00	SC-SM	Arena arcillosa con grava
04	1.80	NP	61.3	36.0	0.0	NP	NP	NP	17.52	GP	Grava mal graduada
05	1.80	NP	1.50	51.90	46.56	50.51	30.89	19.62	17.52	SM	Arena limosa
06	2.20	NP	0.0	73.20	26.80	NP	NP	NP	2.67	SM	Arena limosa
07	2.10	NP	53.4	42.7	3.33	NP	NP	NP	5.16	GP	Grava mal graduada
08	2.20	NP	41.4	29.8	28.55	NP	NP	NP	5.16	GM	Grava limosa

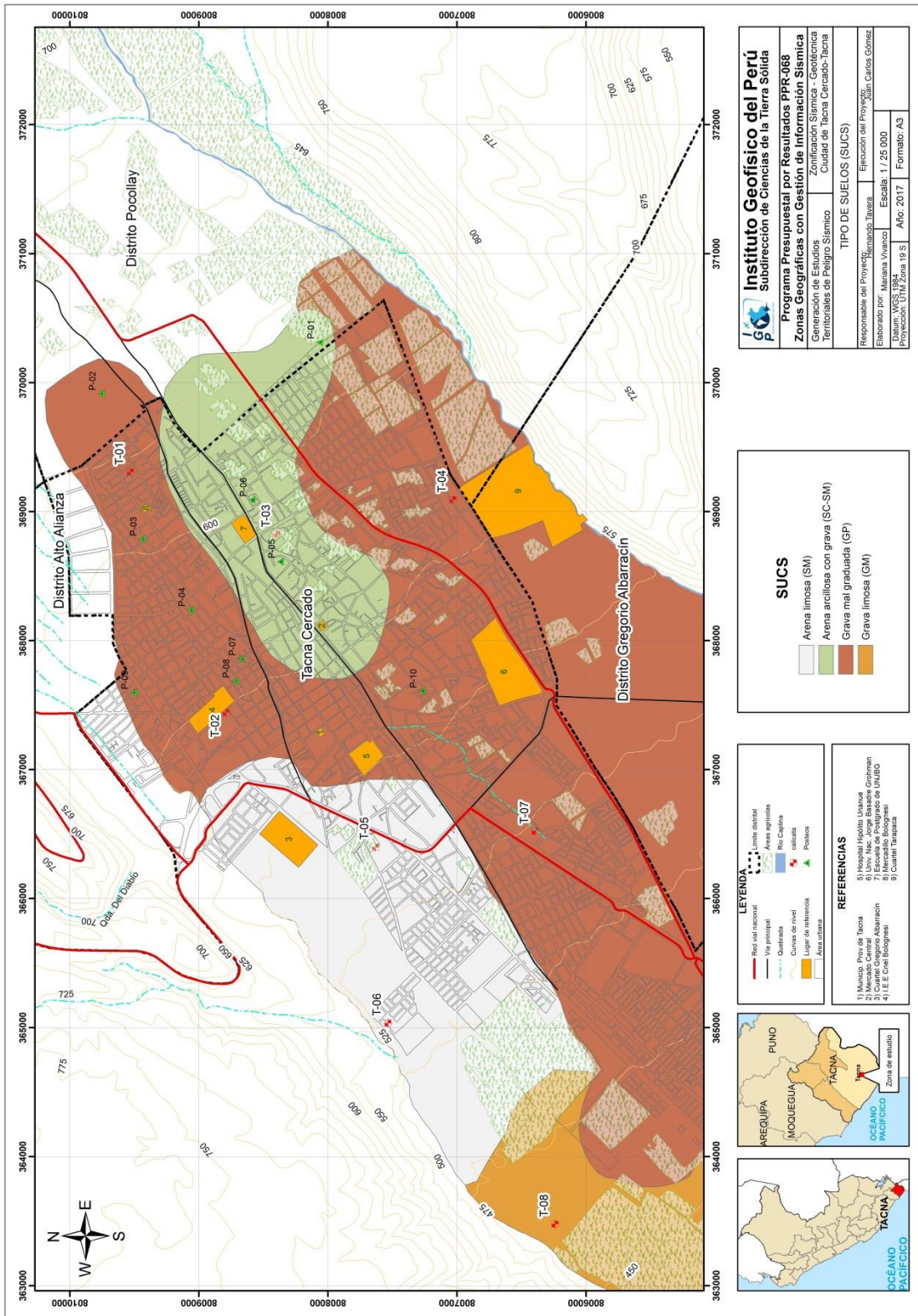


Figura 28: Mapa que muestra la clasificación SUCS de suelos para la ciudad de Tacna.

**CARACTERIZACIÓN SÍSMICA Y GEOFÍSICA  
DE LA CIUDAD DE TACNA**

## CONTENIDO

### 1. METODOLOGÍA

- 1.1. Razones espectrales (H/V)
- 1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)
- 1.3. Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)

### 2. ADQUISICIÓN DE DATOS

- 2.1. Registro de vibración ambiental (H/V)
- 2.2. Registro de arreglos lineales (MASW)
- 2.3. Registro de la resistividad del suelo (ERT)

### 3. ANALISIS E INTERPRETACION

- 3.1. Frecuencias Predominantes
- 3.2. Perfiles de Velocidad de ondas de corte Vs
- 3.3. Periodos Dominantes
- 3.4. Secciones de resistividad geoelectrica

### 4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

- 4.1. Zonificación Sísmica

## 1. METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Tacna, se ha realizado con datos recolectados en campo y con la aplicación de los métodos geofísicos, sísmicos y geotécnicos.

### 1.1. Razones Espectrales H/V

El método de razones espectrales (H/V) descrito por Nakamura (1989), permite caracterizar la respuesta dinámica del sitio y estimar la amplificación sísmica. Para la aplicación de esta técnica se obtiene registros de vibración ambiental y se procede a construir las razones espectrales H/V que consiste en obtener el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical (Nakamura, 1989), a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones máximas relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (Figura 1). Estas características son 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 y dinámicas del suelo.

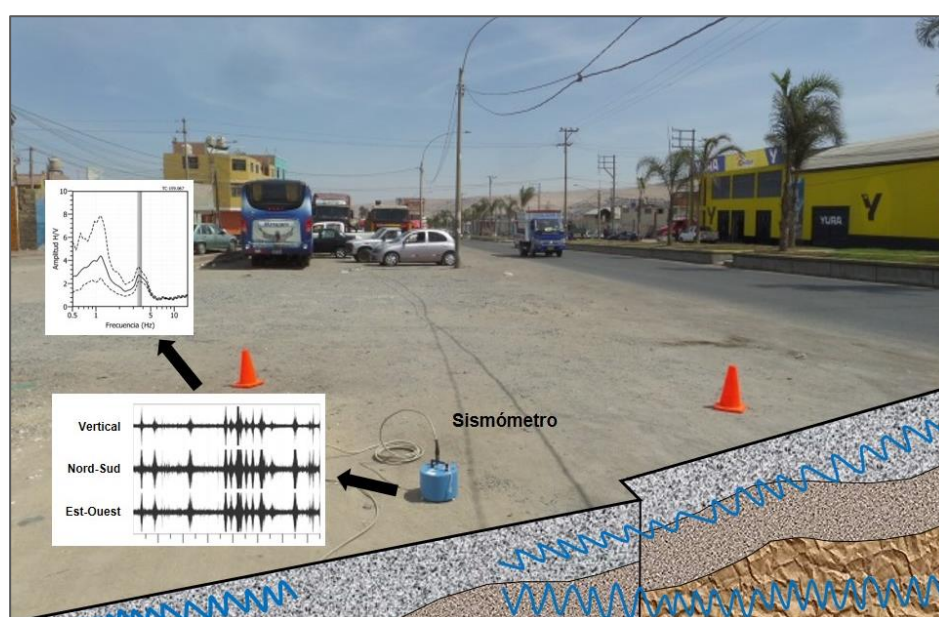


Figura 1. Registro de vibración ambiental.

- **Procesamiento:** Para aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V, se consideran los siguientes pasos:

- ✓ Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona, de forma aleatoria, diversos tramos de señal evitando 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 dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego, se promediaron estos para cada punto de observación siempre considerando su respectiva desviación estándar.
- ✓ Se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando, un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia).

En la Figura 2, se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el total de los datos obtenidos en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O), seguidamente la curva H/V, en la cual la curva continua negra es el promedio del cociente H/V; mientras que, las curvas discontinuas son la desviación estándar y las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

- **Interpretación:** Para la interpretación de los resultados se dispone de mapas geológicos, geomorfológicos, capacidad portante y clasificación de suelos (SUCS). Asimismo, en el análisis de la información se debe considerar: 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 (SESAME, 2006; Bernal, 2006).

**Zonificación Sísmica - Geotécnica**  
**ÁREA URBANA DE CERCADO DE TACNA**  
**Frecuencias predominantes del Suelo**

TC-102

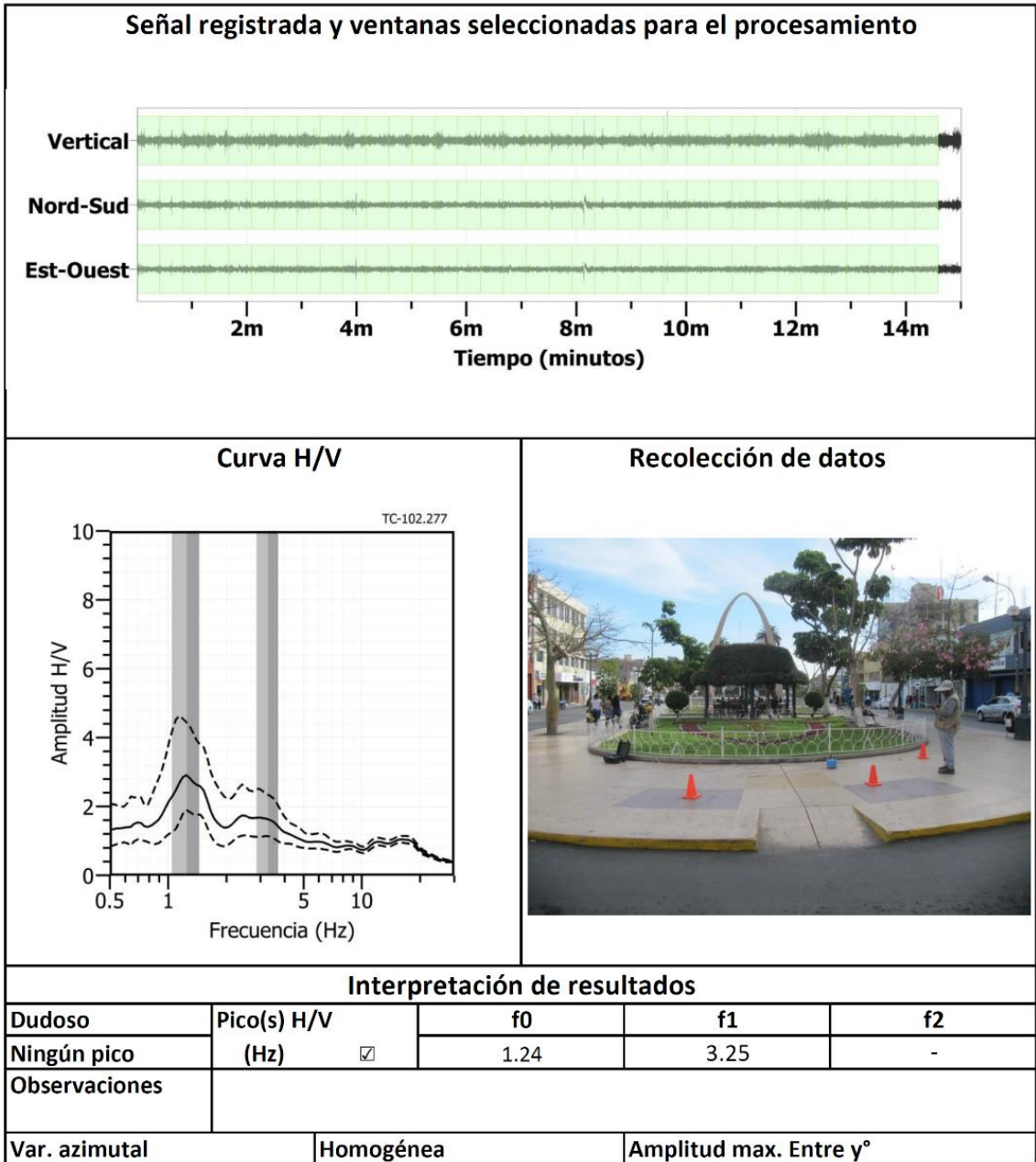


Figura 2: Ejemplo de la ficha H/V para el punto TC-102 en la cual se recopila los datos registrados y analizados. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua y Abajo; resultados.

## 1.2. Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW)

El arreglo lineal MASW es un método indirecto y permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, permite conocer la velocidad de propagación de las ondas de corte  $V_s$  en el subsuelo, a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh), generados por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como muestra la Figura 3.



**Figura 3:** Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

La profundidad máxima de investigación ( $Z_{max}$ ) depende de la longitud de la línea sísmica ( $D$ ). Usualmente  $D$  es más grande que  $Z_{max}$  (Park, 2015), es decir:  $D=nZ_{max}$ , donde ( $1 \leq n \leq 3$ ). Para fines geotécnicos, la profundidad máxima de investigación suele estar en el rango de 10-30 m, pero puede variar según el tipo de suelo, la longitud de arreglo sísmico y el tipo de fuente activa utilizada (Park, 2007).

- **Procesamiento:** Consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) en los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), proceso que permite la transformación de los datos y como resultado obtener una imagen de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión, ellas son sometidas de forma individual a un proceso de inversión a fin de obtener los perfiles  $V_s$  en una dimensión (1D), y para ello se consideran como parámetros de entrada, la profundidad (30 m) y el número de capas (15 capas). Finalmente, los perfiles  $V_s$  son promediados para obtener un perfil unidimensional para cada línea sísmica. Los resultados, al ser analizados, proporcionan

información útil sobre las características geotécnicas del subsuelo (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2008).

En la Figura 4, se muestra un ejemplo de los resultados que se obtiene a partir de la técnica de MASW. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y en la derecha, el perfil de velocidad  $V_s$  (línea verde) que considera el promedio final de los perfiles obtenidos post inversión. Los círculos de color verde representan la inversión de la curva de dispersión en el dominio de frecuencia y profundidad. Esta curva permite verificar el nivel de confiabilidad o la profundidad mínima y máxima de investigación (área sombreada). En este caso, el perfil presenta una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad es de 2 a 30 metros de profundidad.

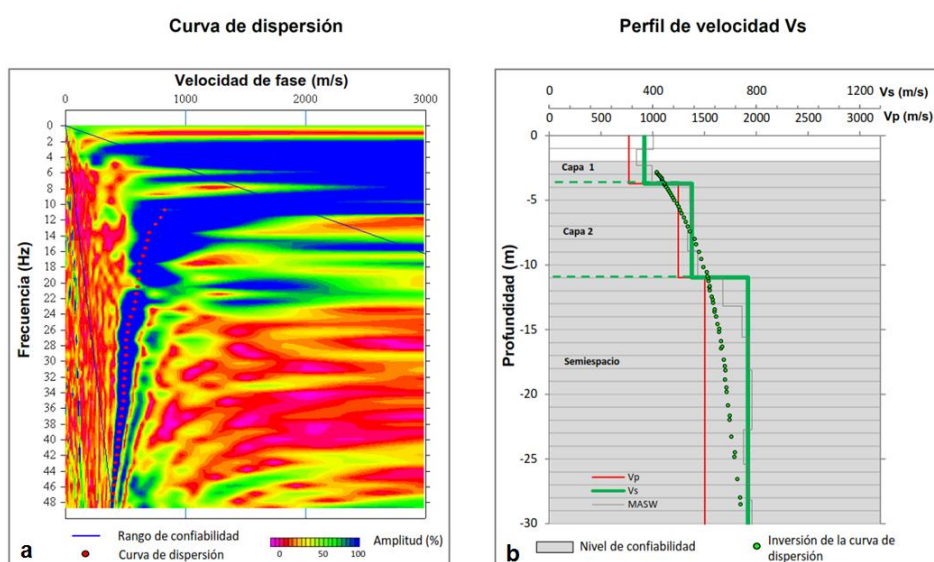


Figura 4: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir de la técnica de MASW.

- **Interpretación:** Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030. En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales. Asimismo, para mayor comprensión, se considera una escala de colores, ver Tabla 1.

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología y geotecnia de la zona de estudio, así como el contenido de humedad o nivel freático; ya que ambos parámetros influyen en la variación de la velocidad de ondas  $V_s$

Tabla 1: Clasificación de perfiles de suelo, a partir de la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	Vs	Norma E.030		Descripción
1	< 180 m/s	S <sub>3</sub>	Suelo blando	
2	180 m/s a 350 m/s	S <sub>2</sub>	Suelo medianamente rígido	Suelo moderadamente rígido
3	350 m/s a 500 m/s			Suelo rígido
4	500 m/s a 800 m/s	S <sub>1</sub>	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido o roca blanda
5	800 m/s a 1500 m/s			Roca moderadamente dura
6	> 1500 m/s	S <sub>0</sub>	Roca dura	

### 1.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

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 distribución de los valores de la resistividad del subsuelo, define o delimita los diferentes estratos con mayor o menor contenido de agua, sales disueltas presentes en las fracturas de las rocas y en la porosidad del suelo.

