



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 MOQUEGUA

Lima - Perú

2018

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipion

**Autores**

Isabel Bernal

Caracterización Sísmica y Geofísica de la Ciudad de Moquegua

Juan Carlos Gómez

Caracterización Geológica y Geotécnica de la Ciudad de Moquegua

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

Equipo de Evaluación Sísmica y Geofísica: Fabiola Rosado / Henry Salas / Wilfredo Sulla Liliana Torres / Javier Oyola / Kelly Parí / Luz Arredondo / Jesús Huarachi / Jorge Salas

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Marisol Enríquez

**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 MOQUEGUA**

**Distrito de Moquegua – Provincia de Mariscal Nieto – Región  
Moquegua**

## 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 Tacna), Alto de la Alianza (distrito de Alto de la Alianza), Ciudad Nueva (distrito de Ciudad Nueva), Boca de río (distrito de Sama), Ite (distrito de Ite), Ilo, Pampa Inalámbrica (distrito de Ilo), Moquegua (distrito 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 Moquegua”, 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 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.*

## ÍNDICE

### **RESUMEN**

### ÍNDICE

#### **PARTE 1: Presentación**

##### 1.- INTRODUCCION

- 1.1. Objetivo
- 1.2. Historia
- 1.3. Accesibilidad y clima
- 1.4. Economía
  - 1.4.1. Presupuesto para la Gestión de Riesgo
- 1.5. Estudios Previos

##### 2. CONDICIONES LOCALES DE SITIO

- 2.1. La Norma Técnica E.030

##### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### **PARTE 2: Caracterización geológica y geotécnica de la ciudad de Moquegua**

#### **PARTE 3: Caracterización Sísmica de la ciudad de Moquegua**

### **BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS:** Documentos y Anexos se adjuntan en un 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 Geografías con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollo la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de las siguientes ciudades (Figura 1):

- **Tacna**, distrito de Tacna, provincia de Tacna, región de Tacna.
- **Alto de la Alianza**, distrito de Alto de la Alianza, provincia de Tacna, región Tacna.
- **Ciudad Nueva**, distrito de Ciudad Nueva, provincia de Tacna, región Tacna.
- **Boca de Rio**, distrito de Sama, provincia de Tacna, región Tacna.
- **Ite**, distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, región Tacna.
- **Ilo y Pampa Inalámbrica**, distrito de Ilo, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.
- **Moquegua**, distrito Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua.
- **Torata**, distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto región Moquegua.

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 los departamentos 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.

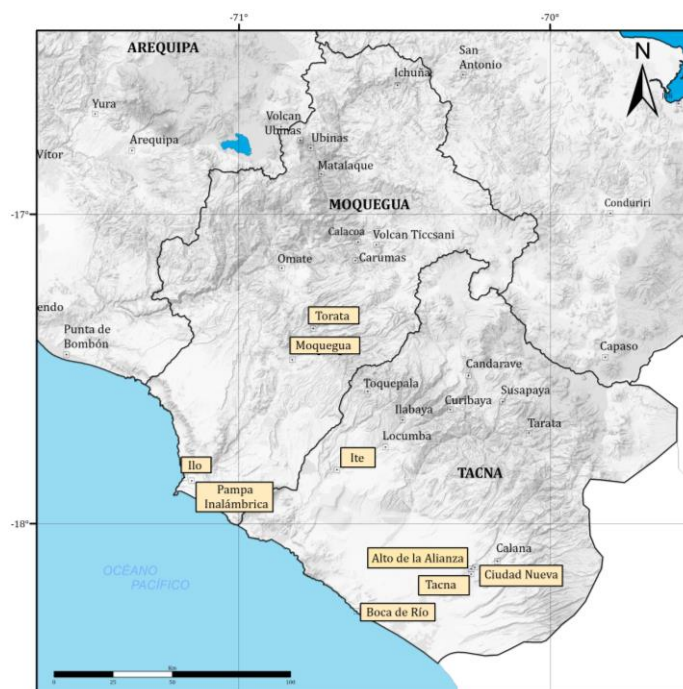


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades intervenidas durante el año 2017: Zonificación Sísmica– Geotécnica de suelos.

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 las estructuras apropiadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de la ciudad de Moquegua debe 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 Moquegua, provincia de Moquegua, región Moquegua (Figura 2); a partir de la integración de los resultados obtenidos con los métodos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo de desastres ante la ocurrencia de sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



*Figura 2: Plaza principal de la ciudad de Moquegua.*

## 1.2. Historia

Con la llegada de los españoles en 1537, en la zona, se instalaron en dos lugares a la vez, uno en la colina que domina los valles de los ríos Torata (Ocolla), Tumilaca (Tambapalla) y Osmore o Moquegua, llamado asentamiento San Sebastián de Escapagua, hoy conocido como Alto de la Villa. El otro, es la actual ciudad de Moquegua, localizada en una terraza de la margen izquierda del río Tumilaca.

Durante el periodo republicano, la ciudad de Moquegua fue creciendo urbanísticamente, destacando la construcción del primer ferrocarril entre las localidades de Ilo y Moquegua abierto en el año 1873 y destruido por los chilenos durante la guerra.

En la década del 70 y 80 se observa las tasas de crecimiento más altas (5.6% y 4.6% respectivamente), debido al desarrollo de la minería. Esta actividad marca una expectativa de trabajo, generando un flujo migratorio de trabajadores procedentes de diferentes partes del país y de la región, la cual aceleró el crecimiento urbano con la aparición de los primeros Pueblos Jóvenes y el incremento de la población de la ciudad en 8,174 habitantes.

En el año de 1990, ENACE promueve zonas para habilitación urbana en San Antonio, paralelamente se da el proceso de invasión de los terrenos alrededor de éstas. Así la población más desfavorecida socio económicamente, se ha ido consolidando en las áreas de laderas de los cerros que rodean el valle de Moquegua (Ruíz, 2004).

La ciudad de Moquegua es uno de los seis distritos que conforman la provincia Mariscal Nieto, región Moquegua, Está ubicada al sur occidental del país, a una altitud promedio de 1410 m.s.n.m., limita por el norte con los distritos de Samegua y Torata, por el sur con la provincia de Ilo, por el este con la provincia de Jorge Basadre y al oeste con la provincia General Sánchez Cerro.

La ciudad de Moquegua presenta una extensión territorial de 3949 Km<sup>2</sup>, fue creado por Ley N° 8230 en el gobierno del presidente Oscar Benavidez (Figura 3). Se encuentra situada en un valle, cuyo crecimiento poblacional en los últimos años ha sido acelerado y desordenado. Por la característica topográfica no tiene grandes áreas de terreno para la expansión urbana, y su crecimiento está dado por núcleos

independientes adecuados a la topografía existente, actualmente cuenta con una población promedio de 57 243 habitantes (INEI 2015).

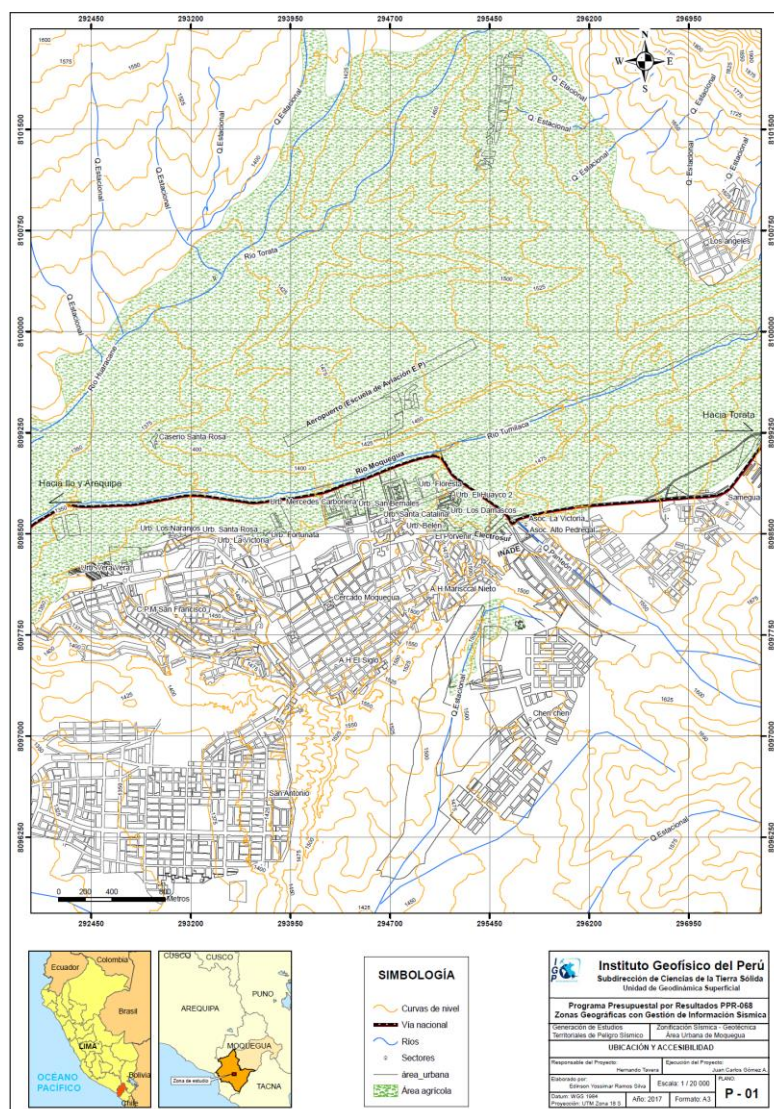


Figura 3: Mapa de ubicación geográfica de la ciudad de Moquegua.

### 1.3. Accesibilidad y Clima

El acceso desde Lima a la ciudad de Moquegua se realiza por la carretera Panamericana Sur, vía asfaltada en buen estado de conservación hasta el kilómetro 1040, donde existe un desvío de 5.5 km. hasta llegar a la municipalidad distrital de Moquegua.

Según los datos tomados de la web del servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2017), correspondiente a la estación meteorológica de Moquegua-000806, ubicada al norte de dicha ciudad (Figura 4 y Tabla 1), las

condiciones climáticas en la ciudad de Moquegua son: entre cálido, templado y soleado, con una amplitud térmica moderada, que oscila entre los 25.8°C y 11.3°C, con una temperatura media anual de 25°C, similar al clima de la región natural Yunga (sierra baja) y desierto subtropical. Las temporadas más lluviosas se presentan los meses de diciembre y marzo, alcanzando los 1.58 mm/mes. La ciudad cuenta con un nivel muy bajo de lluvias, haciéndole discurrir para la agricultura el agua a sus afluentes terrestres desde la represa de Pasto Grande.

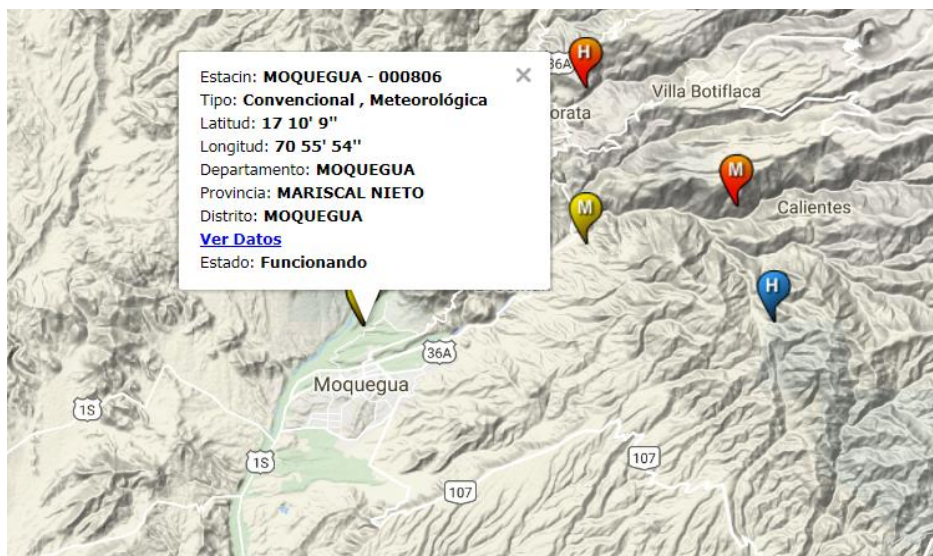


Figura 4: La Estación meteorológica de la ciudad de Moquegua.

Tabla 1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, recopiladas de la estación meteorológica Moquegua 00806. SENAMHI, 2017.

		AÑO 2017 (MESES)											
VARIABLE	ENE	FBR	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	
T°Max.Prom C°	27.07	27.64	27.56	27.18	27.17	26.77							
T°Min.Prom C°	15.23	14.6	14.43	12.04	1.98	9.5							
P. Max(mm)	8.5	0	0	0.2	0.2	0.1							
P.Min(mm)	13.4	0	0	0	0	0							
		AÑO 2016 (MESES)											
VARIABLE	ENE	FBR	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	
T°Min.Prom C°	28.86	28.73	29.13	27.64	28.2	27.26	27.11	27.67	27.7	27.52	27.89	27.25	
T°Min.Prom C°	12.99	14.84	13.89	12.49	7.19	10.14	9.84	9.57	10.42	10.82	10.66	12.57	
P. Max(mm)	0	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P.Min(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

En contraste, las temporadas más secas del año se presentan entre abril y noviembre, en las cuales durante la noche se presenta un clima frío y un viento helado; durante este periodo, la temperatura suele ser entre los 10 °C. Generalmente todos los meses del año suelen ser muy soleados durante el día y acompañados de vientos, haciéndose notar las estaciones frías durante la noche.

## 1.4. Economía

La ciudad de Moquegua, presenta dos actividades que son la base económica del lugar, la agricultura y el correspondiente al sector comercio como el más importante (INEI, 2007). La localidad presenta una PEA (Población Económicamente Activa) de 22679 pobladores, constituyendo el 44% de la población total (49419 habitantes) (Tabla 2).

Tabla 2: PEA por actividad económica 2007 en la ciudad de Moquegua.

RAMAS DE ACTIVIDAD ECONÓMICA	TOTAL PEA		CATEGORIA DE OCUPACION											
			EMPLEADO		OBRERO		TRABAJADOR INDEPENDIENTE		EMPLEADOR O PATRONO		TRABAJADOR FAMILIAR NO REMUNERADO		TRABAJADOR DEL HOGAR	
			ABS	%	ABS	%	ABS	%	ABS	%	ABS	%	ABS	%
<b>TOTAL</b>	<b>22679</b>	<b>100</b>	<b>8132</b>	<b>100</b>	<b>5537</b>	<b>100</b>	<b>7181</b>	<b>100</b>	<b>446</b>	<b>100</b>	<b>932</b>	<b>100</b>	<b>451</b>	<b>100</b>
<b>SECTOR PRIMARIO</b>	<b>3156</b>	<b>13.91</b>	<b>112</b>	<b>1.38</b>	<b>1400</b>	<b>25.28</b>	<b>1126</b>	<b>15.68</b>	<b>103</b>	<b>23.09</b>	<b>415</b>	<b>44.53</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	2897	12.77	49	0.6	1223	22.09	1114	15.51	96	21.52	415	44.53	0	0
Pesca	14	0.06	3	0.04	3	0.05	7	0.1	1	0.22	0	0	0	0
Explotación de minas y canteras	245	1.08	60	0.74	174	3.14	5	0.07	6	1.35	0	0	0	0
<b>SECTOR SECUNDARIO</b>	<b>3513</b>	<b>15.48</b>	<b>374</b>	<b>4.61</b>	<b>2243</b>	<b>40.51</b>	<b>808</b>	<b>11.26</b>	<b>64</b>	<b>14.35</b>	<b>24</b>	<b>2.58</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Industrias manufactureras	874	3.85	64	0.79	292	5.27	458	6.38	41	9.19	19	2.04	0	0
Electricidad, gas y agua	96	0.42	55	0.68	37	0.67	4	0.06	0	0	0	0	0	0
Construcción	2543	11.21	255	3.14	1914	34.57	346	4.82	23	5.16	5	0.54	0	0
<b>SECTOR TERCIARIO</b>	<b>16010</b>	<b>70.6</b>	<b>7646</b>	<b>94.03</b>	<b>1894</b>	<b>34.2</b>	<b>5247</b>	<b>73.07</b>	<b>279</b>	<b>62.56</b>	<b>493</b>	<b>52.9</b>	<b>451</b>	<b>100</b>
Comercio	4154	18.32	583	7.17	225	4.06	2881	40.12	135	30.27	330	35.41	0	0
Servicios	10786	47.56	6599	81.15	1329	24	2167	30.18	126	28.25	114	12.23	451	100
Actividad económica no especificada	1070	4.72	464	5.71	340	6.14	199	2.77	18	4.04	49	5.26	0	0

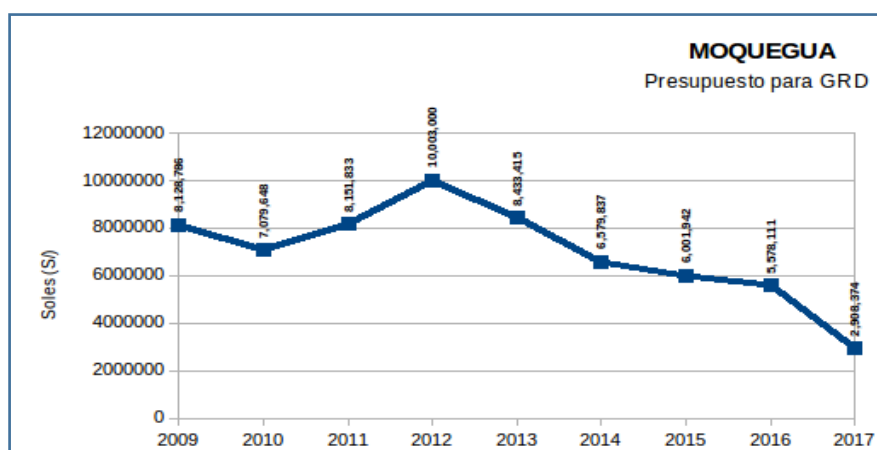
En la Tabla 2 se observa que la PEA de la ciudad de Moquegua, tiene una mayor proporción de comerciantes con un 20%, siendo el segundo lugar para los agricultores con el 13%.

### 1.4.1. Presupuesto para la Gestión de Riesgo

La tercera disposición complementaria de la Ley 30282, de equilibrio financiero de presupuesto del sector público, autoriza en forma excepcional, a los gobiernos regionales y locales en las zonas declaradas en estado de emergencia, a utilizar hasta el 5% de los recursos provenientes del canon, sobre-canon y regalía minera, para financiar actividades destinadas a la atención de desastres. Con esta finalidad, para el año 2017 la localidad disponía aproximadamente de S/. 3,000,000.00 para afrontar las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de eventos de origen natural como los flujos aluvionales o inundaciones. En este

sentido, se estimó la disponibilidad de presupuesto para la gestión del riesgo de la localidad en el periodo 2009 – 2017 (Tabla 3).

Tabla 3: Presupuesto anual para la gestión del riesgo de desastres, periodo 2009 - 2017. Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto.



## 1.5. Estudios previos

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

- Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua (CISMID, 2015). Considera estudios geotécnicos realizados en distintos sectores de expansión urbana y en el centro histórico de la ciudad de Moquegua. Los resultados permiten clasificar los suelos en dos zonas: La Zona I está constituida por material de relleno de gravas limosas y arenas medianamente compactas hasta 2 m. de profundidad, luego pasan a gravas limosas y arenosas (GP-GM) compactas y ubicadas en la zona de consolidación de la ciudad; presentan una capacidad portante a 1 m. de profundidad de 1.2 kg/cm<sup>2</sup> y 2 kg/cm<sup>2</sup>. En la Zona II presenta pendientes bajas entre 3° y 7°, conformados por gravas en matriz arenosa y limosa (GP-GM) de compacidad media a suelta, siendo su capacidad portante a 1m de profundidad de 1.2 a 1.7 Kg/cm<sup>2</sup>, no se debe construir en estas zonas de rellenos porque son materiales inconsolidados.

- Estudio Geológico Económico de las Rocas y Minerales Industriales en las Regiones de Moquegua y Tacna (INGEMMET, 2011): indican que la ciudad de Moquegua presenta suelos de la Formación Sotillo (areniscas finas y conglomerádicas principalmente rojizas) y la Formación Moquegua, esta última dividida según su litología en dos miembros: inferior (areniscas arcillosas de coloración rojiza) y superior (arenas conglomerádicas); además de los depósitos cuaternarios compuestos de aluviales representados por terrazas fluviales, conos de deyección y acumulación de gravas, arenas y arcillas que se encuentran en el lecho de los ríos.
  
- Artículo “The southern región of Perú eartquake of June 23rd, 2001 (Tavera et al, 2001): se indica que debido a este terremoto, la ciudad de Moquegua soporto intensidades máximas de 6+ MSK en las Urbanizaciones El Siglo, San Francisco, José Olaya, Virgen de las Mercedes, Ramiro Priale y las Pampas de San Antonio; todos establecidos sobre suelos conformados con limos, arcillas y arenas.
  
- Estudio Hidrogeológico del valle de Moquegua – Ilo (INRENA, 2004) se realizaron estudios con el método eléctrico SEV (Sondaje Eléctrico Vertical) a fin de evaluar el estado actual de los recursos hídricos subterráneos en el valle Moquegua – Ilo. Los resultados muestran la presencia en superficie de un primer horizonte en estado seco con espesores entre 1 a 8 metros. El segundo horizonte se encuentra conformado por dos subhorizontes (emplazado en el tramo superior del río Moquegua), la superior con espesor de 10 a 30 m. y permeabilidad media – alta (50 – 112 Ohm.m); subyaciendo, el inferior considerado como subhorizonte saturado con espesor variable entre 10 a 25 m. y de permeabilidad media (40 – 50 Ohm.m). Finalmente, el basamento de gran potencia, pero en estado seco, está constituido también por 02 subhorizontes, el superior de gran espesor (hasta 260 m.) pero con resistividades muy bajas (7 – 10 Ohm.m) representando al basamento arcilloso impermeable. Subyaciendo se ubica el inferior con resistividades mayores de 1000 Ohm.m que representa al basamento impermeable rocoso.
  
- Análisis de riesgo Sísmico de la Ciudad de Moquegua, (CISMID 203): Con datos de microtemores manifiestan que los suelos de Moquegua responden tanto a periodos cortos < 0.4 s, y periodos intermedios entre 0.4 a 1.5s.

Asimismo, indican que, de ocurrir un sismo, los mayores daños estarían ubicados en el C.P.M San Francisco y el Cercado.

- Estudio de Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua, (convenio UNI/FIC/CISMID – CONCYTEC, 202): se realizó en áreas de expansión urbana, destinada a la reubicación de los damnificados a causa del terremoto del 23 de junio del 2001. Según los ensayos geotécnicos y sísmicos, se definieron cuatro zonas geotécnicas: la Zona 1 corresponde al cercado, Zona 2 a las Pampas de Chen Chen, la Zona 3 a las asociaciones de San Antonio, el Siglo, Mariscal Nieto y la Quebrada Pedregal y la zona 4, abarca las asociaciones de San Francisco con una topografía accidentada. Las zonas presentarían una capacidad de carga admisible entre 1.7 a 0.6 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo los más bajos ubicados en la zona 3 y 4. Asimismo, se identificó suelos con periodos dominantes entre 0.1 a 1.5 seg., siendo los más altos en las zonas 2 y 3. Indican también, la presencia de suelos arcillosos con alto potencial de expansión (18%) y suelos arenosos con ligero potencial de colapso. Estos resultados fueron utilizados en el Plan Director Moquegua – Samegua 2003-2010.
  
- En el 2001, UNSA – INDECI, “Evaluación de Peligros de la Ciudad de Moquegua”: estudios realizados como parte del Proyecto general de Ciudades Sostenibles para el Desarrollo. En este estudio se ha aplicado métodos geofísicos (Refracción Sísmica y Sondaje Eléctrico Vertical “SEV”) y geotécnicos. El método de refracción sísmica sugiere suelos poco consolidados en superficie con velocidad  $V_p$  entre 136 a 465 m/s y espesores menores a 3 metros; en las Pampas de Chen Chen se identificó suelos con bajas velocidades y en la Urb. San Antonio las más altas. En profundidad suelos más competentes presentan  $V_p$  que alcanzan los 2400 m/s, encontrándose hasta profundidades entre 18 a 30 metros. De acuerdo al método de SEV, los 2 o 3 primeros horizontes geoelectricos están compuestos por depósitos aluviales y fluviales de material areno gravoso con resistividades entre 26 a 880 ohm.m y espesores de hasta 28 metros; por debajo los suelos presentan resistividades menores de 30 ohm.m, conformados por depósitos arcillosos. Los resultados de geotecnia sugieren que los depósitos aluviales presentan mejores condiciones como material de cimentación, seguido de materiales que corresponden a la formación

Moquegua superior compuesto de conglomerados cementados y finalmente, los materiales arcillosos de la formación Moquegua inferior.

- Geología de los cuadrángulos de Moquegua 35u Martínez y Zuloaga (1979): la interpretación tectónica y estratigráfica, de los más importantes episodios sucedidos durante el Mesozoico y Cenozoico permiten identificar la presencia de cinco unidades geomorfológicas regionales o unidades morfoestructurales: Planicies Costaneras, estribaciones de la Cordillera Occidental.

## 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 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 del sacudimiento sísmico 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.

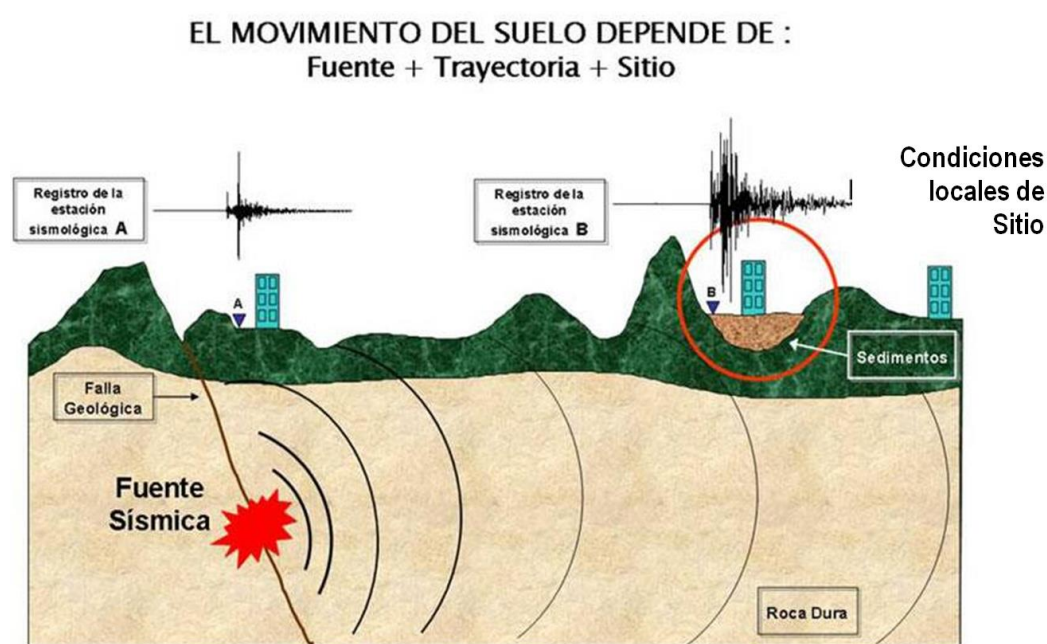


Figura 5: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

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 dato 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 físicas, 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 4).

- **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.

Tabla 4: Clasificación de los perfiles de suelo según la norma E.030

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

- **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).

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). En tal sentido y de acuerdo a los estudios realizados, se establece la existencia de 5 zonas cuyas características son:

**ZONA I:** Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s, 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 V:** Zona constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

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

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### **Conclusiones**

Para la ciudad de Moquegua se ha identificado, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procesamiento establecido en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de dos zonas correspondientes a suelos Tipo S1 y S4 (Figura 6).

- **ZONA I:** Conformada por los suelos más consolidados de la ciudad. Están constituidos por estratos de grava aluvial desde el nivel superficial y en algunos sectores cubiertos de arenas de poco espesor. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 250 m/s en la capa más superficial y 780 m/s a profundidad de hasta 30 metros, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos; tienen un comportamiento rígido y es considerado como suelos Tipo S1 según la norma sismorresistente peruana; además, presenta suelos con capacidad admisible mayor a 3.0 Kg/cm<sup>2</sup>. Esta zona comprende gran parte del área céntrica de Moquegua (Plaza de Armas, A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto), hacia el sur el área urbana central del C.P. San Antonio y hacia el este parte del C.P. Chen Chen.

En la Figura 6, las líneas inclinadas en naranja, delimitan suelos que muestran sensibilidad a un segundo rango de periodos (0.6 a 1.0 seg.) pero con mínimas amplificaciones. Estos suelos se encuentran en el cercado de Moquegua (estadio Municipal) y en el sector sur del C.P. San Antonio (pampa San Antonio), siendo rígido en profundidad al estar constituido por material areno limoso que aflora principalmente en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio.

Las líneas inclinadas en negro (ver Figura 6) delimitan áreas de muy baja amplificación y corresponden a los sectores ubicados en el cercado de Moquegua, en el C.P. San Antonio y en el C.P. Chen Chen. Aquí los suelos superficiales muestran mayor consistencia y por lo tanto menor el sacudimiento durante la ocurrencia de un evento sísmico menor.