La tomografía eléctrica es un método convencional que se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A y B) conectados a un miliamperímetro; mientras que, con los otros dos electrodos (M y N), que están conectados a un milivoltímetro, se medirá la diferencia de potencial eléctrico  $\Delta V$  entre esos dos puntos (Figura 5).

Para la obtención de valores de resistividad aparente, se han realizado líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y cuya distribución se muestra en la Figura 5. La profundidad de investigación depende de la separación entre electrodos, por ejemplo, para una separación de electrodos de 1 metro, se tendría una profundidad máxima de 9 metros en el centro del perfil. Si se aumenta la distancia entre los electrodos, aumenta la profundidad de alcance, pero disminuye la resolución y en consecuencia aumenta el error.

- **Procesamiento:** Para el análisis de los datos obtenidos 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 distribución en el subsuelo incluyendo la corrección por topografía.

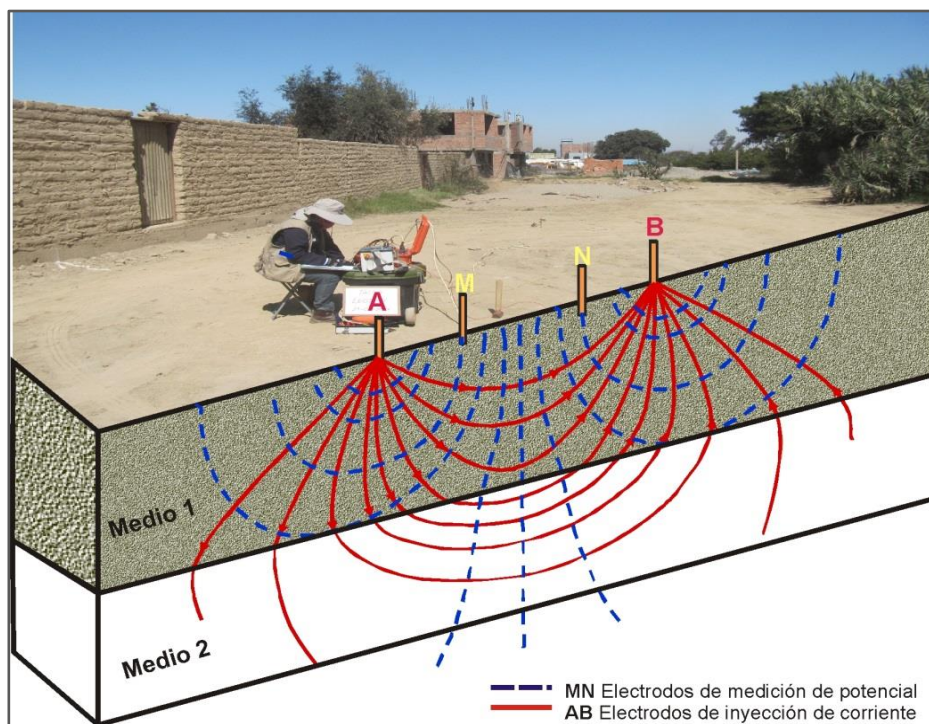


Figura 5: Principio del método de resistividad eléctrica (LE05-TC).

Finalmente, los resultados son presentados en secciones de resistividad 2D (Resistividad) que relacionan distancia - profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo y secciones de interpretación, donde se detallan las posibles estructuras que conforman el subsuelo, las zonas saturadas, los cambios de litología que pudiera existir y otras estructuras que sean de utilidad para el estudio.

- **Interpretación:** La interpretación de la información obtenida 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 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 valores de resistividad.

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

- Muy Alto Resistivo (color rojo):** Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas Ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Un factor importante a señalar es que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua; sin embargo, si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.*
- Alto Resistivo (color anaranjado):** Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.*
- Medianamente Resistivo (color verde):** Comprende valores entre los 100 y 500 ohm.m. Dentro de este grupo se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.*
- Bajo Resistivo (color celeste):** Comprende valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.*
- Muy Bajo Resistivo (color azul):** Comprende valores menores a 20 ohm.m y estos están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico, 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.*

Para el presente estudio, en la Tabla 2 se han resumido el rango de resistividades a considerarse.

Tabla 2: Rango de Resistividades

<b>Rango de resistividades</b>	<b>ohm.m</b>	<b>Tipo de suelo</b>	
Material muy resistivo	> 1500	Suelo muy seco o roca intacta	
Material resistivo	500 a 1500	Suelo seco o roca fracturada	
Material medianamente resistivo	100 a 500	Suelo con poco contenido de humedad	
Material bajo resistivo	20 a 100	Suelo saturado o roca con contenido de sales	
Material muy bajo resistivo	< 20	Suelo muy saturado	

## 2. ADQUISICIÓN DE DATOS

En este estudio, se ha realizado la aplicación de métodos sísmicos y geofísicos para lo cual, se han utilizado diferentes tipos de registros y arreglos. Para aplicar la técnica de razones espectrales (H/V) se utiliza registros de vibración ambiental, para la técnica MASW se realizan arreglos sísmicos lineales, e igual para los métodos eléctricos (ERT) que permiten conocer los valores de resistividad del suelo.

### 2.1. Registro de vibración ambiental (H/V)

Los registros de vibración ambiental son obtenidos con equipos sísmicos compuestos por un registrador tipo CityShark y sensores de tres componentes tipo Lennartz, ver Figura 6.



Figura 6: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en Tacna: sensor Lennartz (2N) y registrador CityShark II.

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Tacna, 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. Para cada uno de los puntos de registro de vibración ambiental, se considera una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis. En la ciudad de Tacna, se recolecto 288 registros de vibración ambiental de manera homogénea en toda el área de estudio (Figura 7).

En la Figura 8, 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 TC-062 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en

TC-153, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud que, al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en este estudio.

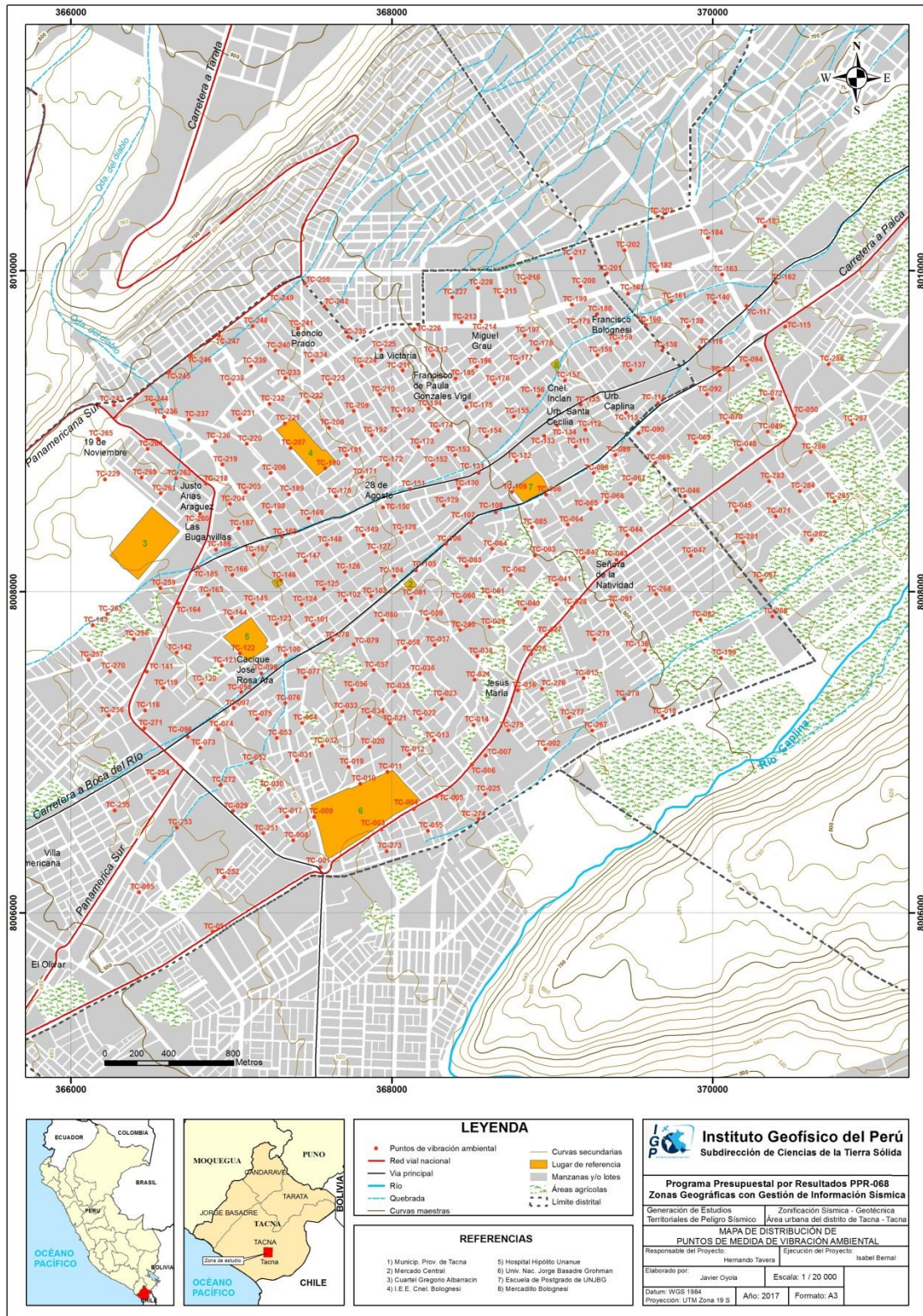


Figura 7: Mapa catastral de la ciudad de Tacna y distribución de puntos donde se tomaron registros de vibración ambiental.

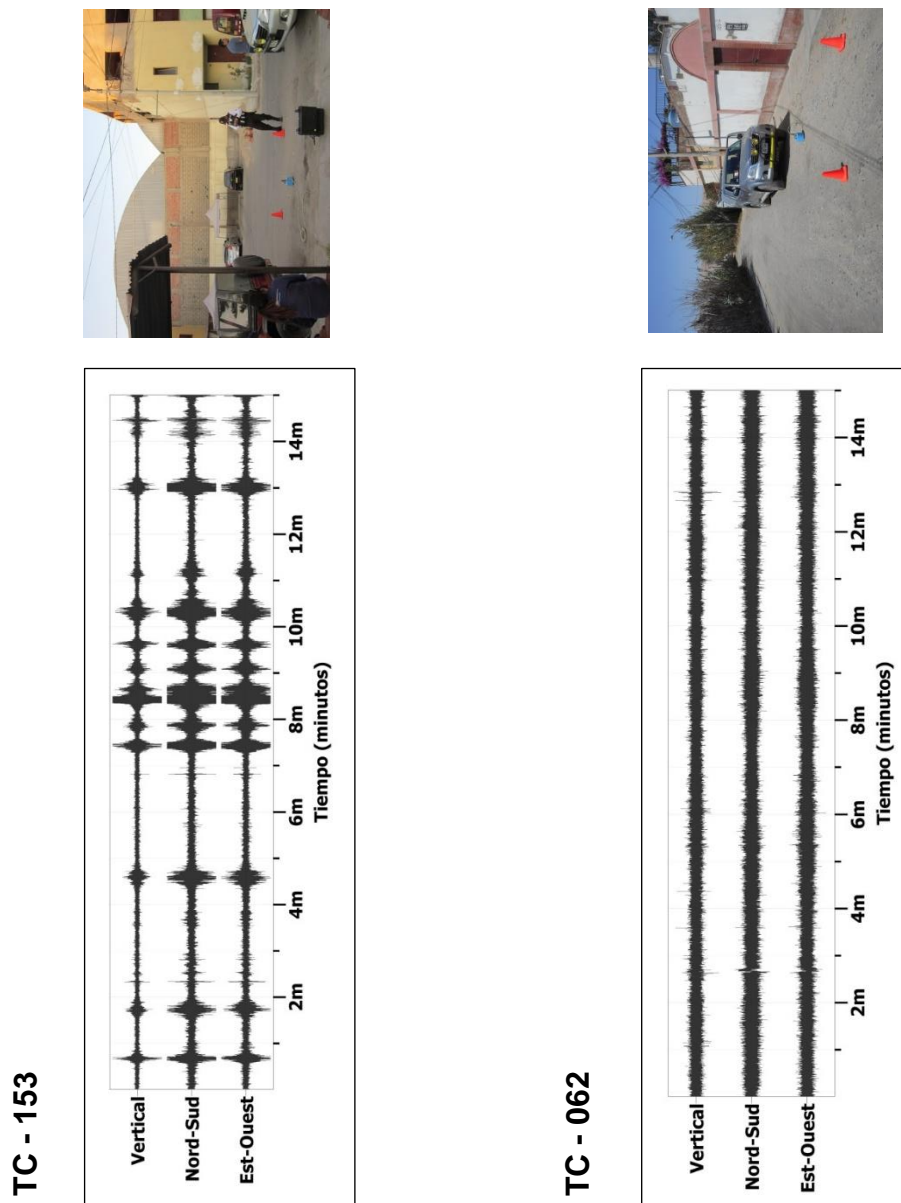


Figura 8: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (TC-153) y otro con ruido de fondo constante (TC-062). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

## 2.2. Registro de arreglos lineales (MASW)

Para el registro de datos se ha utilizado un equipo sísmico (sismómetro) de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz). Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs (Figura 9). Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamento entre geófonos, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y accesibilidad. La frecuencia de

muestreo fue de 4000 Hz (0.25 ms) con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos.



Figura 9: Equipo sísmico para la toma de datos de MASW en la Asoc. Taller Binacional.

En la ciudad de Tacna se realizaron 08 arreglos MASW cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 10, la distribución espacial de cada una de ellas codificado como: LS01-TC, ..., y LS08-TC.

Tabla 3: Coordenadas y características de las líneas sísmicas realizadas en Tacna

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-TC	367869	8006782	550	4	92
	367951	8006822	550		
LS02-TC	369858	8007937	611	4	92
	369904	8007858	611		
LS03-TC	366691	8007221	540	4	92
	366763	8007277	540		
LS04-TC	367655	8007710	570	4	92
	367579	8007658	570		
LS05-TC	368612	8008142	590	4	92
	368672	8008072	590		
LS06-TC	370340	8008997	643	4	92
	370342	8009094	643		
LS07-TC	367321	8008962	576	4	92
	367379	8008897	576		
LS08-TC	369685	8009972	641	4	92
	369771	8010000	641		

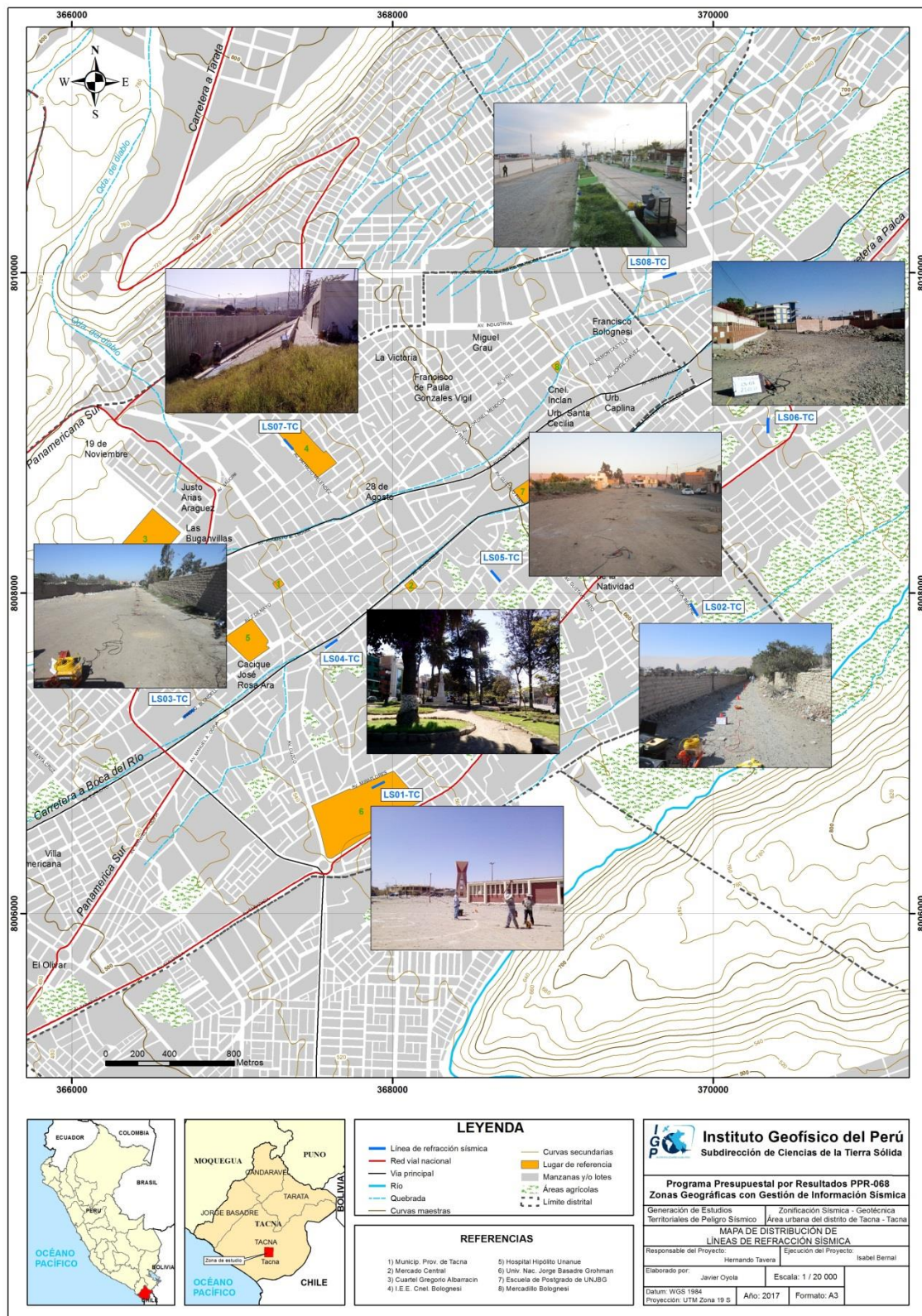


Figura 10: Mapa de la ciudad de Tacna, y distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas como: LS01-TC, ..., LS08-TC.

Durante la adquisición se visualiza los datos sísmicos (sismogramas), a fin de verificar su calidad y el nivel de ruido, tal como se observa en la Figura 11. Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (sumatoria de registros sísmicos), obtenidas con cuatro a cinco golpes en cada punto “shot”. Finalmente, se realiza el procesamiento preliminar para determinar, la profundidad de las capas y la velocidad de las ondas sísmicas.

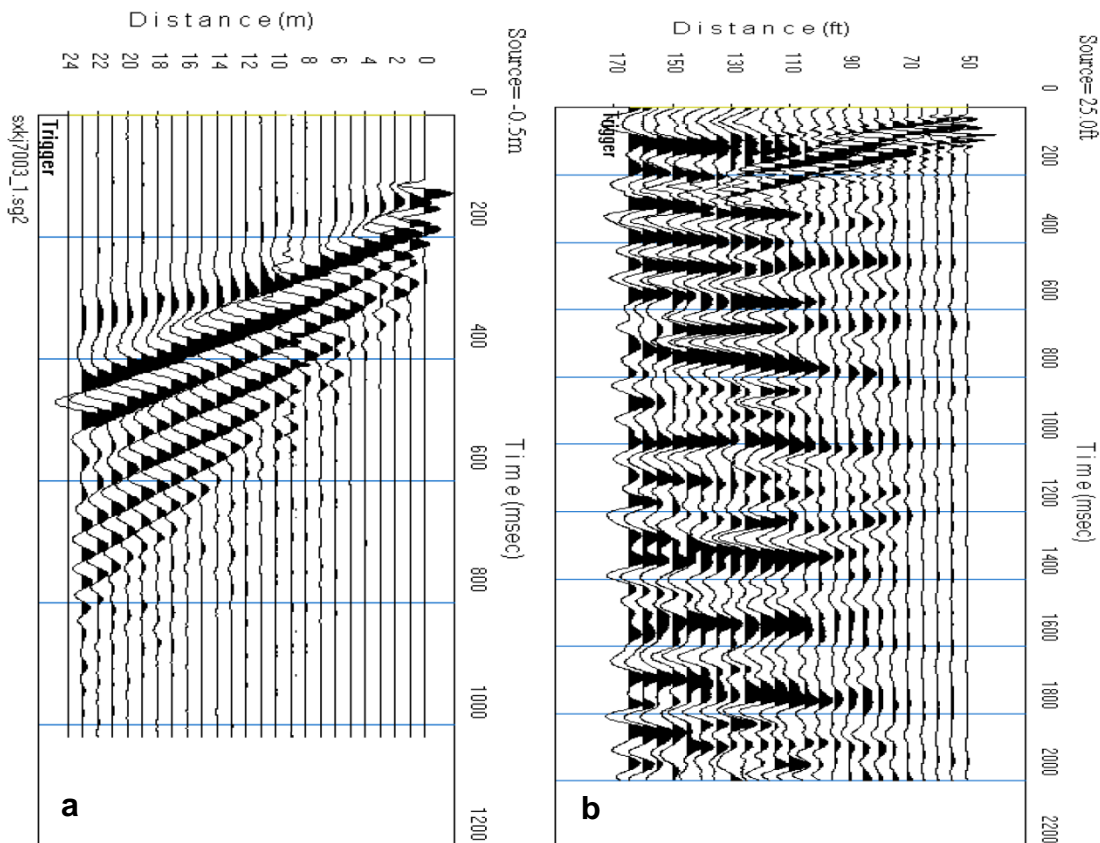


Figura 11: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 12, como ejemplo, se muestra la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS05-TC, ubicado en la calle Tacna cruce con la avenida Pacheco Céspedes. Este sismograma contiene señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental.

### 2.3. Registro de resistividad del suelo ERT

Para el registro de datos se ha utilizado un equipo de Resistividad / IP Syscal Pro de marca Iris Instruments, 30 electrodos de acero y 10 cables de potencial multiconductor.

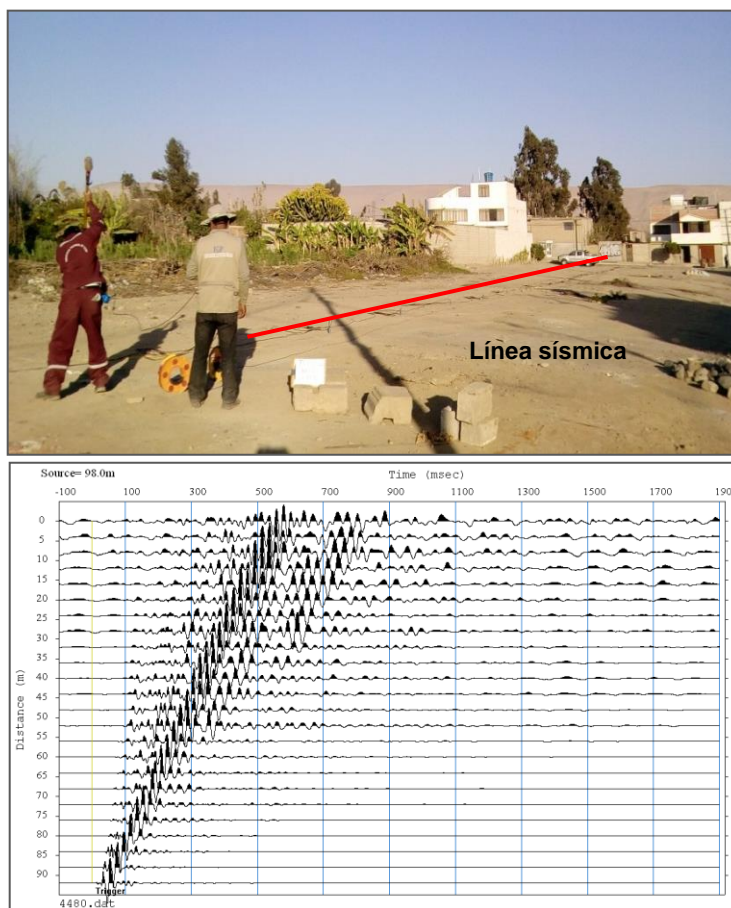


Figura 12: Disposición del equipo de adquisición de datos según el método de MASW y registro sísmico obtenido.

En la ciudad de Tacna se realizaron 05 líneas de tomografía eléctrica (Figura 13) con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 30 electrodos. Para las líneas se consideró un espaciamiento de 10 metros entre cada electrodo, sobre un tendido longitudinal que variaba de 260 y 290 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de los 40 metros. En la Tabla 4, se muestra las coordenadas UTM (WGS84) para los puntos extremos de las líneas eléctricas.

La calidad de la señal eléctrica de todos los registros obtenidos se evalúa mediante un test de resistencia de contacto entre los electrodos y el terreno, garantizando datos confiables para el procesamiento. Para mejorar las imágenes se hace uso de filtros que disminuye los efectos de borde, medidas negativas de resistividad aparente y la obtención de dos ciclos de registro por cada punto de medida de resistividad. Este hecho permitió evaluar la fiabilidad mediante la comparativa de los dos valores de resistividad, siendo los más fiables aquellos con menores diferencias. Para el análisis de los datos se consideró los siguientes criterios:

- ✓ La diferencia de potencial registrada debe ser mayor a 0.2 mV
- ✓ La relación entre el potencial registrado y la intensidad de corriente (V/I) debe ser mayor o igual a  $5 \times 10^{-4} \Omega$ .
- ✓ La diferencia de resistividad entre los dos ciclos de medida realizados en cada punto de registro debe ser inferior al 3%.
- ✓ La resistividad mínima y máxima aparente ha de estar entre 1 y 100 000  $\Omega\text{m}$ .

Tabla 4: Coordenadas de las líneas eléctricas (LE) realizadas en la ciudad de Tacna.

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01-TC	367868	8006754	559	10	290
	368163	8006708	563		
LE02-TC	369847	8007958	619	10	280
	369998	8007716	620		
LE03-TC	366790	8007286	549	10	230
	366594	8007139	543		
LE04-TC	367379	8009077	583	10	190
	367514	8008928	584		
LE05-TC	369835	8010024	658	10	240
	369599	8009945	651		

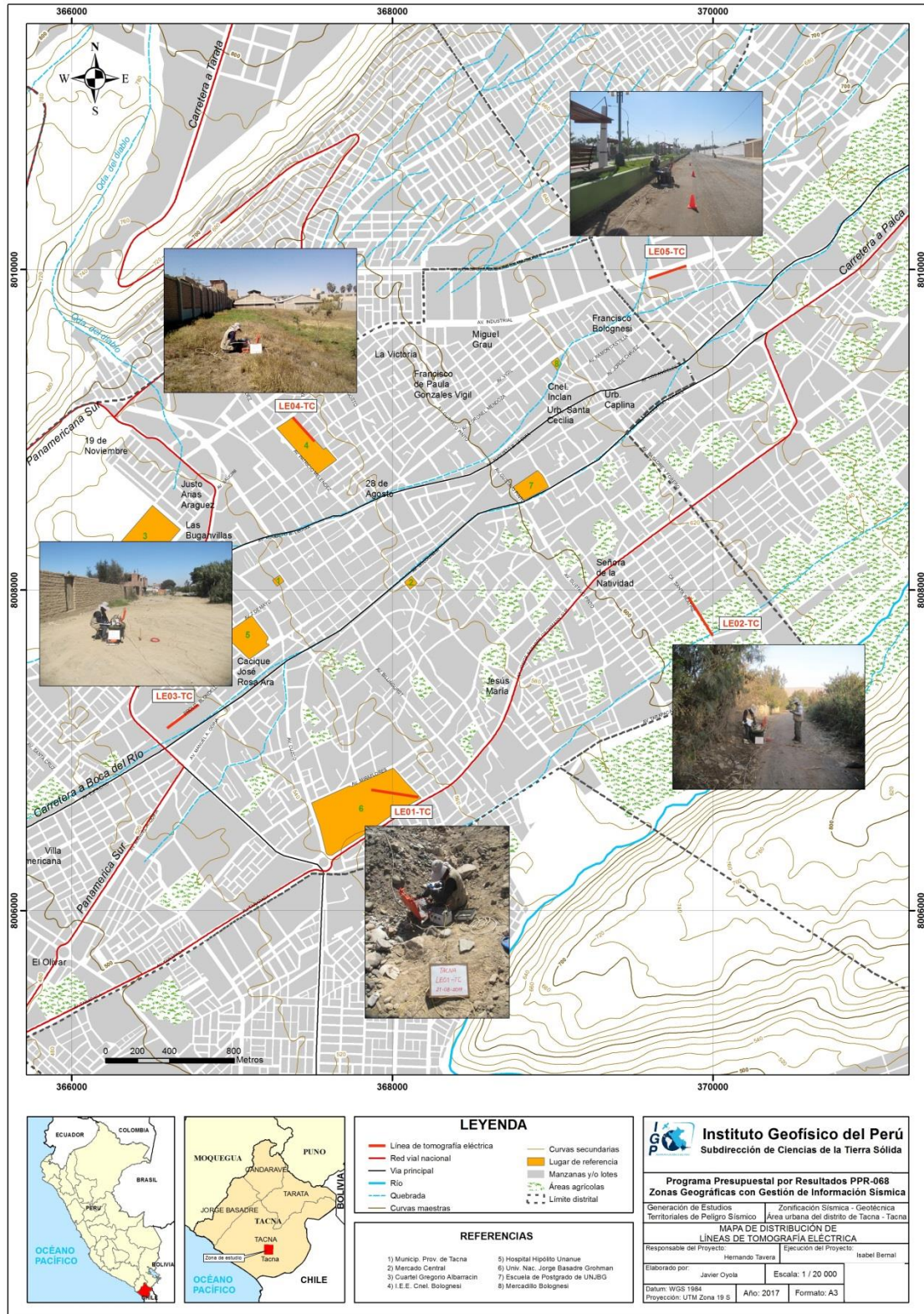


Figura 13: Mapa de la ciudad de Tacna y distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-TC, ..., LE05-TC.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. En la Figura 14, se muestra la disposición de equipo eléctrico y un ejemplo de la distribución de valores de resistividad en profundidad.

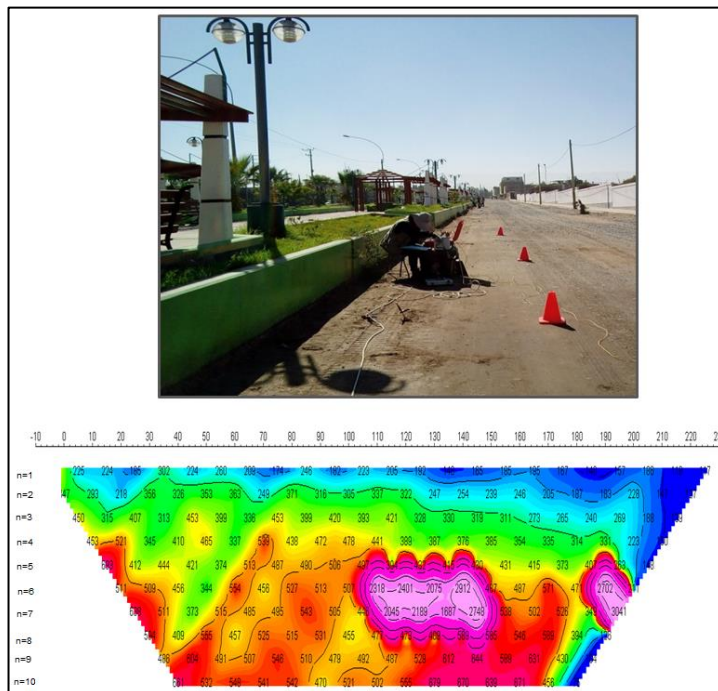


Figura 14: Disposición del equipo de adquisición de datos ERT (LE05-TC) y un ejemplo de registro e interpretación para un perfil eléctrico

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos sísmicos lineales (MASW) y métodos eléctricos (ERT). Todos tienen como principal objetivo conocer las propiedades físicas y dinámicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.). A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos en cada caso para la ciudad de Tacna.

#### 3.1. Frecuencias Predominantes

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro de vibración ambiental obtenidas de manera puntual en 288 puntos (Figura 15). La relación espectral entre las componentes horizontales con la vertical permite conocer las frecuencias y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa para cada punto.

**.- 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 obtenidos de las razones espectrales H/V, permiten definir dos rangos de frecuencias F0 ( $F \leq 2.0$  Hz) y F1 ( $F > 2.0$  Hz), mostrando un pico de frecuencia bien definido y otro de menor amplitud con tendencia a valores menores de frecuencia. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Tacna.

**.- Frecuencia predominante F<sub>0</sub>:** En la Figura 15, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F<sub>0</sub>, con valores predominantes entre 1.0 y 1.7 Hz. Estos están presentes principalmente por los alrededores de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG), el Hospital Hipólito Unanue y de manera puntual, hacia el extremo norte, por el mercadillo Bolognesi y por la Urb. Las Buganvilias. Estos valores evidencian la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor por esos sectores.

En la Figura 16 se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos TC-12(B), TC-251(G) y TC-253(H) ubicados en el extremo sur de la ciudad. Ellos presentan un pico con frecuencias de 1.46, 1.22 y 1.35 Hz, y amplificaciones de 2.9, 4.5 y 5.6 veces

respectivamente. Además de manera irregular presentan un segundo pico de frecuencias que va de 3.57 y 3.20 con amplificaciones de 1 y 2 veces (TC-250). Los resultados sugieren la existencia de dos capas sedimentarias, una superficial y una profunda de mayor espesor.