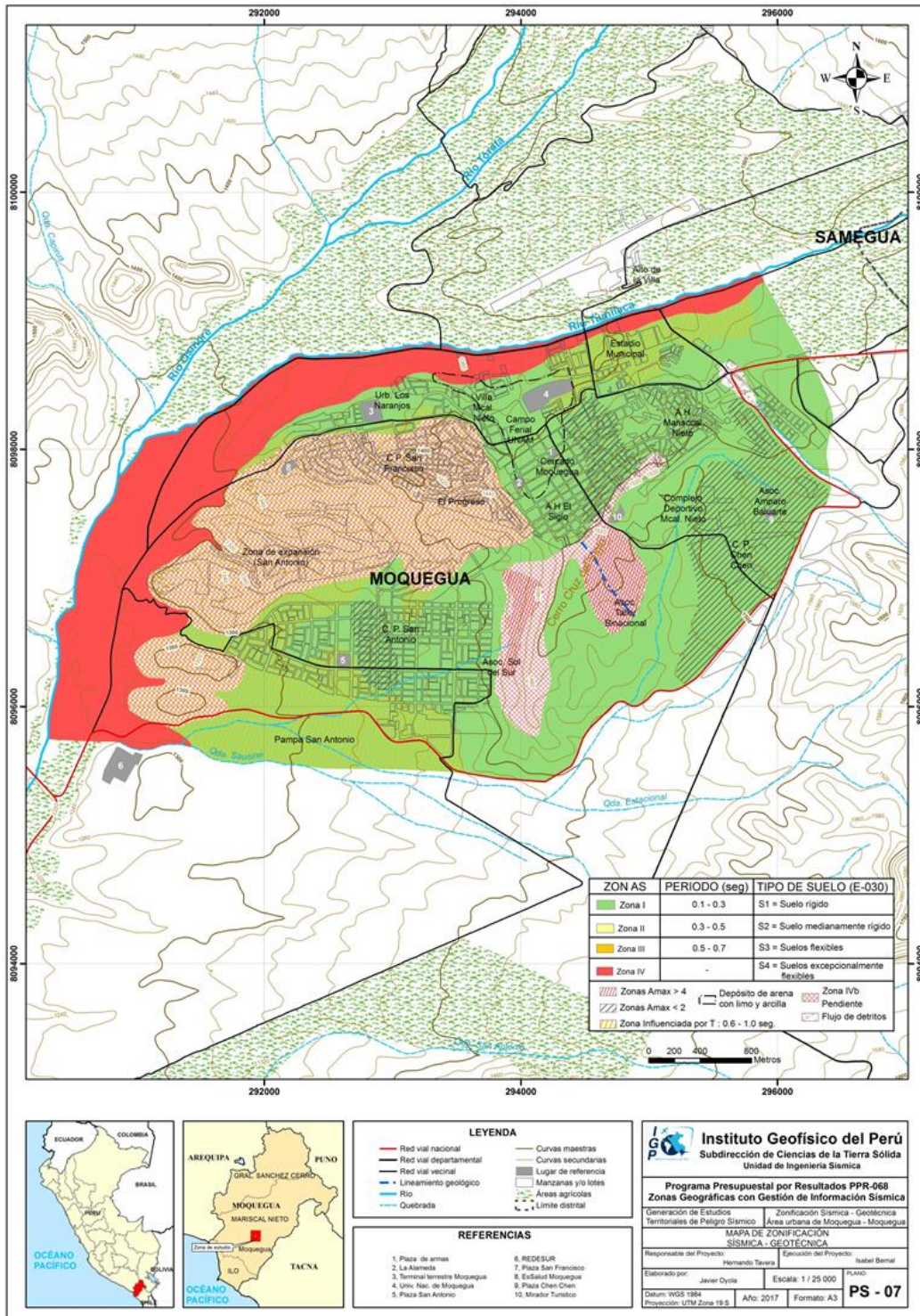


Figura 6: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Moquegua.

En la Figura 6, la línea negra punteada ubicada entre el campo ferial UNAM y Villa Mariscal Nieto (cercado de Moquegua), indica que los suelos se encuentran constituidos por depósitos de arenas con limos y arcillas.

**-ZONA IV:** Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales, por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4 de la norma sismoresistente peruana. Para realizar una mejor zonificación, se ha visto por conveniente subdividir en dos zonas con características específicas.

**-Zona IVa:** Constituida por depósitos fluviales y aluviales con alto contenido de humedad y en algunos sectores, cubiertos por limos (áreas de cultivo); se encuentran emplazados próximo al río Tumilaca. Esta zona se extiende desde el Estadio Municipal (franja delgada) hacia el extremo suroeste abarcando mayor área (sector de cultivo, carretera interoceánica sur). Esta zona presenta baja capacidad de carga admisible ( $0.68 \text{ Kg/cm}^2$ ); y por lo tanto, puede generarse procesos geodinámicos externos como inundaciones, procesos de licuación y mayores sacudimientos del suelo durante la ocurrencia de un evento sísmico.

**- Zona IVb:** Corresponde a zonas de topografía irregular, donde puede generarse caída de rocas y flujos de detritos. Abarca el área urbana del C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, donde los suelos; además de presentar una topografía accidentada, responden en dos rangos de periodo de vibración (0.1 a 0.3 segundos y 0.6 a 1.0 segundos.), con amplificaciones relativas de hasta 3 veces. Asimismo, presenta capacidad de carga admisible muy baja siendo el valor de  $0.31 \text{ Kg/cm}^2$  para el C.P. San Francisco y  $0.91 \text{ Kg/cm}^2$  para la zona de expansión de San Antonio.

### **Recomendaciones**

- Tener en cuenta la presencia de limos inorgánicos hasta profundidades de 1.10 m, seguidos de una grava pobremente graduada con mezcla de gravas limosas y nivel freático a 2.60 m, que conforman los suelos en los sectores cercanos al Poder Judicial de Moquegua. Para construcciones futuras, pueden presentar procesos de licuación de suelos.
  
- Proyectar medidas de mitigación estructural ante caída de rocas, flujos de detritos e inundaciones en la totalidad de la ciudad de Moquegua.
  
- Evitar la construcción de casas en los lechos de las quebradas estacionales como Sausine; en las quebradas estacionales de Chen Chen y la quebrada El Panteón etc.
  
- Evitar la construcción de casas en las laderas de las Lomas por ser zonas potenciales ante caída de rocas o flujos de detritos.
  
- Al momento de construir viviendas, cimentar de acuerdo a resultados que se obtengan de estudios técnicos que permitan conocer el tipo de suelos y la profundidad requerida, según la capacidad admisible de los suelos o realizar un mejoramiento de estos, si fuera necesario.

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

## CONTENIDO

### 1. METODOLOGÍA

#### 1.1. Base Topográfica

### 2. GEOMORFOLOGÍA

#### 2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

#### 2.2. Pendiente

##### 2.2.1. Clasificación del grado de pendientes

#### 2.3. Unidades geomorfológicas

##### 2.3.1. Torrenteras

##### 2.3.2. Lecho fluvial

##### 2.3.3. Terraza fluvio aluvial 1

##### 2.3.4. Terraza fluvio aluvial 2

##### 2.3.5. Terraza aluvial 1

##### 2.3.6. Terraza aluvial 2

##### 2.3.7. Terraza aluvial 3

##### 2.3.8. Colina

##### 2.3.9. Loma

##### 2.3.10. Montaña

### 3. GEOLOGÍA

#### 3.1. Geología regional

##### 3.1.1. Geología histórica

##### 3.1.2. Geología Estructural

#### 3.2. Geología local

##### 3.2.1. Mesozoico

##### 3.2.2. Cenozoico

##### 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

## 5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

- 5.1. Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D 420)
  - 5.1.1.- Descripción de calicatas
- 5.2. Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556)
- 5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D 1452)
- 5.4. Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094)
  - 5.4.1. Correlación entre el “N” DPL y el “N” SPT (ASTM D1586)
  - 5.4.2. Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del  $N_{SPT}$
- 5.5. Clasificación SUCS
- 5.6. Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)
- 5.7. Capacidad de carga admisible
  - 5.7.1. Carga última
  - 5.7.2. Capacidad de carga admisible muy baja
  - 5.7.3. Capacidad de carga admisible baja
  - 5.7.4. Capacidad de carga admisible alta

## 1. METODOLOGÍA

El estudio geológico y geotécnico en la ciudad de Moquegua, se desarrolló en tres fases:

- ✓ **Gabinete I:** Recopilación y revisión de imágenes satelitales georeferenciadas mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), con la finalidad de delimitar la zona estudio; así como la recopilación de información geológica regional y local existente (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
- ✓ **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:20,000 sobre los cuales se identificaron y delimitaron los eventos geodinámicos de la zona: áreas potencialmente susceptibles a la ocurrencia de flujo de detritos, caídas de rocas e inundaciones cuando los ríos se reactivan en tiempos de precipitaciones pluviales.
- ✓ **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos:
  - Elaboración de 9 calicatas hasta profundidades de 3 m., todas distribuidas en el centro urbano de la ciudad de Moquegua y zonas de expansión urbana.
  - Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) a fin de determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados. En total se realizaron 14 DPL.
  - Ejecución de auscultaciones haciendo uso de una posteadora: en puntos intermedios a la ubicación de las calicatas más próximas. En el área de estudio se llevaron a cabo 10 posteos.
- ✓ **Laboratorio:** Procesamiento de las muestras de suelos, mediante ensayos de mecánica de suelos: granulometría (clasificación SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad de carga admisible).
- ✓ **Gabinete II:** Elaboración del informe técnico.

## 1.1. Base Topográfica

La topografía se obtuvo a partir de un levantamiento fotogramétrico realizado en la ciudad de Moquegua sobre un área de 6.87 km<sup>2</sup> y en San Antonio abarcando 1.77 km<sup>2</sup>. Para la ejecución del levantamiento, se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (VANT), servicio que fue contratado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a una consultora particular. Como resultado se obtuvo un plano topográfico a escala 1:5000 que contiene curvas de nivel (líneas que unen puntos con igual altitud) con resolución espacial cada 5 m. (Figura 1).

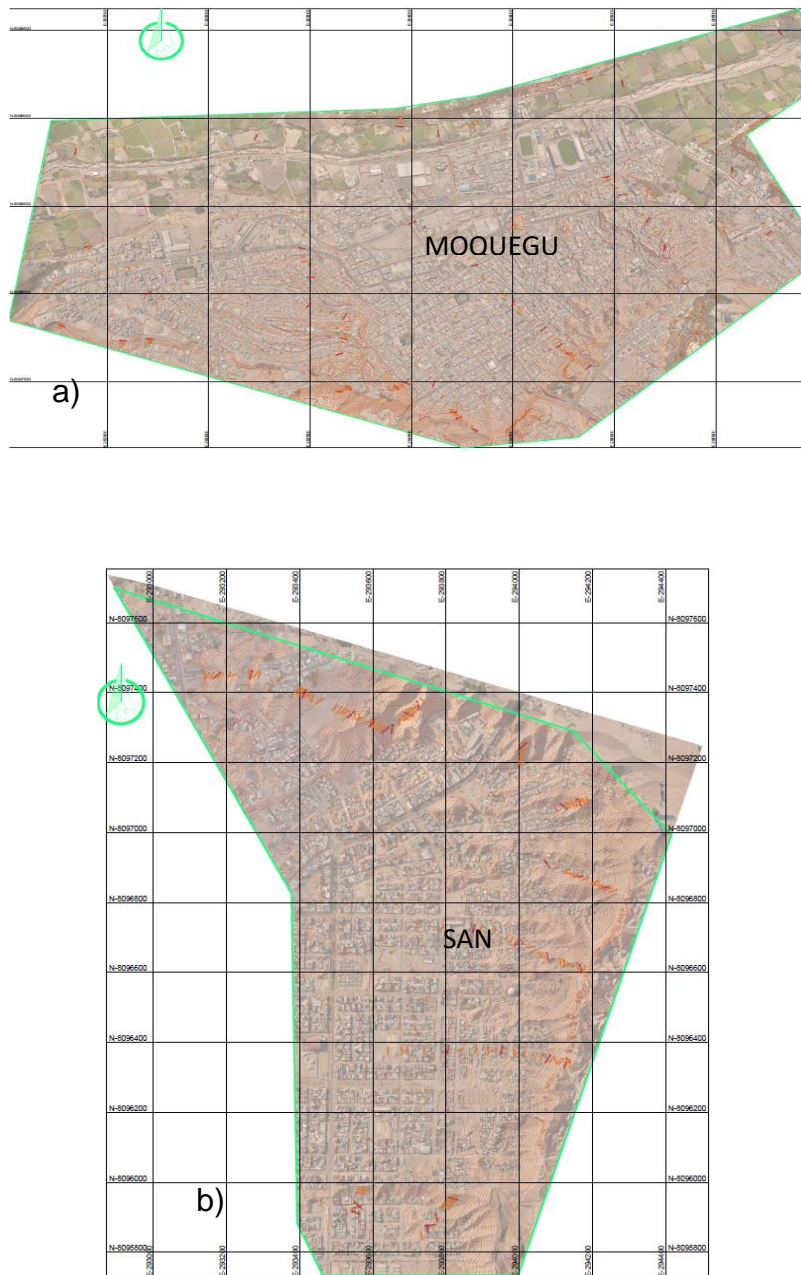


Figura 1: Ortofotos a) Ciudad de Moquegua b) San Antonio, generada con fotogrametría a partir de un VANT.

## 2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas de relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan; el 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 y que se agrupan en la cadena 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 todos los tipos de formas de relieve independientemente de su origen y dimensión (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990).

En este estudio se describen las características físicas de las geoformas existente en la ciudad de Moquegua, en relación a su origen. Previamente, en base al levantamiento topográfico realizado y mediante herramientas computacionales (SIG) se han elaborado los planos: Modelo Digital del Terreno (MDT) y pendientes con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno (geoformas); las mismas que fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo.

### 2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

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

Para la elaboración del MDT de la ciudad de Moquegua, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel diseñadas anteriormente y obteniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno sobre un área de 35.4 km<sup>2</sup> (Figura 2).