Las razones (H/V) obtenidas para los puntos TC-26(C), TC-96(D) y TC-131(E), ubicados en el centro de la ciudad, presentan un pico bien definido con frecuencias predominantes de 1.24, 1.26 y 1.23 Hz y amplificaciones de 2.8, 1.6 y 2.3 veces respectivamente. Los resultados evidencian la presencia de una capa sedimentaria de mayor espesor.

Los puntos TC-10(A), TC-154(F) y TC-287(I) ubicados, el primero al sur por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) y los dos siguientes, al norte y noroeste presentan frecuencias predominantes de 1.34, 1.22 y 1.23 Hz con amplificaciones de hasta 2 veces. Además, los suelos de estas zonas responden a una segunda frecuencia de 3.79, 3.67 y 3.43Hz con amplificaciones hasta 2 veces. Los resultados muestran la existencia de dos capas sedimentarias en esta zona, una superficial y una profunda de mayor espesor.

La presencia de dos picos de frecuencia evidencia mayor complejidad en la respuesta dinámica de los suelos a pesar de presentar bajas amplificaciones, a diferencia de los suelos que presentan un pico bien definido con moderada amplificación.

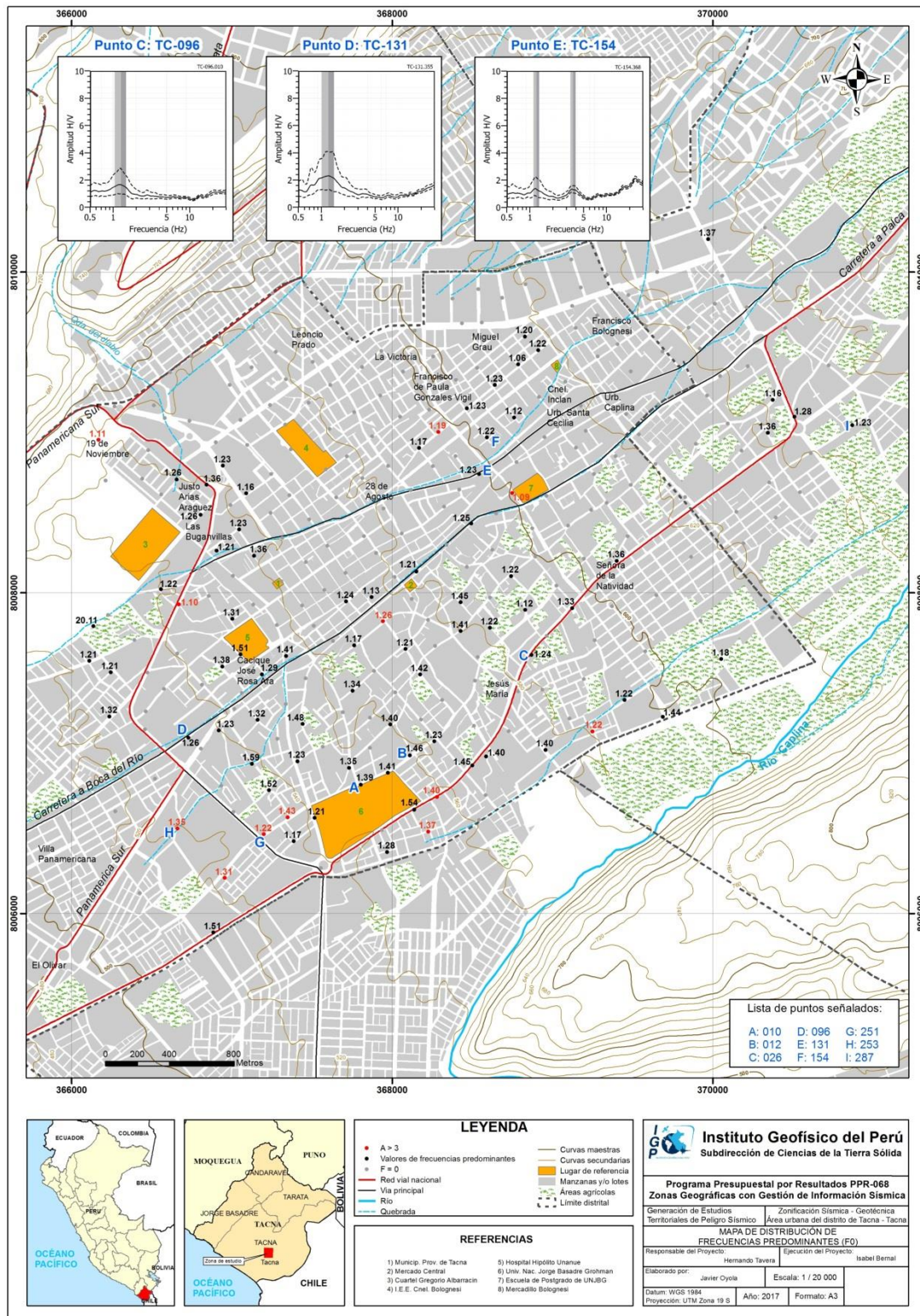
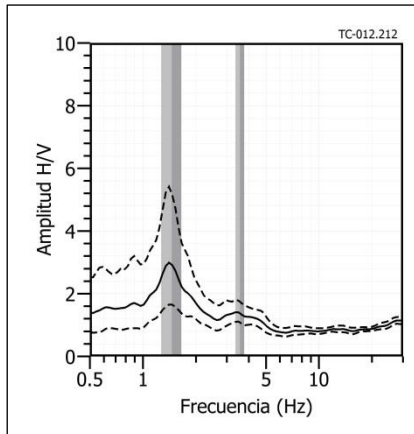
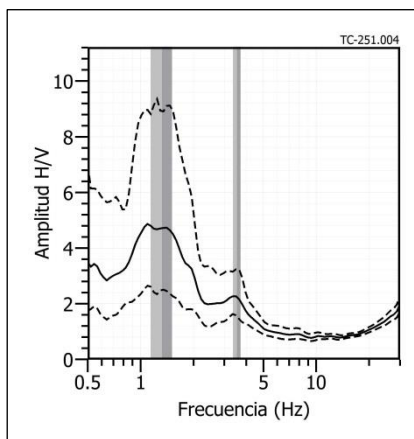


Figura 15: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ) definidas en cada punto. Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 15 como característicos de este rango.

**TC - 12**



**TC - 251**



**TC - 253**

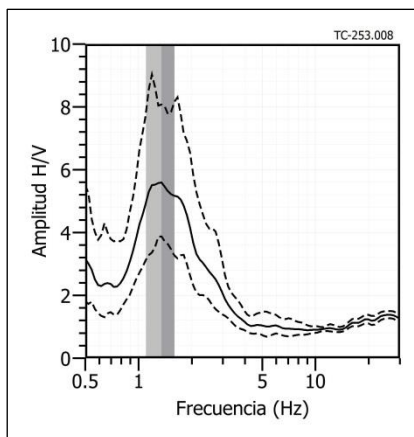
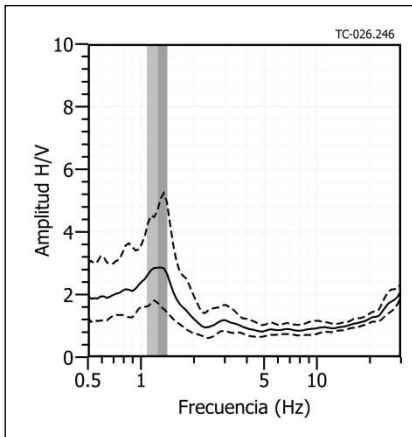
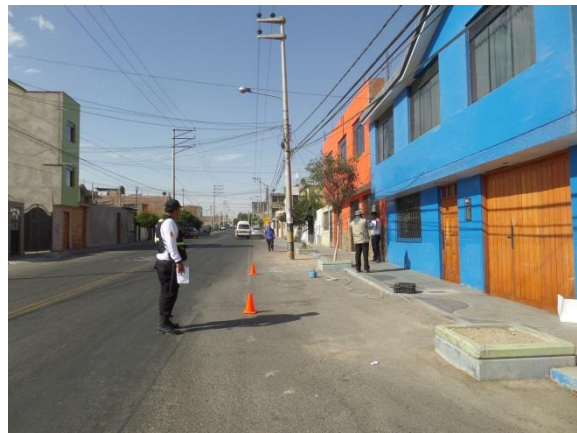
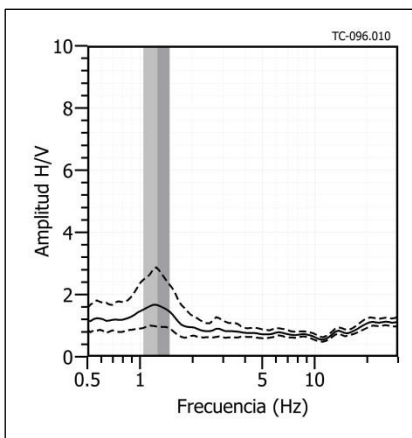


Figura 16: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F > 2.0\text{Hz}$ ) para los puntos TC-12(B), TC-251(G) y TC-253(H), ubicados al sur, cerca de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC - 26**



**TC - 96**



**TC - 131**

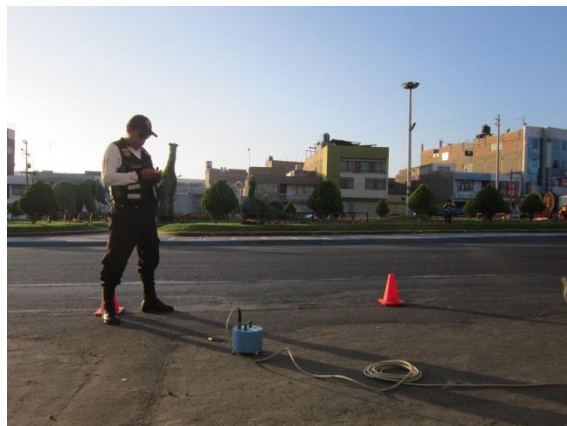
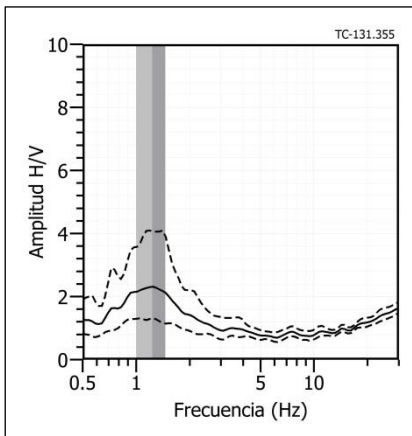
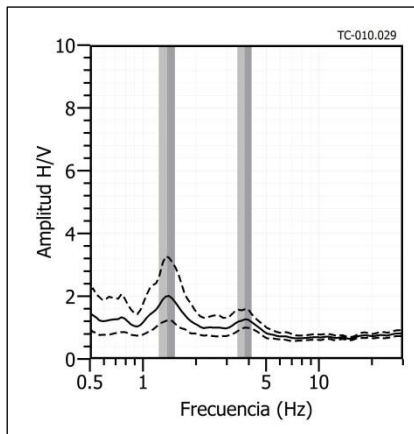
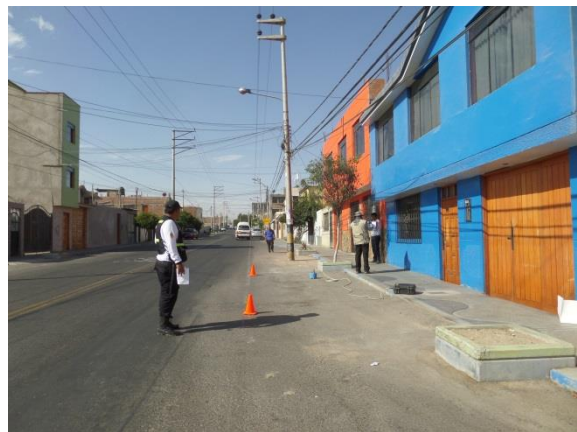
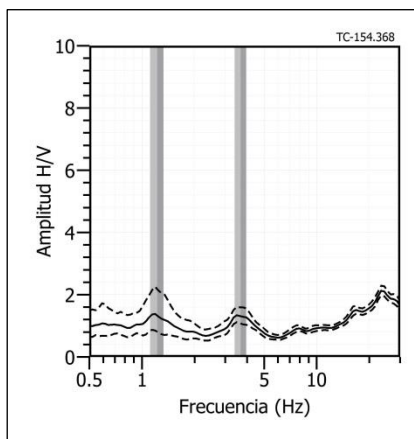


Figura 16: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ) para los puntos TC-26(C), TC-96 (D) y TC-131(E), ubicados en el centro de la ciudad. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC - 10**



**TC - 154**



**TC - 287**

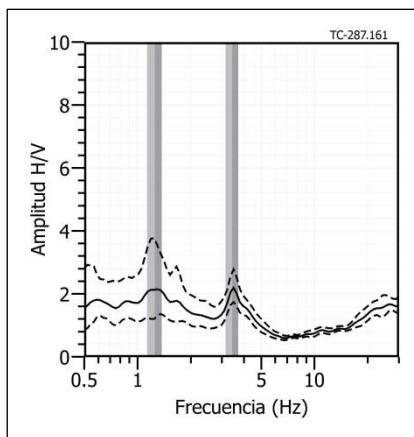


Figura 16: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ) para los puntos TC-10(A), TC-154 (F) y TC-287(I), ubicados el primero al sur por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y los dos siguientes al norte y noroeste. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencia predominante  $F_1$** : En la Figura 17 se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_1$  ( $F > 2.0\text{Hz}$ ). En este rango, predominan frecuencias entre 2.5 a 5.5 Hz con amplificaciones mayores a 2 veces y están presentes en toda la ciudad a excepción de algunas zonas puntuales en el centro de la ciudad y por la urb. Señora de la Natividad, municipalidad provincial de Tacna y el mercado Central. En la Figura 18, se muestra ejemplos de gráficos de razones espectrales que caracterizan los suelos de esta ciudad en el rango de frecuencias  $F_1$ .

Las razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos TC-199(X), TC-200(Y) y TC-228(C'), ubicados al norte de la ciudad, límite con Alto de la Alianza, presentan un pico con frecuencias predominantes de 3.59, 3.55 y 3.76 Hz y amplificaciones mayores a 3 veces. Así mismo, los puntos TC-139(N), TC-140(O) y TC-161(T) ubicados por la Urb. Francisco Bolognesi, presentan frecuencias predominantes de 3.46, 3.45 y 3.47Hz con amplificaciones de hasta 4 veces. Las mayores amplificaciones se presentan hacia el noreste del área de estudio, por lo que los resultados sugieren la existencia de una capa sedimentaria menos rígida que el resto de la ciudad, que ante la ocurrencia de un evento sísmico puede desarrollar el fenómeno de amplificación sísmica.

Los puntos TC-180(W), TC-224(B') y TC-241(D'), ubicados en dirección norte, el primero en la urb. Francisco Bolognesi y los dos siguientes, por las Urb. La Victoria y Leoncio Prado, donde predomina un pico bien definido a frecuencias de 3.42, 4.04 y 4.11Hz con amplificaciones relativas en algunos puntos de hasta 2.8 veces. De igual manera, las razones (H/V) obtenidas para los puntos TC-94(G), TC-116(I) y TC-288(I'), ubicados al noroeste por la carretera hacia Palca, presentan un pico definido con frecuencias predominantes de 3.47, 3.41 y 3.52 Hz con amplificaciones de hasta 3.5 veces, evidenciando así la presencia de suelos homogéneos.

Los puntos TC-143(Q), TC-258(F') y TC-263(G'), ubicados al sur del cuartel Gregorio Albarracín, presentan un pico con frecuencias predominantes a 3.56, 3.81 y 3.27 Hz con amplificaciones menores a 2 veces, además los puntos TC-38(C), TC-86(F) y TC-207(A') ubicados, el primero por la Urb. Jesús María, el segundo por la escuela de postgrado de la UNJBG y el tercero por la I.E. Coronel Bolognesi, corresponden suelos que responden a frecuencias de 3.57, 3.57 y 4.01 Hz con amplificaciones menores a 2 veces. Los resultados muestran la existencia de suelos rígidos con un comportamiento dinámico homogéneo.

Por otro lado, las razones (H/V) para los puntos TC-09 (A), TC-178(V) y TC-204(Z), ubicados el primero por la UNJBG, el segundo por el mercadillo Bolognesi y el tercero por la Urb. Justo Arias Aragüés, presentan un pico definido con frecuencias predominantes de 3.84, 3.45 y 3.59 Hz con amplificaciones menores a 2 veces; además en los suelos de estas zonas también sobresale un segundo pico a frecuencias de 1.2Hz con mínimas amplificaciones y en algunos casos alcanzan amplificaciones de hasta 2 veces como en el punto TC-09. Este segundo pico desaparece conforme se tiende hacia la dirección norte.