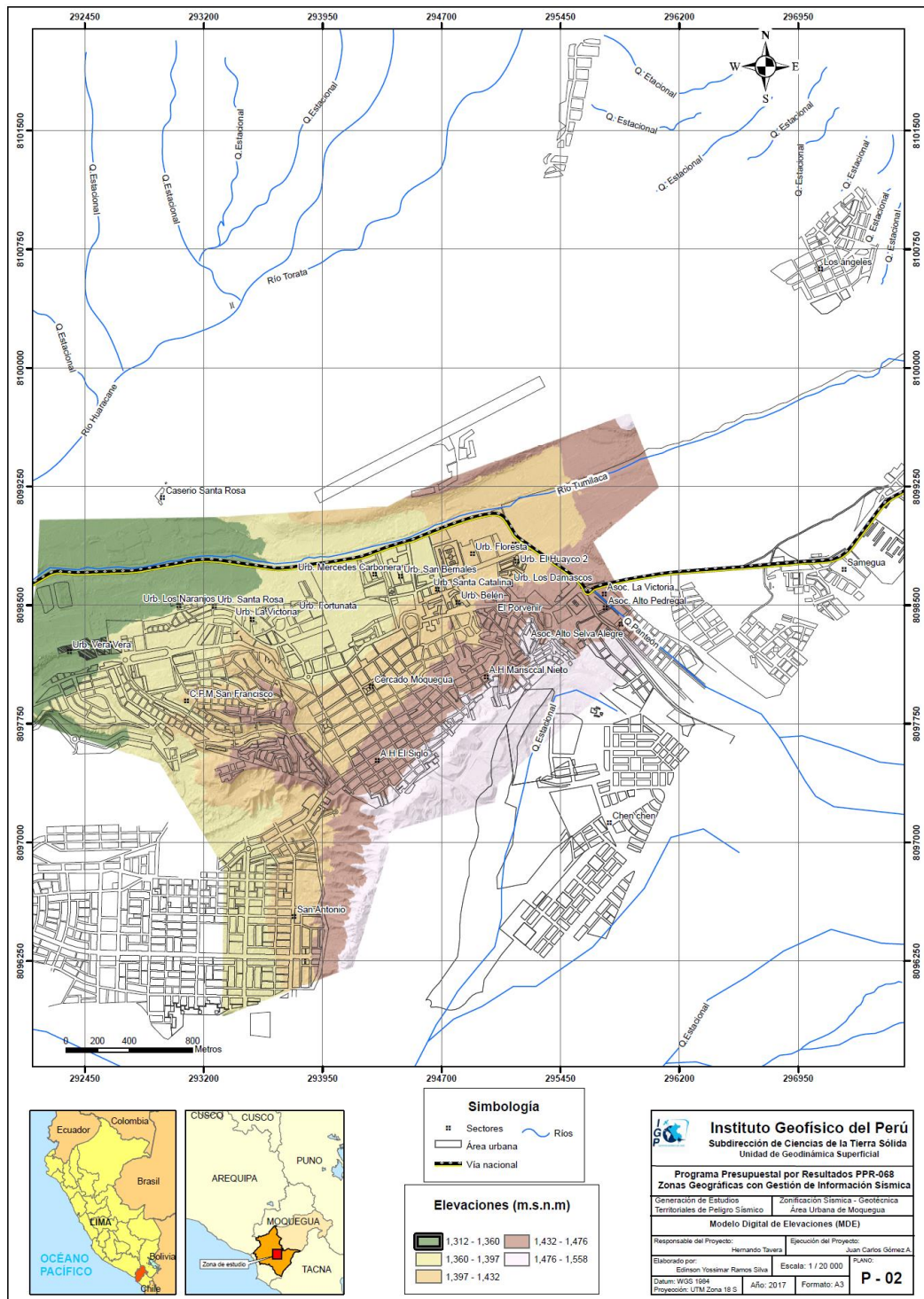


Figura 2: Mapa de modelo digital del terreno de la ciudad de Moquegua.

En base al MDT de la ciudad de Moquegua, se ha reconocido que la parte baja del área urbana se asienta sobre una terraza aluvial que presenta un rango de cotas entre 1350 y 1635 m.s.n.m.; mientras que, las parte altas del área estudiada se asienta sobre lomas con elevaciones entre 1377 y 1570 m.s.n.m.

## 2.2. Pendiente

Es el ángulo que se expresa en grados o porcentajes. 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 diseño de mapa de pendientes de la ciudad de Moquegua (Figura 3), fue desarrollado a partir del MDT haciendo uso de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc.) con el objetivo de diferenciar gráficamente los ángulos de inclinación del relieve en el área de estudio.

### 2.2.1. Clasificación del grado de pendientes

Para la clasificación de los rangos de pendientes se usó como base el informe “Estudio de riesgos geológicos del Perú – (Fidel et al., 2006), ver Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de pendientes del terreno (Fidel et al, 2006)

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

La ciudad de Moquegua se encuentra asentada sobre terrazas aluviales que presentan pendientes entre 9° y 21° promedios y lomas con pendientes comprendidas entre los de 21° a 36°.

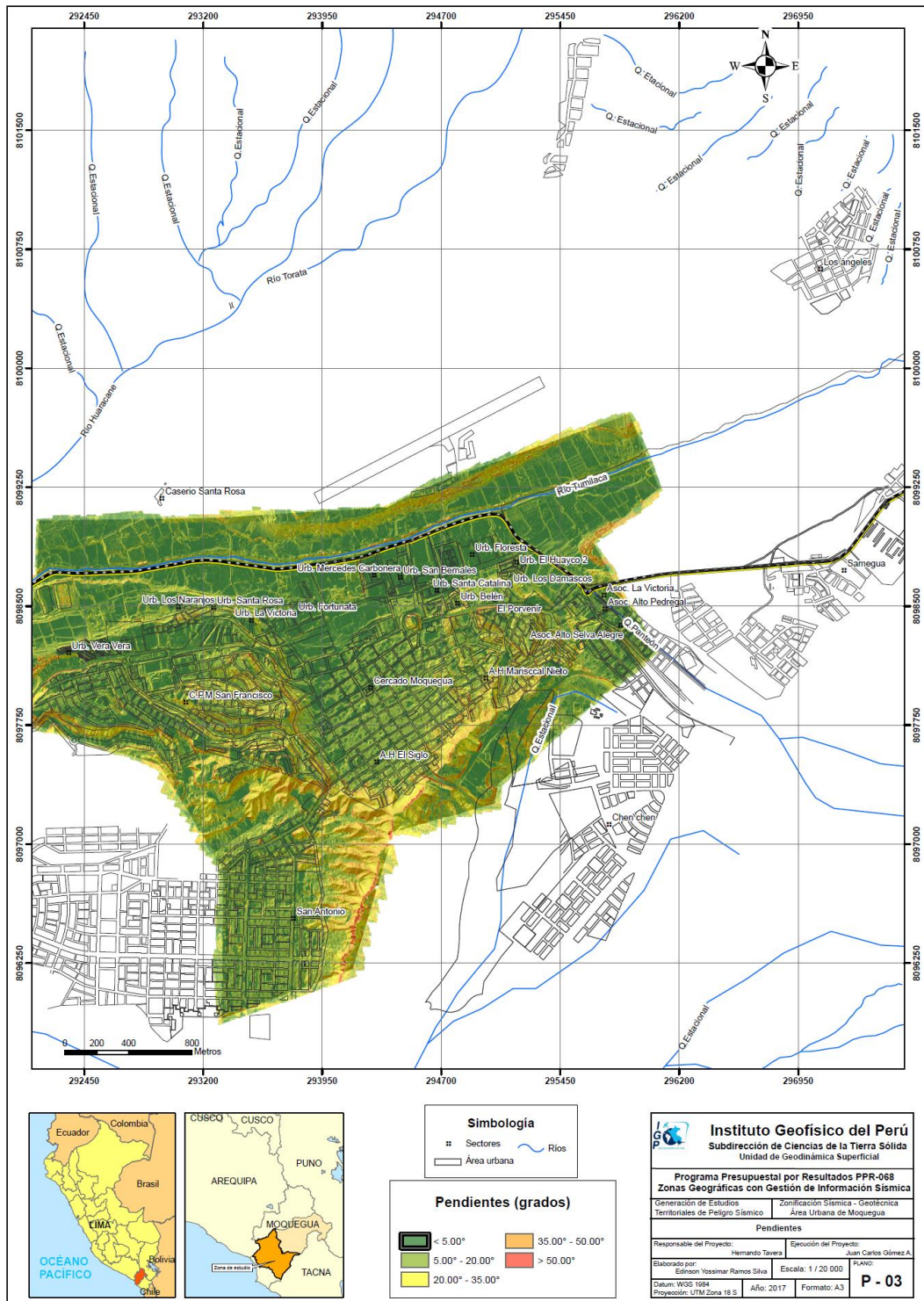


Figura 3: Mapa de pendientes del terreno de la ciudad de Moquegua.

### 2.3. Unidades geomorfológicas

Estas unidades son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno (procesos internos) y exógenos (procesos externos) formando relieves positivos y negativos.

**Características físicas:** Las características físicas del relieve, expresa una combinación de parámetros como: pendiente, altura, geometría y drenaje (modificado de Pike et al, 2009). Estos parámetros son directamente accesibles a la percepción visual proximal o distal, sea humana o instrumental.

**Procesos:** Los agentes modeladores como el agua, el viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos tales como: intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación generando diferentes geoformas que se clasifican de acuerdo a su origen en depositacional y denudacional (erosional). Otros procesos internos como el magmatismo, tectonismo, entre otros, generan geoformas de origen estructural.

En base a las características físicas de las geoformas y su origen, para la ciudad Moquegua se cartografiaron seis unidades: torrenteras, lecho fluvial, terraza aluvial, terraza fluvial, colinas, lomas y montañas (Tabla 2 y Figura 4).

Tabla 2: Geoformas para la ciudad de Moquegua en base a sus características físicas y origen.

GEOMORFOLOGÍA PATRÓN			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		PROCESO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Pendiente	<5°	denudacional	Loma
	5°-20°		
	20°-35°		
	35°-50°		
	>50°		Colina
Altura	0-100=otros, >500=montañas		lecho fluvial
	<100 =colina, >300=loma		
Geometría	redondeada, alargadas	depositacional	terrazza aluvial
	otros		terrazza fluvial
	rectangular, dendritico	estructural	Montañas
	radial, paraleo, enrejado etc		

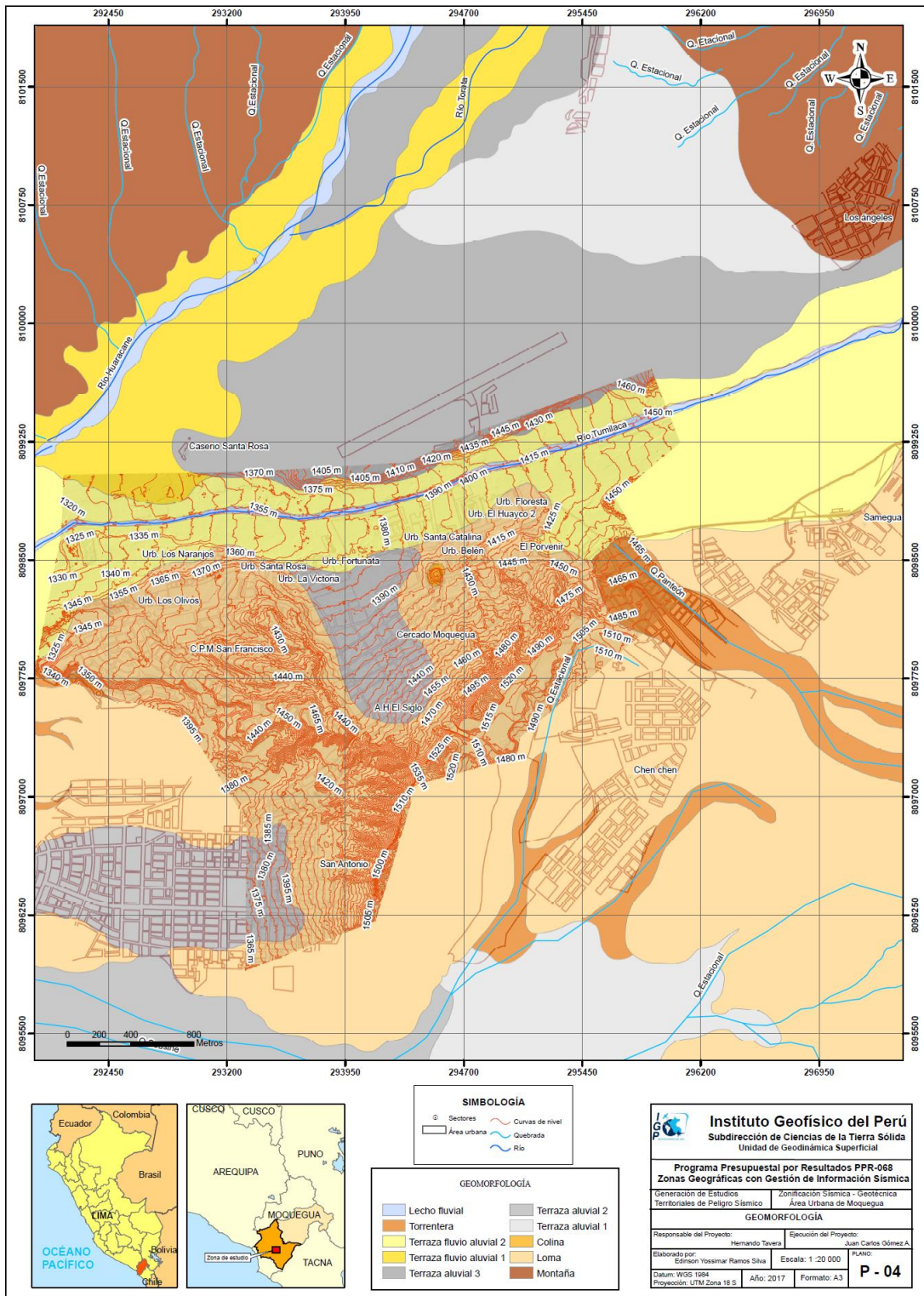


Figura 4: Mapa geomorfológico de la ciudad de Moquegua.

### 2.3.1. Torrenteras

Es el cauce diseñado por un torrente temporal; es decir se generan cuando pasan flujos de aguas en épocas de tormentas fuertes erosionando y diseñando las laderas, siendo mayor la erosión en rocas no competentes.

La forma de las torrenteras está en función del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el suelo; es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte. Estos suelos abarcan el 4% de la zona estudiada (Figura 5).



Figura 5: Invasión de cauces estacionales conocidos como torrenteras que se desarrollan en inmediaciones del Sector San Francisco.

### 2.3.2. Lecho Fluvial

Es el canal excavado por el flujo de agua de un río y los sedimentos que este transporta durante todo su desarrollo y evolución. La morfología del lecho depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato rocoso; es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte. El lecho fluvial del río Tumilaca tiene una dirección noreste hasta unirse con el río Huaracane y Torata para formar al río Moquegua y seguir con dirección hacia el suroeste hasta desembocar al océano Pacífico. El ancho promedio del cauce llega a medir 40 m aproximadamente, en donde se han depositado gran cantidad de materiales de origen fluvial (gravas y arenas medias a gruesas). Los lechos aluviales se encuentran sobre el 3% de la zona de estudio (Figura 6).



Figura 6: Lecho fluvial del río Moquegua, Puente el Rayo al noreste de Moquegua.

### 2.3.3. Terraza fluvio aluvial 1

Se caracteriza por presentar superficies subhorizontales a semionduladas sobre relieve que presentan pendientes menores a  $5^\circ$ . Están conformadas por clastos y gravas redondeadas a subredondeados, de origen volcánico e intrusivo de 5 a 25 cm de diámetro, presentando en mayor porcentaje matriz arenosa fina. Estos materiales han sido transportados por la dinámica del río Huaracane y quebradas aledañas. Sobre esta terraza se encuentra el 3% de parcelas. La unidad comprende el 8% del área estudiada.

### 2.3.4. Terraza fluvio aluvial 2

Se caracteriza también por presentar una superficie ondulada, con relieves de pendientes entre  $5^\circ$  y  $20^\circ$ . Están conformada por clastos y gravas redondeadas a subredondeados de origen volcánico e intrusivo de 12 a 25 cm de diámetro, presentan mayor porcentaje de matriz arenosa que finos. Estos materiales han sido transportados por la dinámica del río Tumilaca, el cual cambia de nombre en el sector a río Moquegua. Sobre esta terraza se encuentra el 50% de parcelas de la población y también el aeropuerto de dicha ciudad. La unidad comprende el 12% del área estudiada (Figura 7).



Figura 7: Lecho fluvial y Terraza fluvio-aluvial del río Moquegua, Puente el Rayo al noreste de Moquegua.

### 2.3.5. Terraza aluvial 1

Se caracteriza por presentar superficies más onduladas, presentes en la parte baja de la montaña del sector los Ángeles y también a 750 m al suroeste del sector de Chen Chen, Esta geoforma presenta relieves con pendientes comprendidas entre 2° y 16°. Está conformada por clastos y gravas redondeadas a subredondeados de origen volcánico e intrusivo con 5 a 10 cm de diámetro, presenta mayor porcentaje de matriz arenosa que finos. Estos materiales han sido transportados por la dinámica del río Huaracane y quebradas aledañas. Sobre esta terraza se encuentran pequeñas parcelas. La unidad comprende el 10% del área estudiada (Figura 8).



Figura 8: Terraza aluvial 1, presenta clastos subredondeados a angulosos de 1 cm a 15 cm de diámetro, se ubica en el margen derecho de la quebrada estacional al sur del Sector Chen Chen.

### 2.3.6. Terraza aluvial 2

Se caracteriza por presentar superficies más onduladas y escalonada con relieves que alcanzan pendientes menores a 9°. Están conformadas por clastos y gravas subangulosas a subredondeadas menores a 10 cm de diámetro, con mayor matriz areno limosa tobácea. Son de origen volcánico transportados por la dinámica de múltiples quebradas que discurrieron antiguamente, de este a oeste, hasta intersectarse con el río Moquegua, erosionando dichas lomas. Sobre esta terraza se ubica gran parte de la población de Moquegua Cercado y San Antonio (Figura 9).



Figura 9: Terraza aluvial antigua, donde se asienta la parte este de la ciudad de Moquegua.

### 2.3.7. Terraza aluvial 3

Se caracteriza por presentar superficies más onduladas y escalonadas con relieves de pendientes menores a 21°. Esta conformadas por clastos y gravas subangulosas a subredondeadas menores a 20 cm de diámetro, con matriz areno limosa de origen volcánico, transportados por la dinámica de múltiples quebradas que discurrieron antiguamente de noreste a suroeste. Sobre esta terraza se ubica el aeropuerto de la ciudad de Moquegua (Figura 10). La terraza aluvial 02 abarca el 10 % de la zona de estudio.



Figura 10: Terraza aluvial antigua, donde se asienta la parte norte de la ciudad de Moquegua.

### 2.3.8. Colina

Esta geoforma presenta pendientes menores a  $3^\circ$  y elevaciones menores a los 3 metros aproximadamente, cima y geometría redondeada, drenaje radial y origen denudacional. Ocupa el 0.25% aproximadamente de la zona de estudio. Se ubica en las inmediaciones del grifo municipal de Moquegua (Figura 11)



Figura 11: Pequeña colina de 3 m de altura, con cima destruida o nivelada por la actividad del hombre, ubicado a inmediaciones del estadio de Moquegua.

### 2.3.9. Loma

Esta geoforma presenta pendientes menores a  $36^\circ$ , aunque en algunos casos alcanzan los  $90^\circ$ , similar a una pared vertical, con cima alargada. Presenta una altura menor a 100 m, geometría alargada, drenaje radial y de origen denudacional. En la zona de estudio existen tres lomas sobre las cuales se asienta el mirador de la ciudad de Moquegua, los sectores San Francisco, San Antonio y el A.H. Mariscal Nieto.

Recientemente, han sido modificadas (redondeadas y/o cubiertas por mantos de arenas) por la acción del viento (erosión eólica), escorrentía de las aguas superficiales y la actividad antrópica. Abarca el 30% de la zona de estudio (Figura 12).

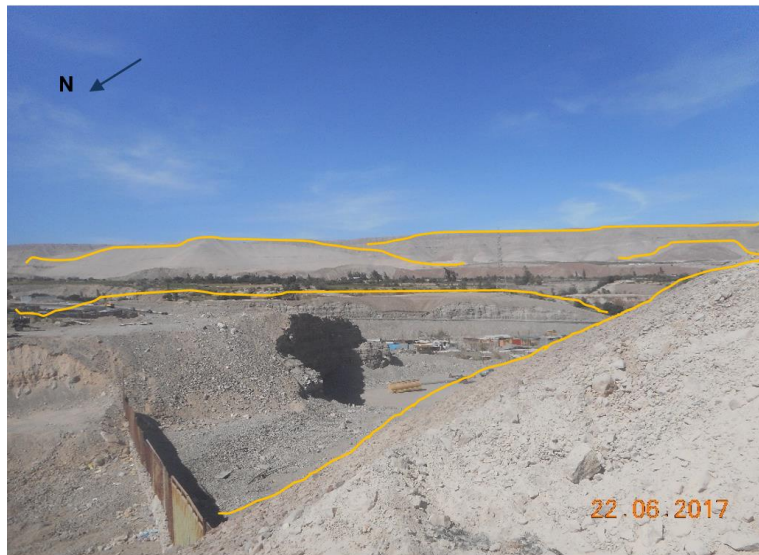


Figura 12: Se han identificado lomas a 1.5 km al sur de Ciudad Nueva, a inmediaciones de Chen Chen.

### 2.3.10. Montaña

Son elevaciones de terreno natural que superan los 700 metros de altura desde su base. Presentan laderas con pendientes mayores a los  $36^\circ$  y abarcan el 15% de la zona de estudio (Figura 13).



Figura 13: Montañas identificadas al Noreste de la ciudad de Moquegua.

### 3. GEOLOGÍA

La geología es la ciencia que estudia la Tierra, los materiales que la componen, las estructuras y el resultado de los procesos que actúan sobre y debajo de la superficie a lo largo de millones de años desde su origen hasta la actualidad. La litología como parte de la geología, estudia las características físicas de las rocas y depósitos que constituyen una formación geológica; es decir una unidad litoestratigráfica. Los tipos de rocas han sido originados por procesos internos (tectónica de placas, ascenso de magma, etc.), como también por la erosión, transporte y depositación de rocas preexistentes (proceso de meteorización).

El intemperismo asociado a los procesos de meteorización, es básicamente un proceso químico; el agua actúa como disolvente; la remoción de los elementos más pequeños del cuerpo de roca deja espacios, por ende, el agua sigue penetrando y acelerando el proceso de desintegración. La roca se vuelve porosa, después, se descompone en fragmentos cada vez más pequeños, hasta que, al ser transportada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas, lo que determina también su naturaleza y fragilidad. Por ejemplo, la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en forma de cuarzo es estable en climas templados, pero en climas ecuatoriales, las altas temperaturas y las precipitaciones pluviales contribuyen a su descomposición; es por ello que, es importante conocer los tipos de rocas y sus características físicas (Harvey, 1987). Estos procesos de meteorización, modelan tanto la roca como el suelo, dando como resultado las geformas que componen el relieve y los factores condicionantes como la litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes: sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caídas de rocas, entre otros).

Para entender el comportamiento dinámico del terreno, es necesario conocer los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación) en las rocas y los suelos que provienen de las mismas.

La geología comprende varias disciplinas, como la geología regional, histórica, estructural y local que en conjunto permiten explicar el cómo, cuándo y que procesos actuaron en el desplazamiento de las rocas y materiales que constituyen los suelos sobre los que se asienta la zona de estudio.

### **3.1. Geología regional**

El marco geológico regional de una zona es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron en tiempo y espacio a gran escala. Es así que, para estos estudios se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1979) a escala 1: 50,000. En esta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Jurásico (145 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

#### **3.1.1. Geología histórica**

Esta rama de la geología resume los procesos y eventos geológicos que tuvieron lugar en el pasado y ayudan a reconstruir las diferentes etapas de cambios geológicos que ha sufrido la superficie de la Tierra, desde sus inicios hasta la actualidad, quedando registrados en la estratigrafía y bioestratigrafía de la zona de estudio. La geología los términos está íntimamente ligada al estudio geológico regional, geomorfológico y estructural de un área y permite comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala.

Geológicamente, el área de estudio presenta una complejidad estructural y volcánica, la que ha sido cartografiada con mayor detalle de acuerdo con los avances y conocimientos actuales de la estratigrafía volcánica y tectónica regional. Las unidades más antiguas abarcan desde el Jurásico superior (Formación Guaneros), Cretácico - Paleógeno (Grupo Toquepala), Paleógeno (Formaciones Sotillo, Moquegua), Neógeno (Formaciones Huaylillas, Capillune, Millo y Grupo Barroso). El cuadrángulo en el cual se encuentra el área de estudio está dividido en dos dominios estructurales; un dominio Occidental (Cuenca Moquegua) compuesto por una depresión con relleno sedimentario continental y un dominio Oriental, caracterizado por la presencia de varias secuencias volcanoclásticas e intrusivos menores.

#### **3.1.2. Geología estructural**

Los dominios Occidentales y orientales están controlados por el sistema de fallas de Incapuquio, cuyas características transcurrentes (componente sinistral), han originado fallas secundarias transversales y alineamientos con rumbo NE-SO (Figura 14).



Figura 14: El área de estudio se encuentra en un dominio de fallas y alineamientos: a) Falla Pampa Trapiche, b) Falla Micalaco, c) Falla Toquepala, d) Falla Purgatorio, e) Falla Chololo y f) Falla oeste del río Moquegua. (Imagen Google earth).

A 5.75 km al este de la ciudad de Moquegua se ubica la falla Pampa Trapiche como parte de la extensión oeste del sistema de fallas Toquepala e Incapuquio. Esta falla se expresa como escarpes discontinuos en roca y en depósitos aluviales, con 4 m., de alto, con rumbo NE-SO (Noller 1993).

A 26 km al este de la zona de estudio y al norte del sistema de fallas Incapuquio se encuentra la falla Micalaco que se emplaza a lo largo de 33 km, cruzando la parte de la mina Toquepala hasta llegar a Micalaco, donde se divide en tres ramas y desaparece en el área de un extenso deslizamiento sobre el río llabaya. Está falla está marcada por una serie de escarpes de 1.5 y 2 m, en las rocas y depósitos aluviales, con rumbo NW-SO (Fenton et al, 1995).

A 11.7 km hacia el este de la ciudad de Moquegua se encuentra la Falla Toquepala, que es un segmento principal de del sistema de fallas Incapuquio, presenta una extensión de 114 km, marcada por un alineamiento de 5 km ubicado al sureste de Moquegua. Desde aquí esta falla se extiende hasta el río Caplina y la cordillera del Barroso escarpas continuas; alcanzan una altura escarpa vertical de 3 m, con dirección EO, a lo largo del río llabaya (Fenton et al., 1995).

A 20.5 km al sureste de la ciudad de Moquegua, se encuentra la falla Purgatorio (1200 m.s.n.m.) entre las ciudades de Moquegua y Mirave; específicamente el borde de la cordillera Occidental (Noller, 1993). Esta falla se encuentra afectando a depósitos aluviales cuaternarios y a secuencias de la Formación Moquegua Superior. Es una falla dextral con un componente inverso y rumbo paralelo a las fallas del sistema Incapuquio (Aundin et al., 2007; Benavente, 2009). Se extiende más de 45 km de y presenta en superficie evidencias de desplazamiento vertical.

A 23 km hacia el sur de la ciudad de Moquegua se ubica la falla Chololo, perteneciente al sistema de fallas costeras de ante-arco meridional con una longitud aproximadamente 50 km. Esta falla presenta varios segmentos paralelos de 100 m al norte de la ciudad de Ilo, desde Punta de Coles hasta el valle de Moquegua, con un rumbo NE-SO. La falla se encuentra afectando depósitos cuaternarios recientes del holoceno, así como a sistemas de drenajes con movimientos transcurrentes sinestrales, (Noller y otros, 1993).

A 23.6 km hacia el suroeste de la ciudad de Moquegua, se encuentra la falla Oeste del río Moquegua con una longitud de 10 km. y rumbo promedio EO (Noller, 1993). Esta falla presenta una ligera inclinación hacia el sur, con muchas evidencias de erosión (Fenton et al., 1995).

### **3.2. Geología local**

Para el mejor conocimiento de la geología local se realizó el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Moquegua a escala 1:20,000 sobre un área de 42 km<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 15) y las unidades identificadas se muestra en la Tabla 3, siendo sus características las siguientes:

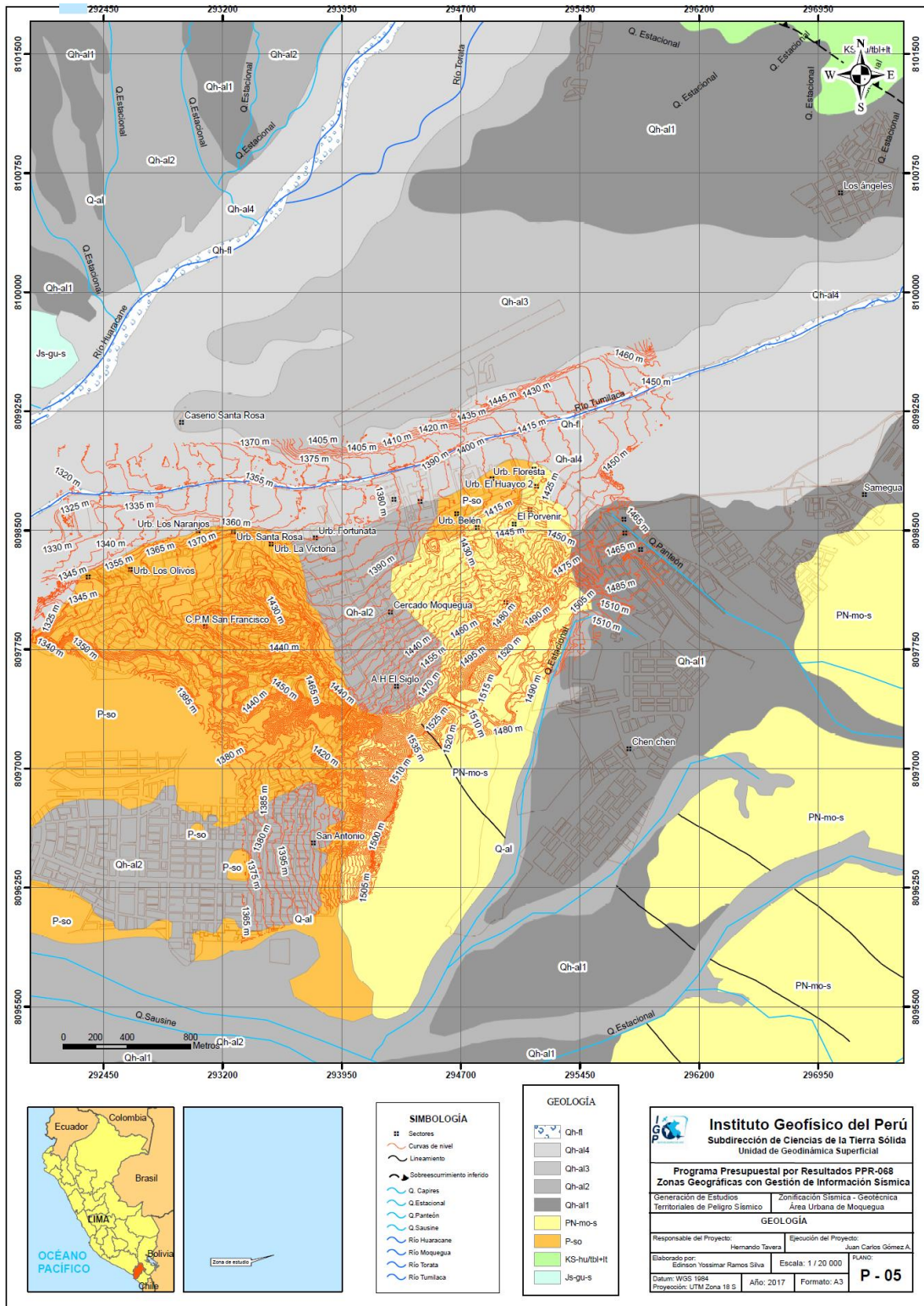


Figura 15: Mapa geológico de la ciudad de Moquegua.