Los puntos TC-101(H), TC-124(L) y TC-146(S) ubicados por la municipalidad provincial de Tacna y por el hospital Hipólito Unanue, indican la presencia de un pico con frecuencias de 3.22 Hz, y amplificaciones de hasta 4 veces; sin embargo, los puntos cercanos no presentan alguna frecuencia predominante. Estos resultados muestran la existencia de zonas de amplificación sísmica muy focalizada.

De igual manera, los puntos TC-123(K), TC-124(L) y TC-125(M) ubicados por la municipalidad provincial de Tacna y por el hospital Hipólito Unanue, presentan frecuencias de 3.22 y 3.58Hz, con amplificaciones de 4.1 y 1.6 respectivamente, y puntos próximos a estos, no responden a alguna frecuencia predominante, evidenciando un comportamiento complejo en esta zona.

Finalmente, las razones (H/V) obtenidas para los puntos TC-81(E), TC-145(R) y TC-170(U), ubicados en el centro de la ciudad, el primero por el mercado central, el segundo por el hospital Hipólito Unanue y el tercero al sur de la I.E. Bolognesi, definen a suelos que no presentan frecuencias predominantes, al igual que los puntos TC-118(J), TC-142(P) y TC-254(E'), ubicados al suroeste del hospital Hipólito Unanue, por la carretera a Boca del Río y los puntos TC-15(B), TC-61(D) y TC-281(H'), ubicados por la urb. Señora de la Natividad. Estos resultados indican la existencia de suelos rígidos.

La presencia de dos picos de frecuencias evidencia una mayor complejidad en la respuesta dinámica de los suelos, a pesar de presentar baja amplificación, a diferencia de los suelos que presentan un pico bien definido con moderada amplificación que es el caso de la zona ubicada en dirección sur este de la ciudad de Tacna.

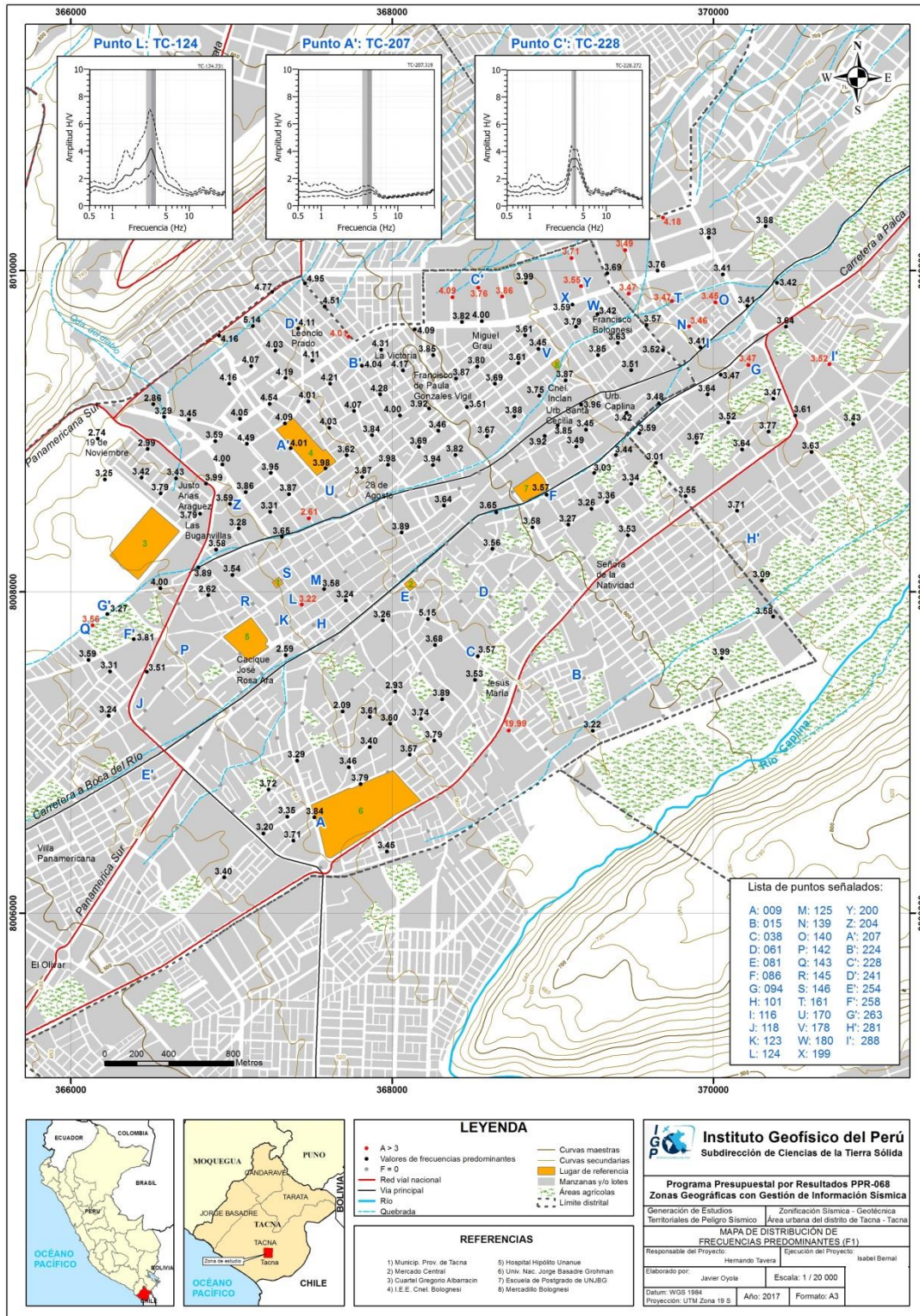
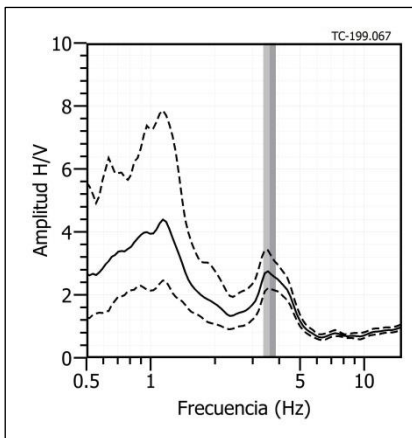
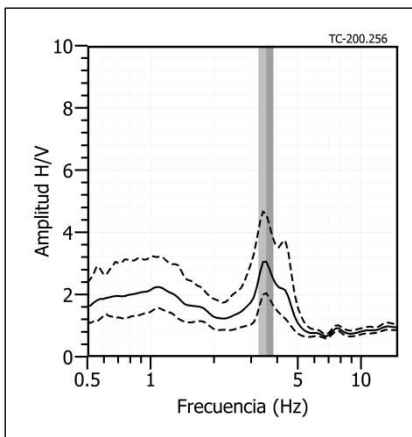


Figura 17: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 (F > 2.0 Hz). Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 18 como características de este rango.

**TC - 199**



**TC - 200**



**TC - 228**

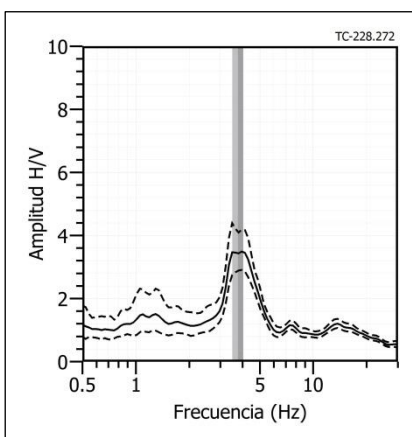
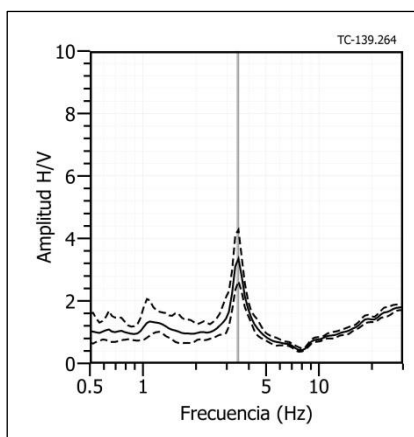
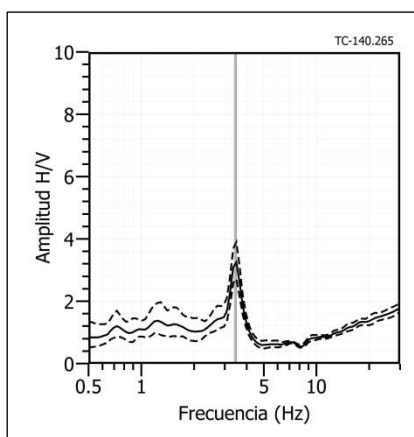


Figura 18: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-199(X), TC-200(Y) y TC-228(C) ubicados al norte de la ciudad de Tacna, límite con Alto de la Alianza. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 139



### TC - 140



### TC - 161

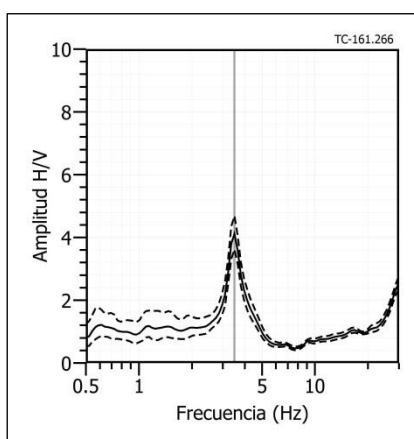
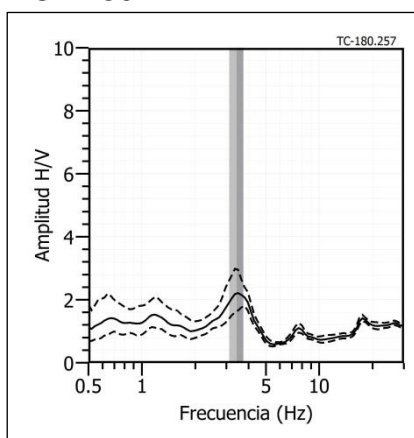
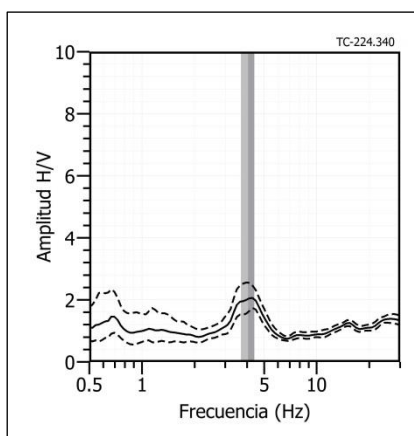


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-139(N), TC-140(O) y TC-161(T) ubicados al noroeste, por la Urb. Francisco Bolognesi. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 180



### TC - 224



### TC - 241

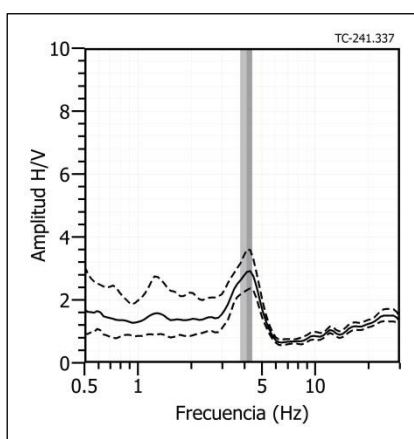
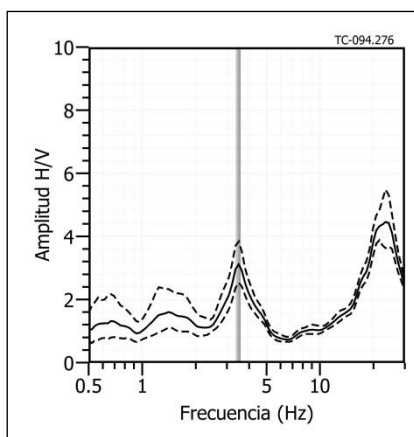
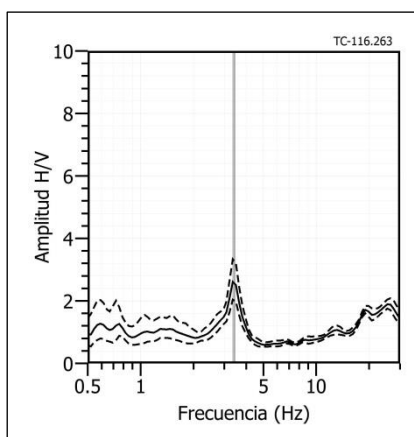


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): Puntos TC-180(W), TC-224(B') y TC-241(D') ubicados al norte, el primero en la Urb. Francisco Bolognesi y los dos siguientes por las Urb. La Victoria y Leoncio Prado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC - 94**



**TC - 116**



**TC - 288**

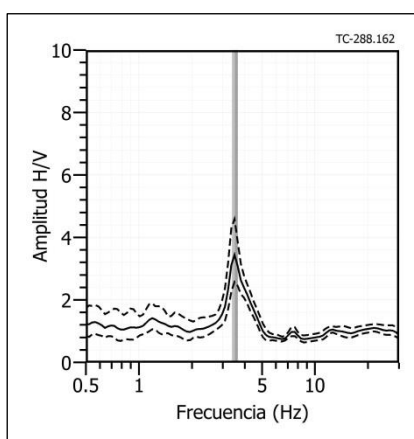
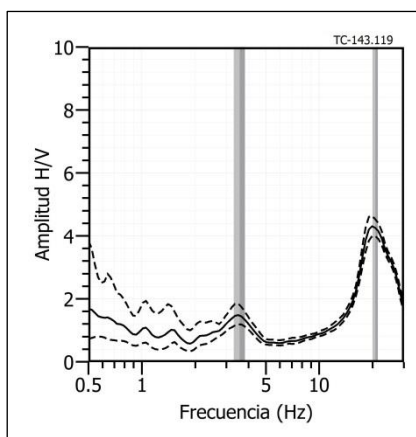
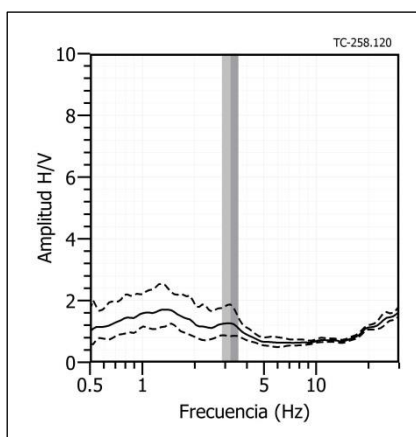


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): Puntos TC-94(G), TC-116(I) y TC-288(I') ubicados al noroeste, por la carretera en dirección hacia Palca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 143



### TC - 258



### TC - 263

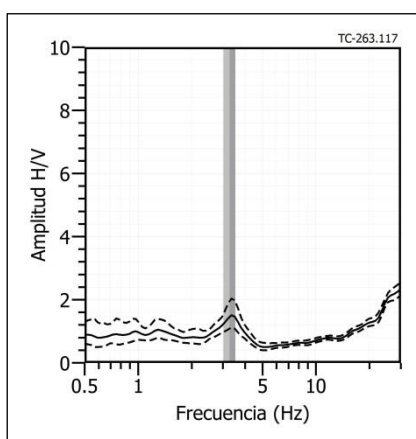
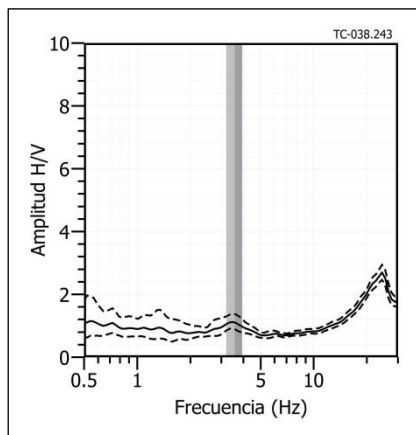
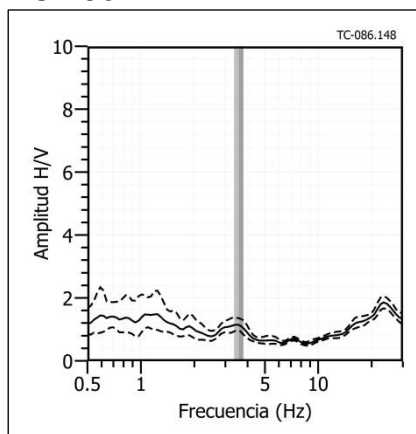


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-143(Q), TC-258(F) y TC-263(G) ubicados al sur del cuartel Gregorio Albarracín. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC- 38**