Tabla 3: Columna Cronolitoestratigráfica de la zona de estudio.

ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES		SIMBOLO	LITOLOGÍA
				LITOESTRATIGRÁFICAS		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		DEPOSITO FLUVIAL	Qh-fl	Gravas redondeadas y arenas.
				DEPOSITO ALUVIAL 1, 2,3,4	Qh-al	Gravas y arenas antiguas subredondeadas.
	NEOGENO	MIOCENO	Gpo. Moquegua	FORMACIÓN MOQUEGUA	PN-mo-s	Conglomerados y sedimentitas
	PALEOGENO	EOCENO-OLIGOCENO		FORMACIÓN SOTILLO	P-so	Arenisca y arcosas volcanoclásticas, con lodolitas y yeso en su parte superior.
MESOZOICO	CRETASICO	SUPERIOR	Gpo. Toquepala	FORMACIÓN HUARACANE	Ks-hu/tbl+lt	Flujos piroclásticos (tobas y lapillí soldados, líticas), color gris.
	JURÁSICO	SUPERIOR		FORMACIÓN GUANEROS	Ju-gu-s	Lavas porfíricas oscuras.

### 3.2.1. Mesozoico

**Formación Guaneros (Js-gu\_S):** Conformada por niveles de lavas porfíricas con cristales de plagioclasas aciculares encerradas en una pasta afanítica oscura. Los afloramientos tienen tonalidades oscuras, no presentan estratificación evidente infrayacen disconformes a tobas rosadas asignadas al Grupo Toquepala (cuadrángulo de Clemesi).

Esta función se correlaciona lateralmente con parte de las Formaciones Cachios y Labra del Grupo Yura y afloran en las cercanías de la ciudad de Moquegua (Cerro Trapiche, Aeropuerto Alto de Villa y Chimba) (Figura 16).



Figura 16: Afloramiento de lavas porfíricas de la Formación Guaneros.

**Formación Huaracane-Miembro superior (Ks-hu/tbl+It):** Esta formación aflora por las inmediaciones de los ríos Torata y Huaracane, al norte de la ciudad de Moquegua y a inmediaciones de la localidad de Los Angeles. Está compuesto por tobas y lapillí soldado con líticos porfíricos andesíticos grises que sobreyacen a tobas rosadas. Esta formación se encuentra sobreyacendo discordantemente a la Formación Guaneros (Figura 17).

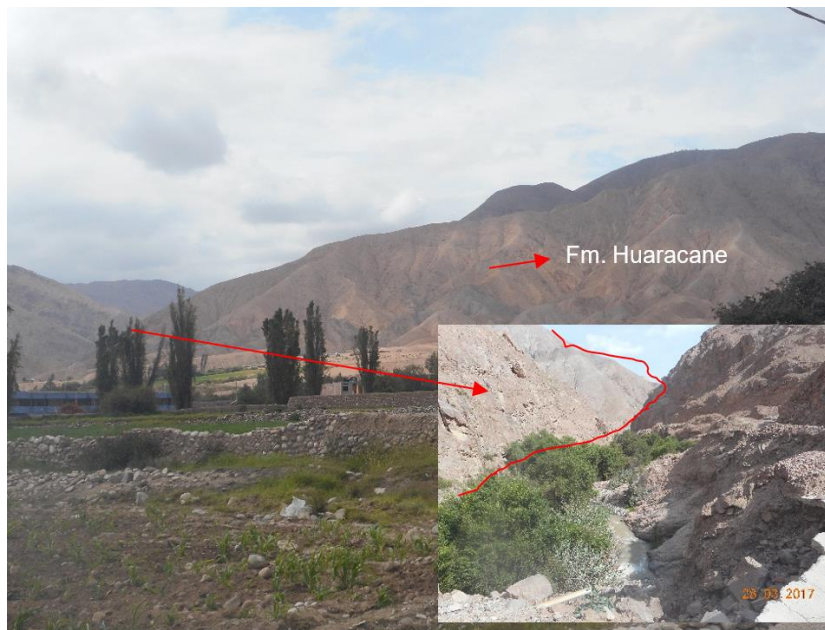


Figura 17: Afloramiento de tobas grises y lapillí soldados de la Formación Huaracane, Miembro inferior.

### 3.2.2. Cenozoico

**Formación Sotillo (P-so):** Esta formación está conformada por areniscas y arcósas (Jenks, 1948) volcanoclásticas grises con tonalidades rojizas. Se encuentra disconforme sobre volcanitas jurásicas e intrusivos cretácicos con una estratificación paralela y subhorizontal en donde predominan las lodolitas en los niveles superiores, así como capas de yeso que se incrementan en su tercio superior. Su transición con la Formación Moquegua está señalada por un banco de yeso con 15 a 20 cm. De espesor. Estas facies se ubican al SO de la ciudad de Moquegua y aflora al suroeste del poblado de Torata (C. San Miguel). Esta formación se correlaciona lateralmente con parte de la Formación Huanca, y Grupo Puno del altiplano (Figura 18).



Figura 18: Afloramiento de areniscas y arcosas finas de tonalidades grises y rosáceas de la Formación Sotillo, sector San Francisco.

**Formación Moquegua (PN-mo-s):** Esta formación está compuesta por sedimentitas (Adams, 1906) y conformadas por conglomerados polimícticos, con clastos de guijas y areniscas gruesas, medianamente estratificadas que se intercalan con algunos niveles de tobas grises blanquecinos en las secuencias superiores. Los clastos corresponden a andesitas y riolitas e intrusivos dioríticos. Estas secuencias presentan numerosas estructuras sedimentarias (Estratificación sesgada - gradada, canales de corte y relleno), (Figura 19).



Figura 19: Afloramiento de los conglomerados polimícticos de la Formación Moquegua Superior, frente al Mirador de Moquegua.

En la localidad de Mirave - Ilabaya, esta unidad está compuesta por conglomerados redondeados (PN-mo\_i) con clastos polimícticos. Esta formación presenta imbricación al suroeste, incrementándose la matriz arenosa con reducción de los materiales gruesos en dirección SO, lo que origina un cambio de facies laterales que gradan a las secuencias de arenas medias y lodolitas de la Formación Sotillo.

La presencia de tobas ha sido datada cerca al cerro Baúl en  $25,3\pm 0.8$  Ma; Cerro Blanco en  $22.7\pm 0.8$  (bt) Ma; y en Cerro Purgatorio con  $23.25\pm 0.8$  Ma (Tosdal, et. al. 1981); siendo todas asignada al Mioceno.

### 3.2.3. Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo al substrato rocoso conformado por rocas volcánicas, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, tales como, aluviales y fluviales siendo sus características las siguientes:

**Depósitos aluviales (Qh-al1-2-3-4):** Los depósitos aluviales están constituidos por gravas subredondeadas a angulosas de 12 a 20 cm de diámetro y arenas de grano fino a medio, color gris, los cuales son acarreados por los ríos Tumilaca, Huaracane, Torata y Moquegua para formar el valle de Moquegua y en general presentan espesores de 2, 3, 6 y 12 m respectivamente. Los depósitos aluviales antiguos conforman terrazas aluviales, donde actualmente se asienta la parte alta de localidad de Moquegua y sus áreas de sembríos (Figura 20).



Figura 20: Depósitos aluviales aflorantes a inmediaciones de la quebrada Sausine.

**Depósitos Fluviales (Qh-fl):** Constituido por materiales resultantes de la meteorización y/o erosión, traslado y depositación de rocas preexistentes. Estos materiales son transportados por una corriente fluvial permanente, encontrándose depositados en el cauce de los lechos de los ríos existentes en el área estudiada. Los depósitos están conformados por gravas redondeadas y arenas de grano medio a grueso de color gris; no presentan plasticidad y se encuentran a lo largo del cauce del río Tumilaca-Moquegua, con espesores de 2 m. (Figura 21).



Figura 21: Depósitos fluviales, aflorantes en el cauce del río Tumilaca que fluye de este a oeste, recibiendo en esta zona el nombre de río Moquegua.

## 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 Sudamericana, considerada como la principal fuente sismogénica en el Perú debido a que produce 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 con magnitudes menores (Cahill & Isacks, 1992; Tavera & Buforn, 2001).

### 4.2. Procesos de geodinámica externa

Son fases sucesivas de un evento geodinámico externo complejo, pero que origina un cambio o transformación física y química debido a los agentes atmosféricos (agua, viento, gases, gravedad, temperatura, etc.) que actúan meteorizando de manera física (fracturan la roca) o química (oxidación, silicificación, caolinificación, etc.) el relieve, para posteriormente erosionar (desgaste natural del suelo o roca) y transportar los materiales hasta ser depositados por gravedad o por alguna corriente fluvial, eólica o marina, formando nuevos relieves. Asimismo, estos procesos tienen como factores condicionantes; 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, usos del suelo y construcción de vías de comunicación). Existen dos procesos geodinámicos externos con las siguientes características:

**-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 cuando la oxidación de un metal se da como resultado de la acción de los agentes externos o por el tiempo de exposición de las rocas a estos agentes, sumados a la naturaleza de las rocas y el clima.

**-Erosión:** Desgaste de los suelos y rocas de la superficie terrestre como resultado de la acción combinada de factores como la temperatura, los gases, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal; 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.

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 22).

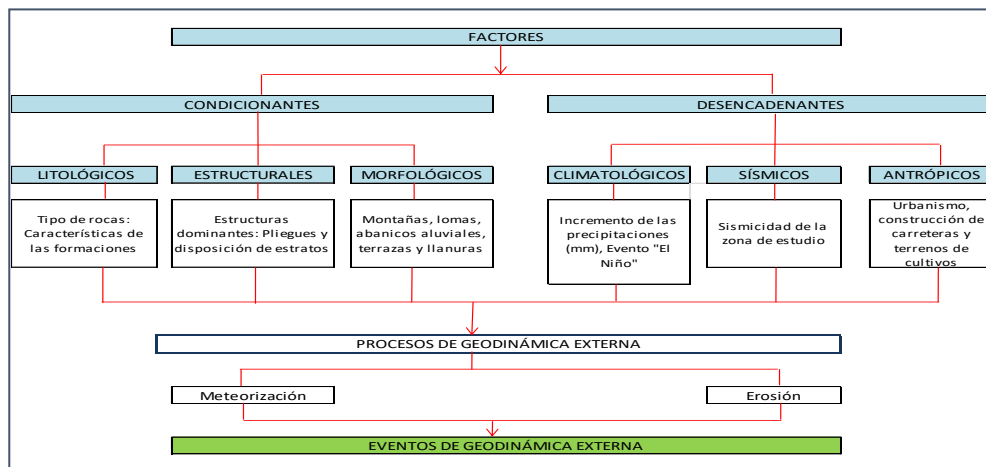


Figura 22: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

**a) fluvio-aluvial:** Estos procesos de erosión (carcaveo, incisión y desgaste laminar) son originados por las precipitaciones que se presentan en la cuenca fluvial, la cual genera 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 remoción de los materiales como (Brusi, 2013). Flujos de

detritos e inundación. Los eventos geodinámicos originados por procesos pluviales y que podrían afectar a la zona de estudio:

-

**-Flujos de detritos (huaicos):** son movimientos de material 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 y en algunos casos, sus materiales son depósitos formando conos de deyección (Figura 23).

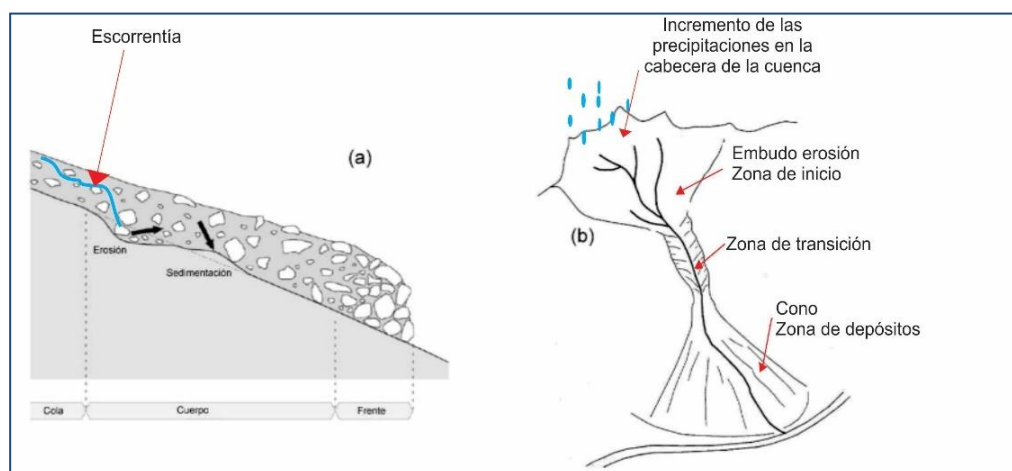


Figura 23: Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incrementos de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la depositación del material), modificado del GITS (Grupo de investigación de transportes de sedimentos).

En la zona de estudio, los flujos de detritos han formado una terraza aluvial sobre la cual se asienta la población de Moquegua. Actualmente hay acumulación de detritos en los alrededores de la ciudad de Moquegua, debido a la presencia de varias quebradas dendríticas secas, que en periodos de lluvias se activan arrastrando sedimentos en forma de flujos en sentido este-oeste, noroeste y suroeste en dirección hacia el río Moquegua y quebradas ocasionando en su recorrido daños a la población.

**-Caída de rocas:** Cerca de los sectores de del A.H. El Siglo y San Antonio, hacia el sur y al este, se han identificado pequeñas masas de rocas desprendidas por gravedad que se depositan al pie de los taludes de las lomas afectando a casas que se encuentran en las partes más bajas y cercanas a este evento (Figura 24).



Figura 24: Caída de Rocas a Inmediaciones de A.H. El Siglo-San Antonio y Parte baja de San Francisco.

**-Inundaciones:** Es el resultado del comportamiento de la cuenca hidrográfica en un período de incremento de precipitaciones; es decir, la ocupación ocasional de terreno por el agua de un río o una quebrada. Puede ocurrir en zonas litorales debido a tsunamis o la superposición de oleaje y las mareas, pero lo más frecuente son las inundaciones en el interior de los continentes producidas por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes debido al incremento brusco del volumen de agua, denominado crecida, (CENEPRED, 2013). Las inundaciones pueden ser consecuencia de varios factores naturales y humanos (Tarbuck, 2005). Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (mayor al 50%) en una zona, se le denominan lluvias extraordinarias o tormentas extremas que generan crecidas en los ríos causando inundaciones en las áreas circundantes. Esta anomalía es conocida como, un evento hidrometeorológico (Figura 25).

Las inundaciones en la zona de trayecto del río Moquegua ubicado a 2.38 km aproximadamente al noreste de la Plaza de Armas de Moquegua, se produjeron en los años 1950, 1982, 1983, 1998 y 2001 ocasionando pequeños daños a las zonas agrícolas, infraestructura de riego. Cabe mencionar que las quebradas Sausine y San Antonio, ubicadas a 3.5 y 4 km al sur de la Ciudad de Moquegua, en tiempo de precipitaciones pluviales se podría activar y arrastrar detritos desde aguas arriba hacia las zonas más bajas provocando inundaciones, principalmente en la zona donde se asienta la parte sur de la ciudad de Moquegua, afectando áreas de cultivo.

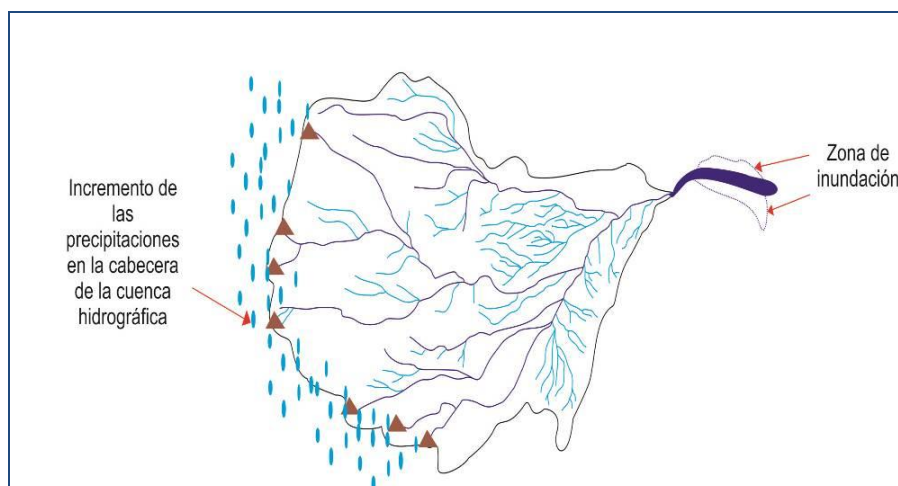


Figura 25: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica.

En el mapa de Geodinámica de la Figura 26, se muestra las posibles zonas inundables debido al desborde del río Tumilica, principalmente en las áreas de cotas bajas por donde la quebrada Panteón ubicada a 1.22 km al noreste de la ciudad de Moquegua, puede activarse en temporadas de lluvias, afectando a la zona Urbana de Santa Catalina.

#### 4.3. Zonas Susceptibles a Procesos Geodinámicos

La susceptibilidad está referida a la probabilidad de que suceda un evento geodinámico durante un período de tiempo en un sitio dado (Hauser, 1985 y 1993; Sepulveda, 2000). Es la mayor o menor predisposición a que un proceso geodinámico suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico y tiempo, lo cual depende de factores como: litología, tectonismo, agentes geológicos y actividad humana (taludes de corte). La identificación y delimitación de zonas afectadas por procesos de geodinámica externa, ha permitido reconocer zonas probables a la ocurrencia de estos eventos. Los eventos geodinámicos identificados se muestran en la Figura 26.

. Las zonas susceptibles a estos eventos geodinámicos expuestos anteriormente, son:

-Las poblaciones que se han asentado en los lechos o en las inmediaciones de las quebradas estacionarias de: Sausine, San Antonio y parte del Valle por donde transcurre el río Tumilaca estando expuestas a inundación. En estos escenarios, los sectores de Santa Catalina, AV. Circunvalación, Chen Chen etc.

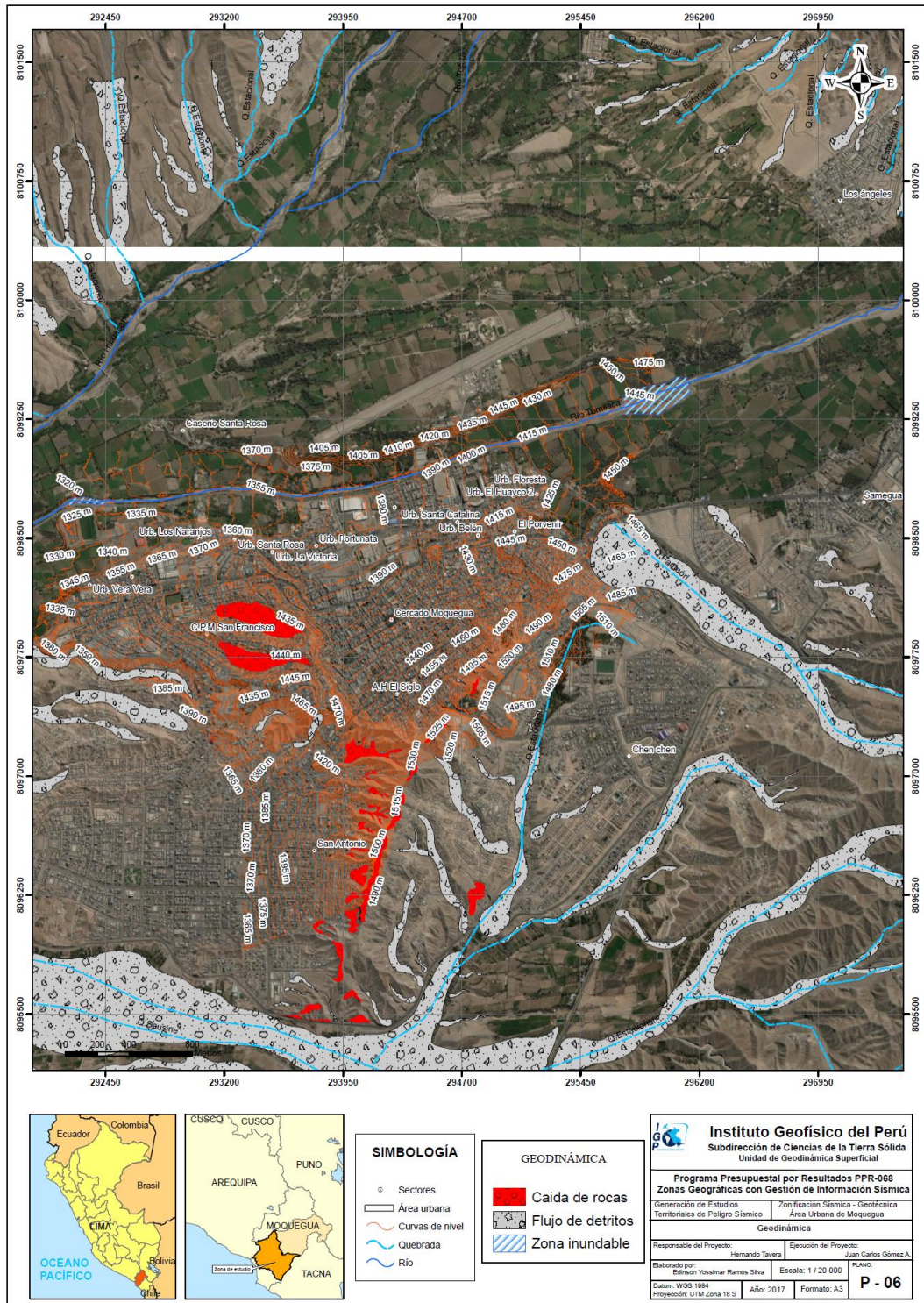


Figura 26: Mapa geodinámica de la ciudad de Moquegua.

-En la zona del A.H. El Siglo, Sector Ramón Castilla, 09 de octubre (San Francisco) y San Antonio, están expuestas a caídas de rocas (Figuras 27 y 28).



Figura 27: Caída de Rocas e invasión del lecho de quebradas secas en el sector de San Antonio.

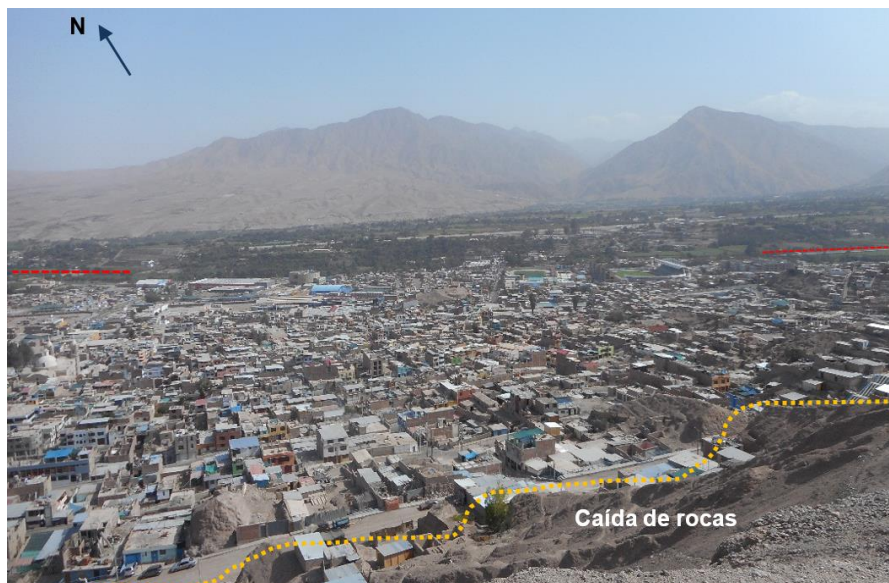


Figura 28: Zonas bajas propensas a inundación por desborde del río Tumilaca y caída de rocas a inmediaciones del mirador de Moquegua.

-La zona de Los Ángeles, Sector noroeste de la ciudad de Moquegua, San Francisco y Chen Chen, se encuentra expuesta a flujos de detritos si las quebradas aledañas se activaran. En el año 2001, debido al sismo de magnitud M8.2 la ciudad de Moquegua, específicamente en la localidad de San Antonio, los daños se dieron en estructuras de adobe.

## 5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de cimentación en condiciones estáticas mediante la aplicación de técnicas de exploración como calicatas, auscultaciones, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio.

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, que posteriormente son transportados y redepositados en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, 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) en base a sus características granulométricas; mientras que, la capacidad de carga admisible de los materiales (arcillas, limos, arenas, gravas y clastos) se encuentra condicionada a las características litológicas de las rocas pre-existentes y la dinámica con que fueron depositados. En el diagrama de la Figura 29, se indica el origen de los suelos.

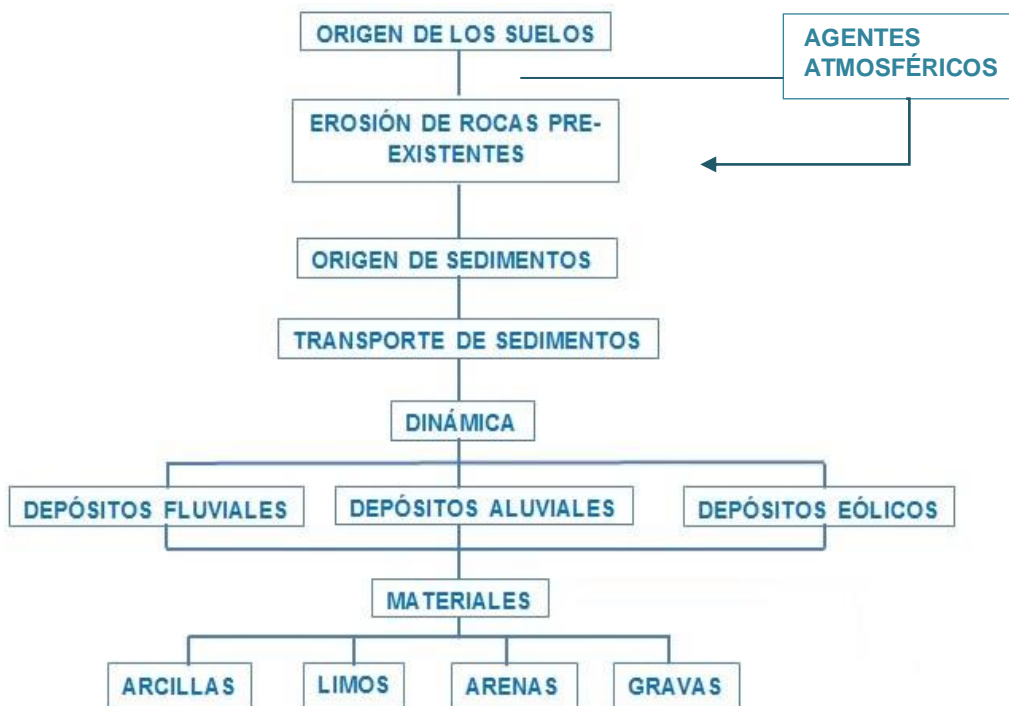


Figura 29: Diagrama del origen de los suelos.

En la ciudad de Moquegua, para el estudio geotécnico se procedió a la elaboración de calicatas, densidades de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL). De las calicatas se extrajeron tres (3) muestras, con la finalidad de conocer sus propiedades físico-mecánicas mediante ensayos geotécnicos en laboratorio de suelos: granulometría, plasticidad, contenido de humedad, corte directo y el cálculo de la capacidad portante de los suelos.

A continuación, se detallan los trabajos de campo realizados en la ciudad de Moquegua:

### **5.1. Exploraciones a cielo abierto (Norma ASTM D 420)**

Es un método de exploración directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación del suelo. Estas exploraciones se realizaron a 2.00 m. de profundidad y permitieron describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras en bolsas herméticas con capacidad de 5 Kg. aproximadamente, para realizar de ensayos y análisis.

**Reconocimiento de la zona de estudio:** Las exploraciones se realizaron en puntos que se distribuyan de forma geométrica uniforme en la ciudad de Moquegua, considerando las características del terreno y su accesibilidad.

**Excavaciones:** Se realizaron con las siguientes dimensiones: 1.0 x 1.0 m. y aproximadamente 2.00 m. de profundidad en promedio.

**Muestreo:** Considera el proceso de extracción de dos muestras alteradas de suelo (para la identificación y la otra para determinar las propiedades de resistencia del suelo) en bolsas herméticas con capacidad de 5 kg aproximadamente.

#### **5.1.1.- Descripción de calicatas**

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo y para ello, se ha elaborado 9 fichas de descripción que se adjuntan en los Anexos. Las excavaciones presentan las siguientes coordenadas UTM. (Figuras 30, 31 y Tabla 4).