**TC - 86**



**TC - 207**

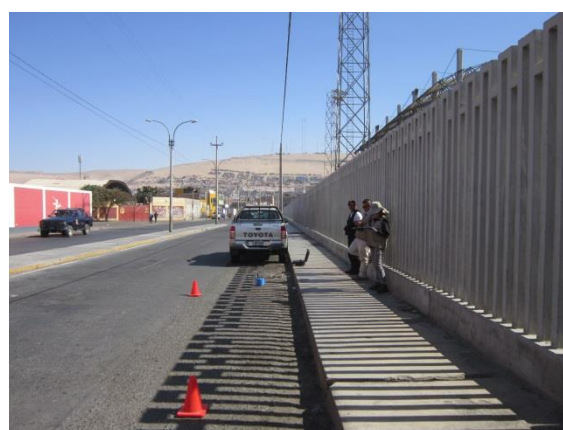
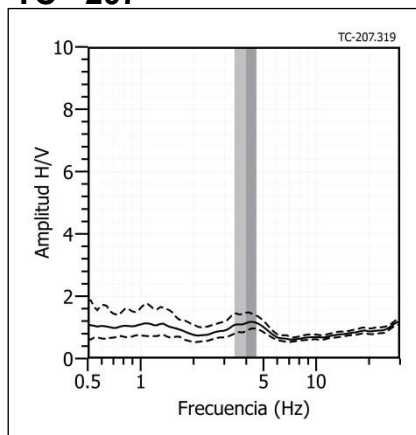
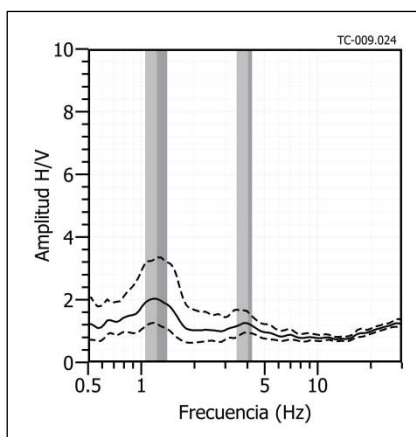
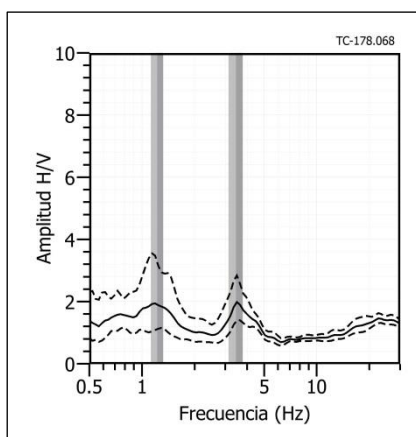


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): Puntos TC-38(C), TC-86(F) y TC-207(A') ubicados, el primero por la Urb. Jesús María, el segundo por la escuela de postgrado de la UNJBG y el tercero por la I.E. Coronel Bolognesi. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC - 09**



**TC - 178**



**TC - 204**

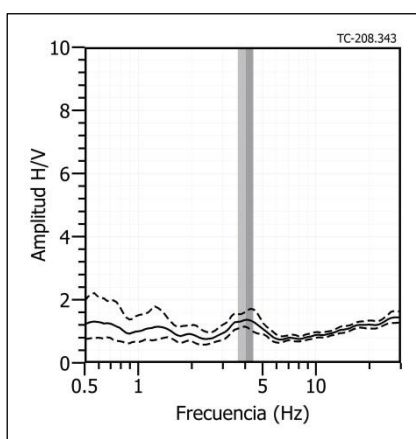
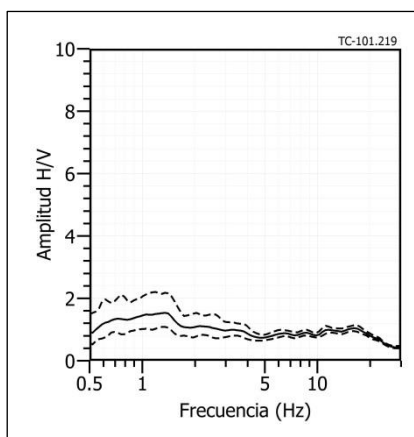
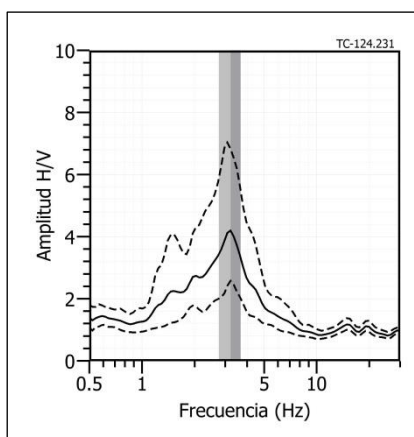


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-09(A), TC-178(V) y TC-204(Z) ubicados, el primero por la UNJBG, el segundo por el mercadillo Bolognesi y el tercero por la Urb. Justo Arias Aragués. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 101



### TC - 124



### TC - 146

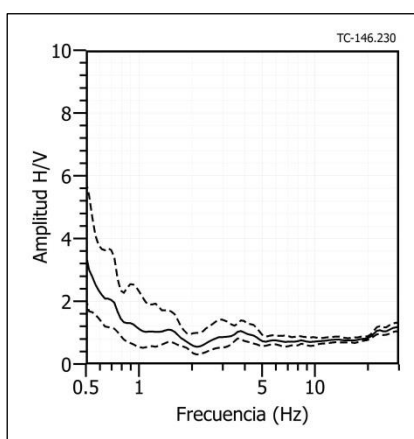
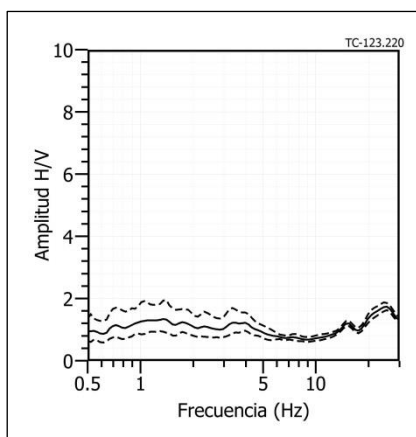
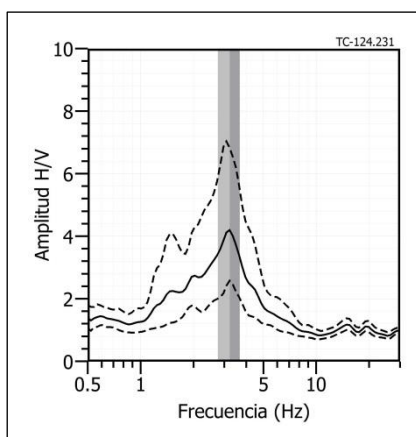


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-101(H), TC-124(L) y TC-146(S) ubicados, por la municipalidad provincial de Tacna. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 123



### TC - 124



### TC - 125

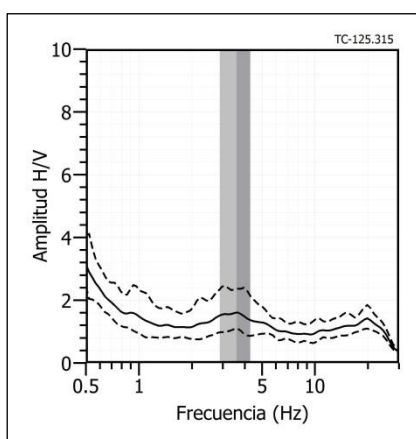
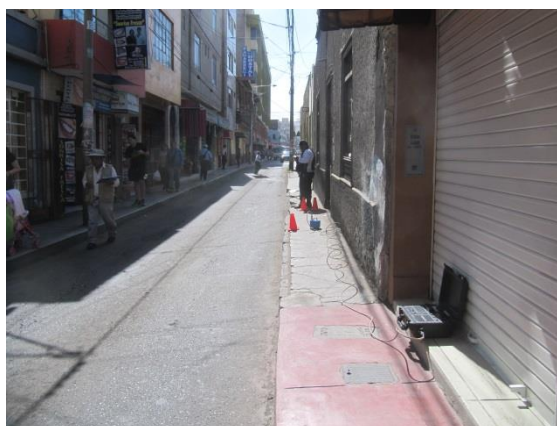
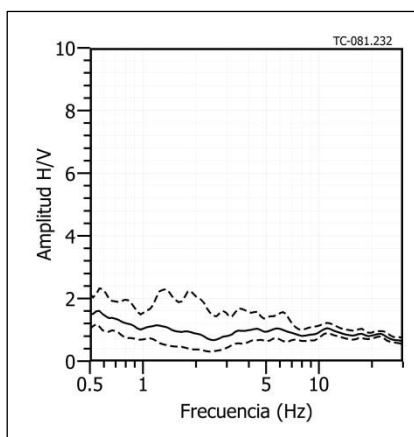
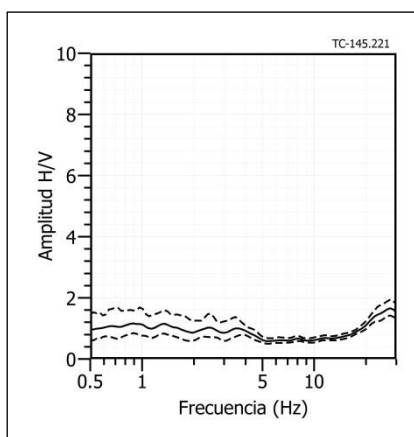


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-123(K), TC-124(L) y TC-125(M) ubicados cerca al hospital Hipólito Unanue y a la municipalidad provincial de Tacna. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 81



### TC - 145



### TC - 170

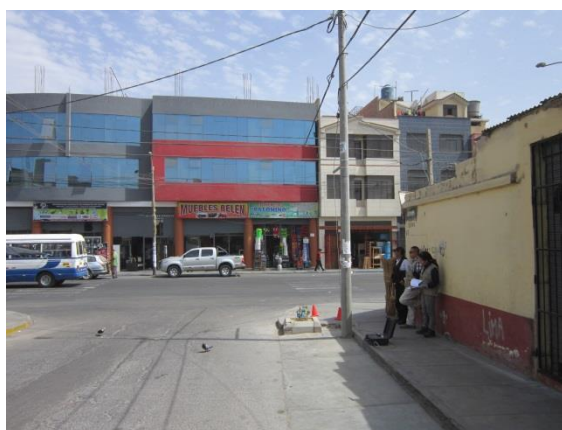
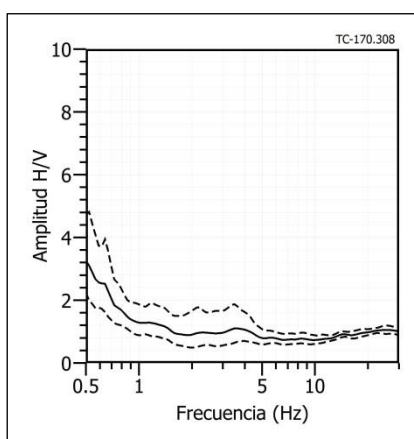
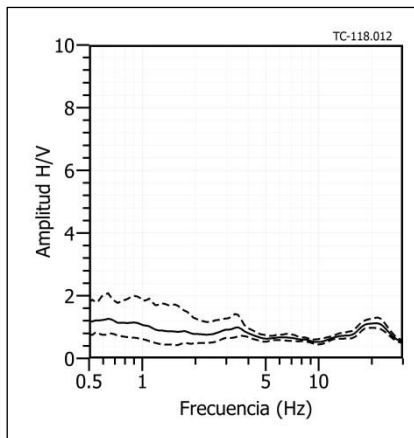
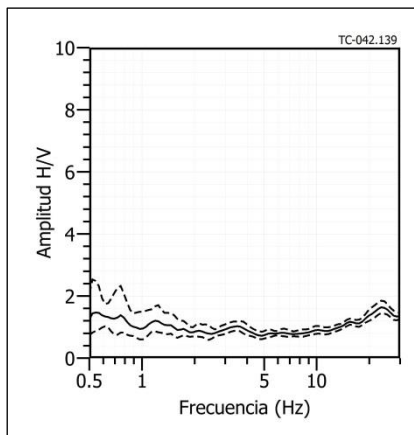


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): Puntos TC-81(E), TC-145(R) y TC-170(U) ubicados en el centro de la ciudad, el primero por el mercado central, el segundo por el hospital Hipólito Unanue y el tercero al sur de la I.E. Bolognesi. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**TC - 118**



**TC - 142**



**TC - 254**

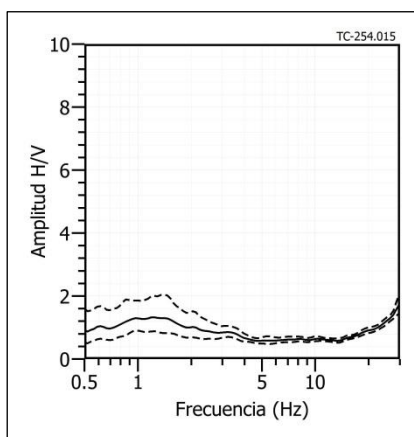
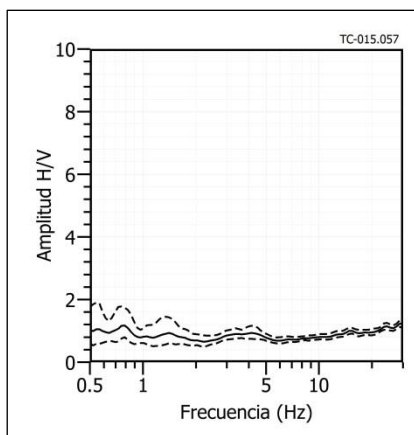
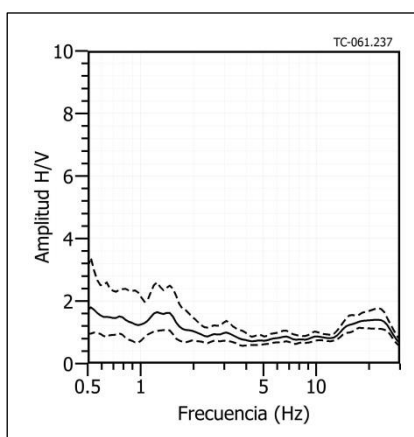


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-118(J), TC-142(P) y TC-254(E') ubicados al suroeste del hospital Hipólito Unanue por la carretera a Boca del Río. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### TC - 15



### TC - 61



### TC - 281

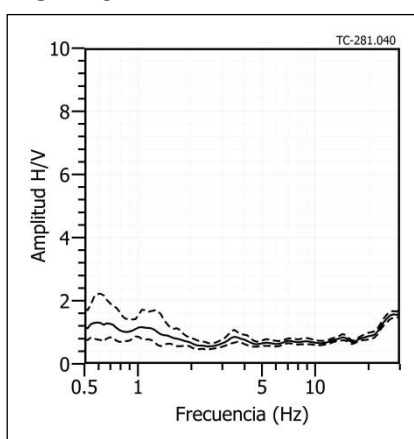


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): Puntos TC-15(B), TC-61(D) y TC-281(H') ubicados por la Urb. Señora de la Natividad. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

El análisis de razones espectrales H/V en el área urbana de Tacna ha permitido observar la presencia de dos rangos de frecuencias: F0 (1.0-1.7Hz) presentes en el extremo sur de la ciudad por el mercado central, la UNJBG y hospital Hipólito Unanue; y F1 (>2.0 Hz) presente de manera uniforme en toda la zona de estudio, a excepción de algunas zonas puntuales en el centro de la ciudad y en sus extremos suroeste y oeste.

Los suelos del área urbana de Tacna responden a frecuencias entre 2.5 y 5.5 Hz, principalmente asociados a la presencia de una capa superficial de menor espesor; sin embargo, existe áreas puntuales donde el suelo es influenciado por un segundo rango de frecuencias (1-1.5Hz): Universidad Nacional Jorge Basadre, mercadillo Bolognesi, el hospital Hipólito Unanue, etc., valores bajos de frecuencia que se asocian a la existencia de una capa sedimentaria de mayor espesor que infrayace a la anterior. Además, existen zonas donde el suelo no responde a alguna frecuencia predominante (Urb. Señora de la Natividad, 28 de agosto y por la carretera hacia Boca del Río), evidenciando que estas zonas tienen un comportamiento dinámico menos complejo.

Por otro lado, la zona noreste (límite con el distrito de Alto de la alianza y Ciudad Nueva) presenta grandes amplificaciones en relación al resto de la ciudad (mayores a 3 veces), lo que sugieren la presencia de suelos poco consolidados y/o flexibles que podrían presentar el fenómeno de amplificación sísmica a la ocurrencia de un sismo.

### 3.2. Perfiles de Velocidad de ondas de corte Vs

Los modelos de velocidad de propagación de las ondas sísmicas ( $V_s$ ) proporcionan información muy útil en materia de riesgo sísmico y reconocimiento general, de la estructura y naturaleza del subsuelo. En este estudio, el procesamiento de los registros sísmicos permitió llegar a profundidades de 30 metros para cada línea sísmica. Líneas LS01 y LS02 en la UNJBG y en la Urb. Sra. de la Natividad, las líneas LS03, LS04, LS05 y LS08 en el Cercado y las líneas LS06 y LS07, en las Universidad Privada de Tacna y en el Colegio Bolognesi. A continuación, se describe los resultados obtenidos agrupados según su similitud y distribución de velocidades en el perfil sísmico:

**Líneas sísmicas LS01-TC, LS02-TC:** Realizadas en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (LS01) y en la calle Santa Beatriz Urb. Sra. de la Natividad (LS02) (Figura 19). Su análisis e interpretación indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 4 a 5 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 360 m/s que sugieren la presencia de suelos rígidos. La segunda, con velocidad  $V_s$  de

550 m/s considera suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 700$  m/s; es decir, que existen suelos muy rígidos.

**Líneas sísmicas LS03-TC, LS04-TC, LS05-TC y LS08-TC:** Realizadas en el centro, en la Av. Prolongación Bondell (LS03), en la Av. Bolognesi (LS04), en la calle Pacheco Céspedes (LS05) y en la Av. Industrial, frente al gobierno regional (LS08), ver Figura 10. Su análisis e interpretación indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 a 7 metros de espesor y velocidades  $V_s$  entre 240 a 320 m/s y la segunda, con velocidades  $V_s$  de 460 a 525 m/s y espesores de 7 a 12 metros. La primera capa evidencia la existencia de suelos moderadamente rígidos, y la segunda suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades  $V_s > 700$  m/s; es decir suelos muy rígidos.

**Líneas sísmicas LS06-TC y LS07-TC:** Líneas sísmicas realizadas cerca de la Universidad Privada de Tacna (LS06) y en el estadio del colegio Bolognesi (LS07), ver Figura 10. Su análisis e interpretación indica la presencia de suelos conformados por una capa de 4 a 9 metros de espesor y velocidades  $V_s$  entre 440 a 450 m/s que corresponden a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 650$  m/s; es decir suelos muy rígidos.

En la Tabla 5, se presenta los valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  para los distintos perfiles de suelo. En la Figura 19, se presenta los resultados obtenidos para la línea sísmica LS01 y para el resto, ver Anexos.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio definen la existencia en la ciudad de Tacna de 2 capas sísmicas y un semiespacio, que al correlacionarse con la geología local presenta las siguientes características:

La zona céntrica, de suroeste a noreste (LS03, LS04, LS05 y LS08), presentan suelos moderadamente rígidos para la primera capa ( $V_s$  240 a 320 m/s) con espesores de 4 a 7 metros con incremento hacia el sur oeste (LS03). En profundidad, se evidencia la presencia de suelos muy rígidos ( $V_s$  500 a 790 m/s).

En la zona sur (sureste y noroeste: LS01, 02, 06 y 07), se identifica la presencia de suelos rígidos para la primera capa ( $V_s$  360 a 450 m/s) con espesores de 4 a 9 metros y en profundidad, suelos muy rígidos ( $V_s$  510 a 760 m/s). En general, los suelos de mayor espesor están presentes en la zona central y conforme se avanza de suroeste a noreste,

las velocidades de las ondas de corte se incrementan cerca del cerro Arunta. Según la geología, estos suelos son depósitos aluviales consolidados en diferente grado.

Tabla 5: Valores de espesor y Vs de las líneas sísmicas realizados en Tacna mediante el método de MASW.

		Superficie <span style="float: right;">▶ Profundidad</span>					
Línea Sísmica	N° DE CAPA						
	1		2		Semiespacio		VS30 (m/s)
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	
LS01-TC	367	4	551	7	768	-	620
LS02-TC	375	5	491	8	690	-	552
LS03-TC	304	7	523	13	794	-	496
LS04-TC	251	4	460	12	741	-	492
LS05-TC	240	4	476	7	777	-	538
LS06-TC	448	9	625	-	-	-	595
LS07-TC	442	4	687	-	-	-	640
LS08-TC	317	4	511	22	702	-	490

	Suelo blando ( $V_s < 180$ m/s)
	Suelo moderadamente rígido (180 – 350 m/s)
	Suelo rígido (350 – 500 m/s)
	Suelo muy rígido o roca blanda (500 – 800 m/s)
	Roca moderadamente duro (800 – 1500 m/s)

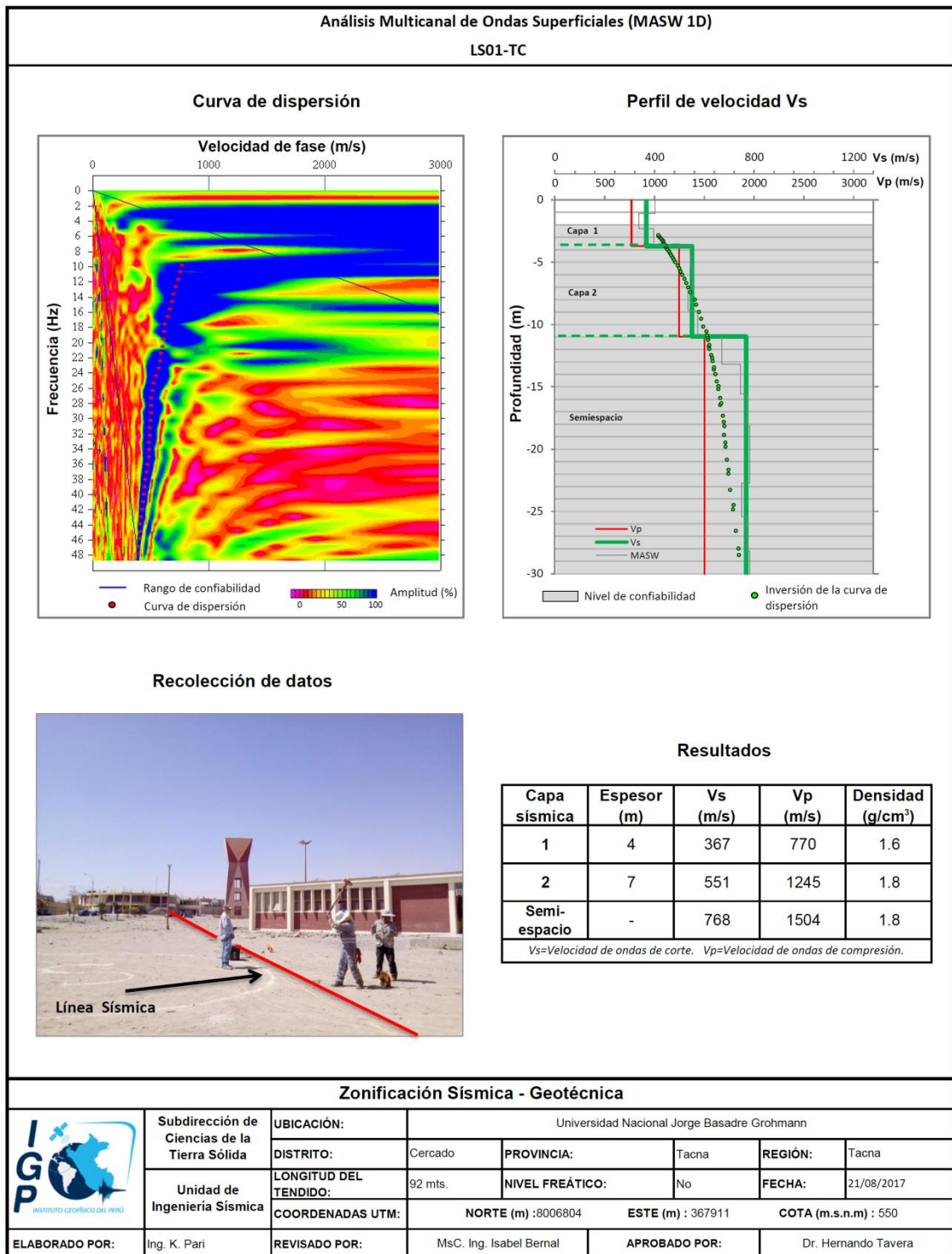


Figura 19: Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico LS01-TC.

### 3.3. Periodos Dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica de razones espectrales, 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 20, se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes para la ciudad de Tacna, los cuales han sido separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.4 segundos, en gris los periodos mayores y los puntos que no presentan periodos de color gris.

Los periodos de 0.3 segundos se distribuyen de manera casi uniforme sobre la ciudad; mientras que, periodos de 0.2 segundos se presentan en una zona principalmente, por la urb. Leoncio Prado y el colegio Coronel Bolognesi. Asimismo, el 29% de la zona de estudio presenta sensibilidad a periodos de 0.7 y 0.9 segundos. Las mayores amplificaciones para ambos grupos de periodos, se presentan al noreste, en el límite con los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de Tacna, están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$ , donde  $T_0$  es el periodo dominante,  $H$  el espesor del estrato y  $V_s$  es la velocidad de onda de corte. Asumiendo, velocidades de 350 m/s y 400 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.2 y 0.3 segundos, se estima la presencia de una capa superficial con espesores entre 18 y 30 metros. En la zona sur, esta capa está asentada sobre un estrato de mayor espesor, 60 metros (periodos de 0.7 y 0.9). Estos valores para los espesores de las capas superficiales, son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los arreglos sísmicos.

En la ciudad de Tacna, la distribución espacial de los periodos mayores a 0.3 segundos sugieren la presencia, en el subsuelo, de una capa profunda de gran potencia y los periodos menores, una capa superficial de menor potencia, donde la primera influye moderadamente sobre la segunda. Por otro lado, los valores de 0.3 segundos con altas amplificaciones se distribuyen principalmente en dirección noreste de la ciudad, sugiriendo que los suelos en estas zonas son más flexibles en comparación con el resto del área de estudio.

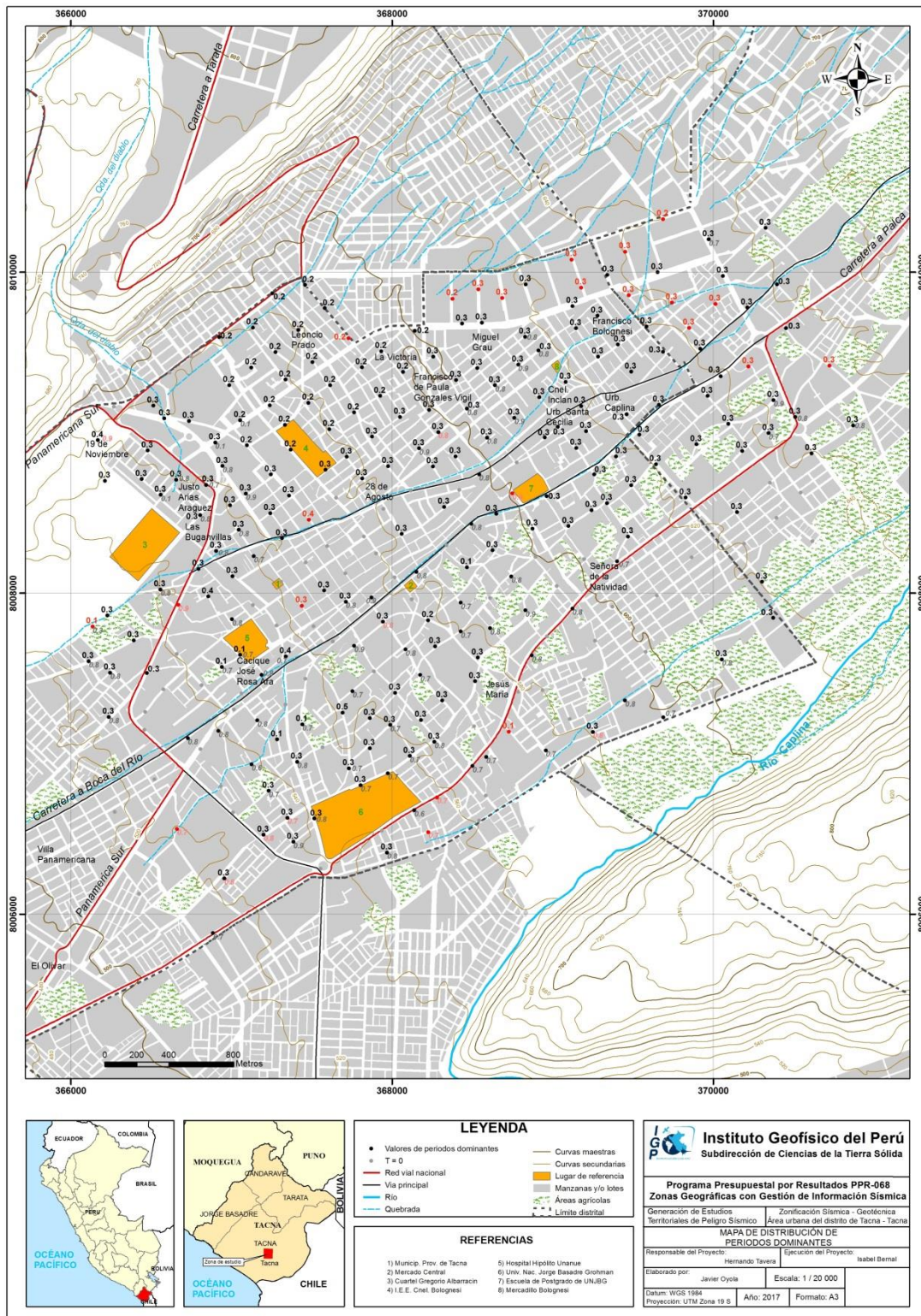


Figura 20: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

### 3.4. Secciones de resistividad geoelectrica

A continuación, se describe los resultados obtenidos en cada una de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en la ciudad de Tacna:

La línea eléctrica **LE01-TC** fue realizada en el cercado de Tacna, dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Esta línea eléctrica muestra valores resistivos ( $>500 \Omega.m$ ), sugiriendo la presencia de suelos compuestos por gravas de diferentes tamaños; mientras que el material de desmonte encontrado a lo largo de la línea, en un menor porcentaje presenta valores de resistividad relativamente bajos ( $< 100 \Omega.m$ ), ver Figura 21.

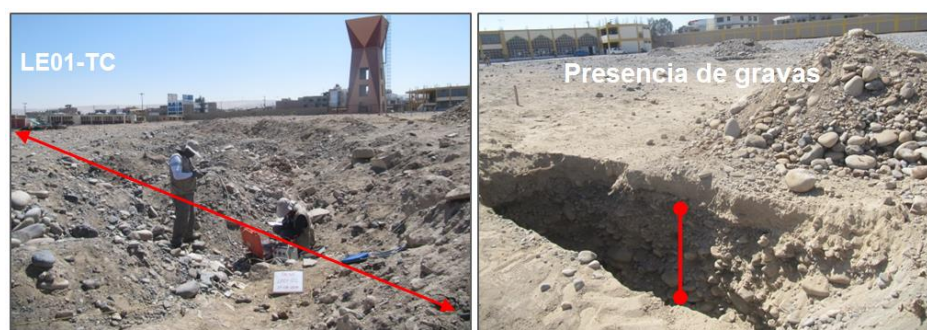


Figura 21: Vista de la línea eléctrica LE01-TC

Las líneas eléctricas **LE02-TC**, **LE03-TC**, **LE04-TC** y **LE05-TC** fueron realizadas en la Urb. Señora de la Natividad, Prolongación Blondell, I.E.E. Coronel Bolognesi y Av. Industrial (espaldas de la I.E. Federico Barreto) respectivamente (Figura 22).

En la línea LE02-TC, se identificó tres horizontes geoelectricos, donde el segundo presenta valores resistivos, asociados a la presencia de gravas depositadas por el río Caplina (Anexo). La línea LE03-TC, presenta una especie de dique resistivo que podría asociarse a la presencia de material de desmonte; asimismo, los valores bajos resistivos en la estación 170 coincide con la presencia de un canal sin revestir que corta la línea (Anexo) La LE05-TC presenta dos horizontes, donde el primero es medianamente resistivo pudiendo deberse a la influencia del riego de los parques que se encuentran al lado de la línea, el segundo horizonte es resistivo, ver Anexo.

En general, las líneas eléctricas presentan un mayor porcentaje de valores medianamente resistivo ( $>100 \Omega.m$ ) asociados a la presencia de materiales poco porosos y en menor porcentaje, valores bajo resistivo ( $<100 \Omega.m$ ), tanto en superficie como en

profundidad, pero de forma aislada, sugiriendo que son lentes de material saturado probablemente como aporte del regadío de los terrenos de cultivo y parques próximos a las líneas, así como por la presencia de acequias sin revestir.



Figura 22: Vista de las líneas eléctricas LE02-TC, LE03- TC, LE04- TC y LE05- TC.

En la Tabla 6, se muestra la orientación, profundidad en el subsuelo alcanzada en el estudio y la saturación del medio. En la Figura 23, se presenta el resultado para la línea LE01–TC y en los Anexos para las líneas LE02 a LE05.

Tabla 6: Valores de resistividad obtenidos de las líneas eléctricas obtenidas en Tacna.

Línea Eléctrica	Orientación	Profundidad de alcance (m)	Horizontes geoelectricos	Saturación
LE01-TC	NW-SE	39		NP
LE02-TC	NW-SE	39	Horiz. 1 (170 -500 Ω.m)	NP
			Horiz. 2 (501-1790 Ω.m)	NP
			Horiz. 3 (490-34) Ω.m)	P
LE03- TC	NE-SW	39		P
LE04- TC	NW-SE	39		NP
LE05- TC	NE-SW	39	Horiz. 1 (80-500 Ω.m)	NP
			Horiz. 2 (501-1465 Ω.m)	NP

\*(P) Presente, (NP) No presenta.

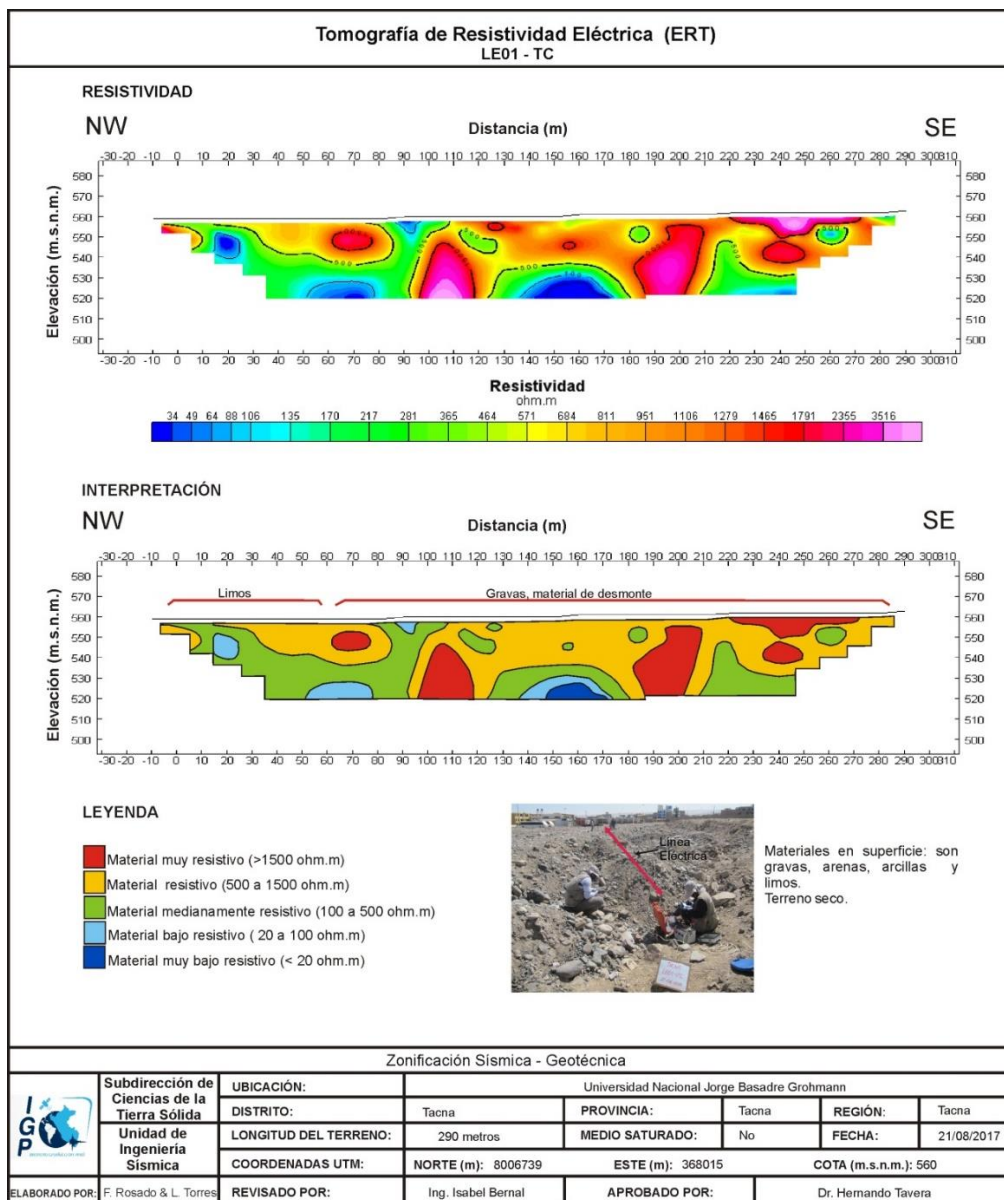


Figura 23: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-TC.

*De acuerdo a los resultados obtenidos, en el área urbana de la ciudad de Tacna se tiene suelos no saturados. Es posible que la sobre explotación del agua subterránea ha hecho que este descienda hasta los 80 - 110 metros de profundidad (Peña et al. 2009); sin embargo, en algunas líneas se tiene la presencia de materiales saturados en forma de lentes aislados. Geológicamente, Tacna presenta depósitos aluviales que, por sus características de material, pueden almacenar agua subterránea.*

*Finalmente, de acuerdo a los datos analizados no se ha encontrado nivel freático superficial, solo lentes aislados saturados. El nivel freático estaría ubicado a profundidades mayores a 80 metros, coherente con los resultados obtenidos por INRENA (2003), también usando métodos geofísicos.*

## 4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos, se ha delimitado zonas con características dinámicas similares. Por ejemplo, la aplicación del método de razones espectrales H/V ha permitido conocer el periodo dominante del suelo de la ciudad de Tacna y las amplitudes máximas relativas ( $A_{max}$ ), siendo el periodo dominante 0.2 y 0.3 segundos; además en el área céntrica y hacia los extremos sur y sur oeste de la ciudad, estos valores son influenciados por periodos entre 0.7 y 0.9 segundos debido a los mayores espesores de las capas sedimentarias. Por otro lado, se ha delimitado áreas donde la amplificación relativa es mayor a tres veces, y esto ocurre en la zona norte, límite con los distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza. En áreas cercanas al río Caplina, por la urbanización señora de la Natividad, los suelos no responden a ningún periodo, y por lo tanto los suelos se comportan de manera rígida.

Los resultados obtenidos con el método MASW muestran que la zona céntrica, de suroeste a noreste, presenta suelos moderadamente rígidos para la primera capa con espesores de 4 a 7 metros que aumentan hacia el extremo sur oeste. En profundidad, se evidencia la existencia de suelos muy rígidos, lo cual es coherente con la geología local en la que predominan sedimentos del cuaternario compuesto por depósitos aluviales. Según lo expuesto, los suelos de mayor espesor se extienden hacia la zona central y conforme se avanza en dirección de suroeste a noreste.

De acuerdo a los resultados obtenidos con Tomografía Eléctrica en el área de Tacna predominan los medios no saturados (medianamente resistivos), pero compuesto por material aluvial y, por lo tanto, el nivel freático se encontraría a profundidades mayores a 40 metros. De acuerdo a la correspondencia entre resultados obtenidos con métodos sísmicos y eléctricos, los suelos de Tacna tienen un comportamiento rígido.

### 4.1. Zonificación Sísmica

El mapa de Zonificación sísmica-geotécnica para el área urbana de la ciudad de Tacna, se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, delimitando zonas cuyos suelos presentan características de respuestas similares ante la ocurrencia de un sismo. Las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas, han permitido identificar en el área de estudio, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S1. Dentro de esta zona, hacia el norte del área de

estudio, los suelos presentan amplificaciones mayores a 3 veces y en aproximadamente el 70% de la zona en estudio, los suelos responden en dos rangos de periodos dominantes con mínimas amplificaciones.

Para el área urbana de la ciudad de Tacna, se propone la siguiente zonificación sísmica-geotécnica (Figura 24).

- **ZONA I:** Conformada por estratos de grava coluvial mal gradada a nivel superficial cubiertos por depósitos de material fino (arenas-limosas, arenas – arcillosas) con espesores de hasta 20 metros.

*Este suelo tiene un comportamiento de semi-rígido a rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos y velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$ , entre 490 y 640 m/s, que corresponde a un dominio de suelos Tipo S1 según la norma sismorresistente peruana. En la Figura 24, se indica con color verde los suelos que responden a periodos de 0.1 y 0.2 segundos, de verde claro los que responden a periodos de 0.3 segundos y con líneas en amarillo, el área que contiene aproximadamente al 70% del área en estudio (extremo SO), donde predominan suelos que responden a periodos entre 0.1 y 0.3 segundos influenciados con mínimas amplificaciones por un segundo rango de periodos entre 0.6 y 0.9 segundos. Dentro de esta zona (S1), con líneas rojas se delimitan las áreas donde los suelos presentan amplificaciones relativas mayores a 3 veces, cerca de los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva, evidenciando la presencia de suelos menor consistencia respecto al resto del área de estudio. Asimismo, de manera puntual, cerca al hospital Hipólito Unanue, también se obtienen altas amplificaciones.*

*La mayor parte de la ciudad de Tacna presenta una capacidad portante alta  $>3.0 \text{ kg/cm}^2$ , a excepción de dos zonas ubicadas hacia el noreste del área de estudio. Por la escuela de postgrado de la UNJBG y al suroeste del cuartel Gregorio Albarracín, la capacidad portante es muy baja ( $<1.0 \text{ kg/cm}^2$ ).*

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la estructura no coincida con la del suelo, esto a fin de evitar que se experimente el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

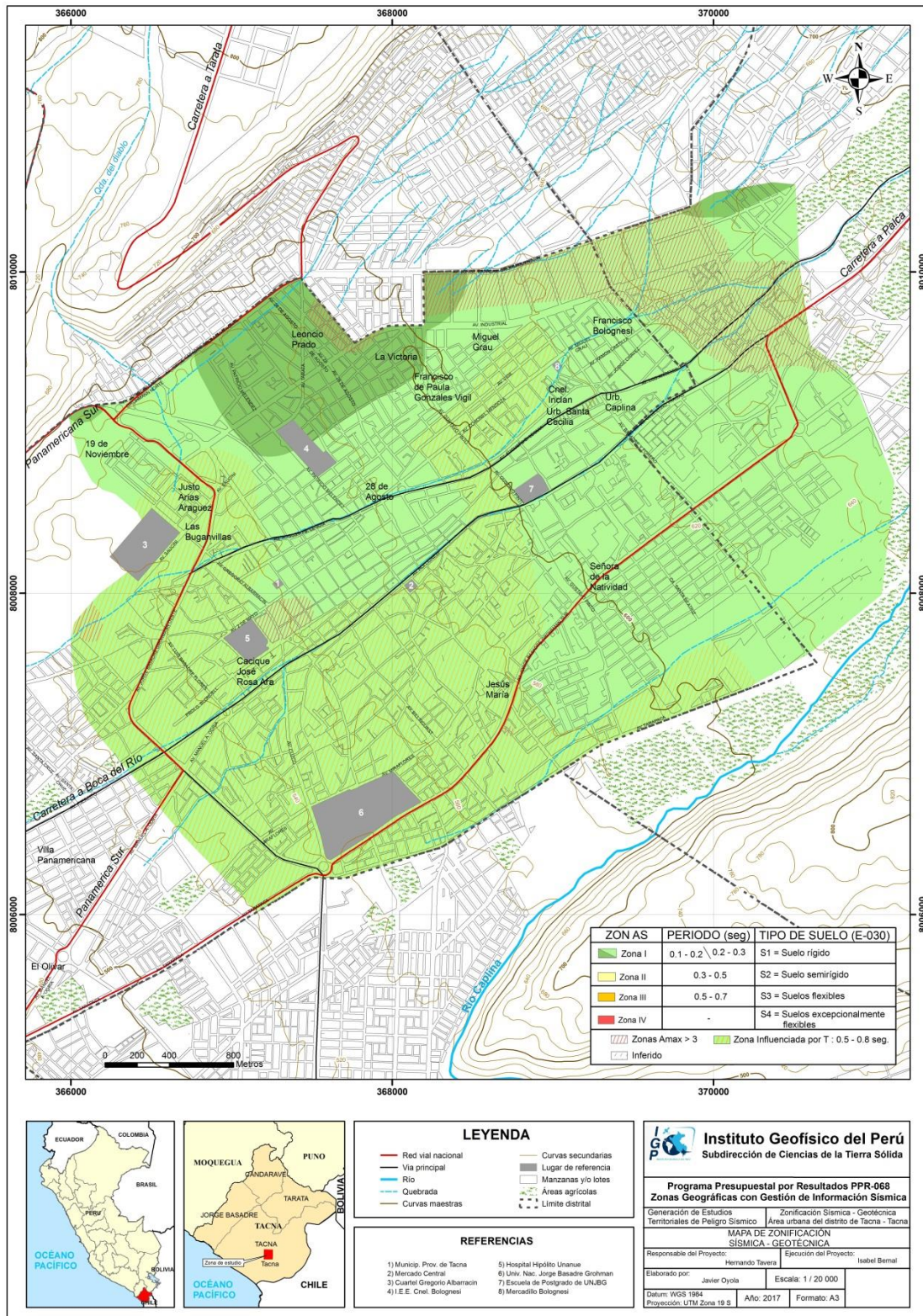


Figura 24: Mapa de Zonificación Sísmica- Geotécnica para la ciudad de Tacna.

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

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

- Los materiales que conforman el subsuelo de la ciudad de Tacna corresponden a depósitos aluviales (gravas, arenas y limos) con un espesor de 10 m. aproximadamente, y depósitos eólicos conformados por arenas. El substrato rocoso de la ciudad en mención lo constituyen rocas tipo volcánicas-sedimentarias (conglomerados polimícticos, tobas retrabajadas, areniscas y lutitas) de la Formación Millo que afloran alrededor de la zona de estudio en la unidad geomorfológica lomas.
- Los eventos geodinámicos identificados en la zona de estudio son los flujos de lodo en la quebrada “Del diablo”, que de ocurrir una precipitación excepcional, se generarían los mismos y afectarían las viviendas del casco urbano de Tacna, sector La Florida, San Antonio, avenidas principales (Av. Circunvalación, Av. Hipólito Unanue), locaciones tales como: Terminal terrestre Nacional e internacional; e inundaciones en la margen derecha del río Caplina que afectaría la infraestructura física de Tacna (Cercado).
- Se identificaron cuatro tipos de suelos en la ciudad de Tacna, entre los cuales predominan: Gravas mal graduadas (GP) en Tacna centro que abarcan el 50% de Tacna Cercado y presentan capacidad de carga admisible alta, Gravas limosas (GM) ubicadas al lado suroeste de Tacna en el sector de Santa Cruz de Para abarca el 15 % del área de estudio (Tacna), estas presentan capacidad de carga admisible muy baja; Arena limosa con gravas (SM) ubicados al suroeste en el sector de Ciudad Perdida y Asociación de Viviendas Alcides Carrión, abarcan el 20% de Tacna (Cercado) estos suelos presentan capacidad de carga muy baja y, Arena arcillosa limosa con grava (SC-SM) ubicado al noreste de Tacna (casco urbano) que abraza el 15% de Tacna (Cercado) presenta capacidad de carga admisible muy baja.
- Los suelos de Tacna responden a periodos de 0.1 y 0.3 segundos, los cuales se distribuyen de manera casi uniforme sobre todo el área de estudio. Asimismo, hacia el sur por la UNJBG, por la urbanización Justo Arias Argües, las Bugarvillas y la zona céntrica, los suelos son influenciados por periodos de 0.7 y 0.9

segundos. Hacia el extremo NO, por la urb. Leoncio Prado, los periodos tienden a valores menores muy bien definidos que fluctúan entre 0.2 segundos. Por otro lado, conforme se tiende al extremo NE, límite con los distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza, los periodos se definen en 0.3 segundos, con amplificaciones mayores que en toda el área estudiada (3 veces). Finalmente, existen áreas donde los suelos no responden a algún periodo predominante: Urb. Señora de la Natividad, por la municipalidad provincial de Tacna y por el mercado central.

- Los resultados obtenidos para la ciudad de Tacna han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de una zona sísmica correspondientes a suelos Tipo S1; es decir, suelos muy rígidos. Asimismo, se define como caso especial, al sector ubicado por el hospital Hipólito Unanue, donde sobresalen periodos de 0.1 y 0.7 con amplificaciones de hasta 4 veces, resultados que sugieren la presencia de suelos con una respuesta dinámica compleja ante la ocurrencia de sismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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 16, 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. (2006) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC", Geophysics, Vol. 24, N° 3, 438-445.
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 47(1): 74-77.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 2308-2327.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a). Are microtemors 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 microtemors records, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423 pp.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtemor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Park, C.B. (2014). MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, 32(6):656-662.

- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60–64.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves *Geophysics* 64 800-8.
- Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F. (2004). Highresolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), *J. Appl. Geophys.*, 5 56, 17–29, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.004
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Roma, V. (2010). Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16-28.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, (2006). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83, 173-193
- SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12: (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Socco, L.V., Boiero, D., Comina, C., Foti, S., y Wis\_en, R. (2008). Seismic characterization of an Alpine site. *Near Surface Geophysics*, 6(4):255-267.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64, 691–700.

## **ANEXOS**

## ANEXOS

La información que se detalla está contenida en el CD que se adjunta al presente Informe Técnico: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Tacna”.

### 1.- Información Geológica Geotécnica:

- Fichas de eventos geodinámicos
- Registros de calicatas
- Densidad de campo
- Fichas de granulometría
- Registro de posteos
- Registro de DPL
- Registro de capacidad de carga admisible
- Mapas

### 2.- Información Geofísica

- Perfiles Sísmicos (MASW)
- Secciones Geo eléctricas (ERT)
- Mapas