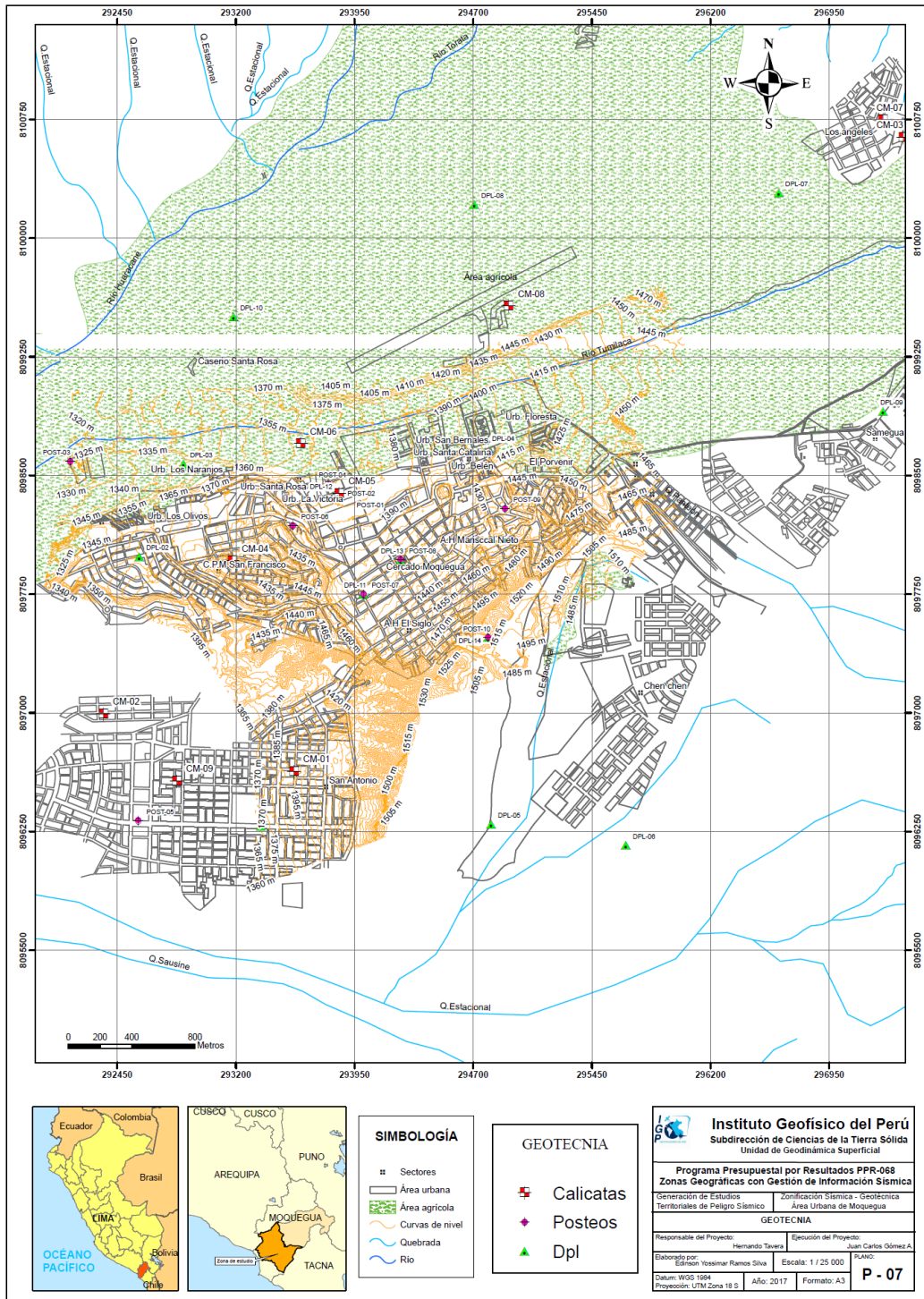


Figura 30: Mapa de distribución de calicatas, posteos y DPL en la ciudad de Moquegua.



Figura 31: Ejemplo de Calicata CM-06, Ubicada en el sector Poder Judicial de Moquegua.

Tabla 4: Ubicación de calicatas

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN	PROFUNDIDAD (m)
CM-01	293567	8096631	1389	2.20
CM-02	292363	8096996	1332	2.50
CM-03	297419	8100638	1586	2.20
CM-04	293178	8097962	1407	2.10
CM-05	293853	8098388	1388	2.80
CM-06	293610	8098703	680	2.60
CM-07	297291	8100750	1583	2.30
CM-08	294924	8099572	794	1.60
CM-09	292827	8096871	1308	3.00

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

Se define como la relación entre la masa del suelo (sólido y líquido) y el volumen total de un suelo o la medida del estado de empaquetamiento del suelo, y consiste en extraer material del suelo a fin de obtener una relación entre la masa de este y el volumen que ocupa la arena del cono (arena calibrada). En cada exploración (estratos muestreados) se debe llevar a cabo un ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono, a fin de conocer la compactación y el

contenido de humedad del suelo en condiciones naturales, información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo a las muestras de suelo (en su estado inicial).

En general, este tipo de ensayo no es aplicable a suelos que contengan cantidad excesiva de roca o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm), así como en suelos saturados; sino más bien, en suelos que presentan cierta cohesión como las arenas limosas y arenas arcillosas con contenido de gravas inferiores a 38 mm de diámetro (Figura 32).



Figura 32: Ensayo de densidad del suelo in-situ en la calicata CM-0 7.

En la Tablas 5 se presenta los resultados obtenidos para las densidades de las nueve (9) calicatas elaboradas para la ciudad de Moquegua. Las demás fichas se adjuntan en los Anexos.

Tabla 5: Resultado de densidades in – situ

CALICATA	MUESTRA	PROF(m)	DENSIDAD HUMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
CM-01	D1-CM1(GP-GM)	1.10/2.20	1.65	1.58
CM-02	D1-CM2(CL)	2.50/2.50	1.81	1.62
CM-03	D1-CM3(SP-SM)	1.60/2.20	1.58	1.54
CM-04	D1-CM4(SP-SM)	1.00/3.00	1.48	1.41
CM-05	D1-CM5(CL)	1.60/2.80	1.24	1.04
CM-06	D1-CM6(GP-GM)	1.00/2.60	1.57	1.51
CM-07	D1-CM7(GP-GM)	1.70/2.30	2	1.96
CM-08	D1-CM8(SP-SM)	1.60/1.60	-	-
CM-09	D1-CM9(GP-GM)	1.00/3.10	1.74	1.72

En base a los resultados obtenidos los suelos de la ciudad de Moquegua presentan rangos de densidad natural húmeda entre 1.24 – 2.00 gr/cm<sup>3</sup> y según los valores definidos en Tabla 6, presentan baja, mediana y alta densidad, debido a que están conformados por gravas limosas y arenosas, arenas limosas mal graduadas y arcillas inorgánicas medias a compactas.

Tabla 6: Valores típicos de densidad de suelos (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 D 1452)

Se define posteadora como un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas)

hasta una profundidad de 1 a 6 m. Esta técnica se realiza para obtener muestras de suelos triturados y alteradas permitiendo de esta manera describir sus características a fin de obtener el porcentaje de humedad y plasticidad de suelos en laboratorio, siempre y cuando se extraiga y se proteja bien la muestra en bolsas herméticas. Estos ensayos no se realizaron con presencia de grava y gravillas, ya que impiden profundizar dichos estratos.

En general, estas exploraciones fueron realizadas entre los puntos de calicatas, tratando de cubrir el área de estudio o en los lugares donde no existía información geotécnica para lograr una mejor zonificación de los suelos de la ciudad de Moquegua (Ver Figura 30).

En la Tabla 7, se muestran las coordenadas para la ubicación de los posteos y sus fichas en los Anexos.

Tabla 7: Ubicación de posteos

POSTEOS	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN	PROFUNDIDAD (m)
POST-01	293952	8098390	1384	0.40
POST-02	293853	8098388	1388	0.20
POST-03	292154	8098592	1325	0.30
POST-04	293785	8098449	1421	0.40
POST-05	292583	8096321	1331	0.25
POST-06	293560	8098184	1402	0.30
POST-07	294006	8097751	1414	0.20
POST-08	294241	8097969	1218	0.40
POST-09	294901	8098293	1363	0.20
POST-10	294794	8097477	1524	0.39

Se debe tener en cuenta que los posteos fueron hechos hasta profundidades de 0.40 m. en promedio, ya que se ha encontrado suelos granulares infrayaciendo a suelos más fáciles de ser posteados, como son los arenosos o gravosos.

#### 5.4. Ensayo de penetración dinámica ligera (Norma DIN4094)

Es un equipo de campo con registro continuo dónde se contabiliza los números de golpes dados por un martillo de 10 Kg. Este martillo se deja caer por gravedad desde una altura de 0.50 m., medida en la parte superior del tambor de acero, para profundizar tramos cada 10 cm. a través de una punta cónica de 60° que se encuentra en el extremo inferior. Este ensayo permite estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, que ayudarán a calcular, mediante fórmulas empíricas, la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos en Kg/cm<sup>2</sup>, al ser hincados por el cono dinámico.

Se hace mención que este ensayo se aplica en terreno arenoso, arcillosos y limo-arenosos, no recomendable en gravas y terrenos rocosos. Los ensayos de DPL fueron realizados al costado de las calicatas con la finalidad de conocer la resistencia al corte de los distintos estratos. El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

**Ubicación de ensayos:** Se distribuyeron al costado y en puntos intermedios a las calicatas para obtener mayor información sobre la resistencia del suelo.

**Ensamble de equipo:** Consiste en conectar los accesorios del equipo. La punta cónica va al final de la varilla de penetración que se une a la guía que contiene el yunque. Posteriormente, se ajusta las uniones y se empieza a hincar el suelo con la caída libre del martillo (acción de la gravedad).

**Proceso de toma de datos:** Se debe registrar el número de golpes por cada 10 cm que la varilla penetra el suelo. Este procedimiento se sigue hasta que el suelo ofrezca resistencia (no exceder los 45 golpes de acuerdo técnica).

En el Tabla 8, se indica las coordenadas UTM de los ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) realizados en la ciudad de Moquegua. Se indica los parámetros a la capa antes de la profundidad alcanzada, el número de golpes y el ángulo de fricción interna correspondiente.

Tabla 8: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos.

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE(m)	ELEVACION (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	# DE GOLPES	$\phi$
DPL-01	293358	8011056	1381	0.40/0.45	36	37.5
DPL-02	292590	8011565	1363	2.60/2.70	26	35
DPL-03	292868	8011944	1348	1.20/1.29	23	34.1
DPL-04	294989	8098678	1425	0.30/0.40	34	37
DPL-05	294813	8096298	1457	0.20/0.30	17	32.4
DPL-06	295665	8096165	1476	0.10/0.18	26	35
DPL-07	296630	8100286	1532	0.30/0.40	38	38
DPL-08	294708	8100214	1465	1.10/1.15	29	35.7
DPL-09	297290	8098908	1536	0.40/0.50	34	37
DPL-10	293185	8099504	1360	0.40/0.45	32	36.5
DPL-11	294006	8097751	1414	0.70/0.75	10	30
PDL-12	293853	8098388	1388	2.10/2.20	34	37
DPL-13	294241	8097969	1218	0.80/0.86	33	36.8
DPL-14	294794	8097477	1524	0.30/0.39	17	32.4

$\phi$ = ángulo de fricción interna

Con los ensayos DPL se ha logrado alcanzar profundidades variadas entre 0.10 y 2.70m, debido a la presencia de suelos de fácil penetración, hasta alcanzar materiales granulares, conformados por gravas arenosas o limosas compactas con alta resistencia a la penetración.

#### 5.4.1. Correlación entre el “N” DPL y el “N” 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 DPL ( $N_{DPL}$ ) fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar ( $N_{SPT}$ ). Este procedimiento permite determinar el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente, calcular la capacidad de carga admisible.

Entre los diversos métodos de correlación para el número de golpes del ensayo DPL y SPT, en base a las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), se utilizó una fórmula empírica que relaciona los parámetros de los equipos DPL y SPT como: peso del martillo, altura de caída del

martillo, área de la punta cónica, el espesor de la hinca y los números 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:

$N_1$ = Número de golpes equivalente en SPT

$N_2$ = Número de golpes obtenidos en DPL

$W_1$ = Peso del martillo del DPL

$W_2$ = Peso del martillo SPT

$H_1$ = Altura de caída de DPL

$H_2$ = Altura de caída del SPT

$A_1$ = Área de la punta cónica del DPL

$A_2$ = Área de la punta cónica del SPT

$e_1$ = Espesor de la hinca del DPL

$e_2$ = Espesor de la hinca del SPT

Una vez calculado los valores de golpes con el SPT (NSPT), se realizaron las correcciones por nivel freático, eficiencia, longitud y diámetro; a fin de obtener un nuevo valor de número de golpes por ensayo SPT ( $N'_{SPT}$ ), con el cual se procede a estimar el ángulo de fricción interna de los suelos.

#### 5.4.2. Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del $N_{SPT}$

Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen fórmulas empíricas propuestas por diversos autores, como Osaki (1959), Muromachi (1974), Peck (1974), Das (1995) y Katanaka - Uchida (1996). Para el caso de la ciudad de Moquegua, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), debido a que es la más usada internacionalmente y sus resultados son conservadores, respecto a los propuestos por otros autores (Tabla 9).

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 -02	4.11	24.1	6.53	26.4
DPL -03	11.37	30.1	10.89	29.8
DPL -08	20.81	35.4	-	-
DPL -12	7.98	27.6	9.92	29.1
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO	1.00- 1.20m		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, V. 2014)

COMPACIDAD RELATIVA DE SUELOS GRANULARES			CONSISTENCIA EN SUELOS COHESIVOS		
VALOR DE $N_{SPT}$	COMPACIDAD RELATIVA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\phi$ )	VALOR DE $N_{SPT}$	CONSISTENCIA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\phi$ )
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°

De acuerdo a los datos de las Tablas 9 y 10, los suelos de la ciudad de Moquegua, en su mayoría, son gravas pobremente graduadas con mezcla de gravas limosas (GP-GM), cuyo valor del ángulo de fricción interna de su matriz está comprendida mayormente entre 30.42° y 35.4° a profundidades de 1.00 y 1.20 m; por tanto, los suelos presentan compacidad relativa suelta a media.

Mientras que, los suelos conformados por arenas limosas bien graduadas (SW-SM) presentan un ángulo de fricción interna de 24.1° a profundidades de 1.00 y 1.20 m, corresponde a suelos con compacidad relativa suelta; mientras que, la matriz de suelos gravo limosos (GW-GM), presentan un ángulo de fricción de 34.8° a profundidades de 1.20 a 1.50m, corresponde a suelos de compacidad relativa medianamente compacta.

Para los suelos areno limosos (SP-SM, SM y SC), el ángulo de fricción interna es de  $29.8^\circ$ ,  $24.10^\circ$  y  $27.6^\circ$  corresponde a suelos sueltos y muy sueltos; mientras que, los suelos limosos (ML) presentan un ángulo de fricción de  $30.1^\circ$  a profundidades de 1.00 a 1.10 m. correspondiendo a suelos de compactidad media.

Finalmente, los suelos arcillolimosos inorgánicos (CL) presentan valores de ángulo de fricción interna de  $4^\circ$  y  $5^\circ$  a profundidades de 1.50 m, correspondientes a suelos con consistencia media a compacta (Figura 33). Para cada punto de observación se ha elaborado una ficha que resume todos los parámetros geotécnicos obtenidos, tal como se muestra en la Figura 34. Para otros puntos, ver Anexos.



Figura 33: Ejemplo de ensayo de penetración dinámica ligera (DPL-10).

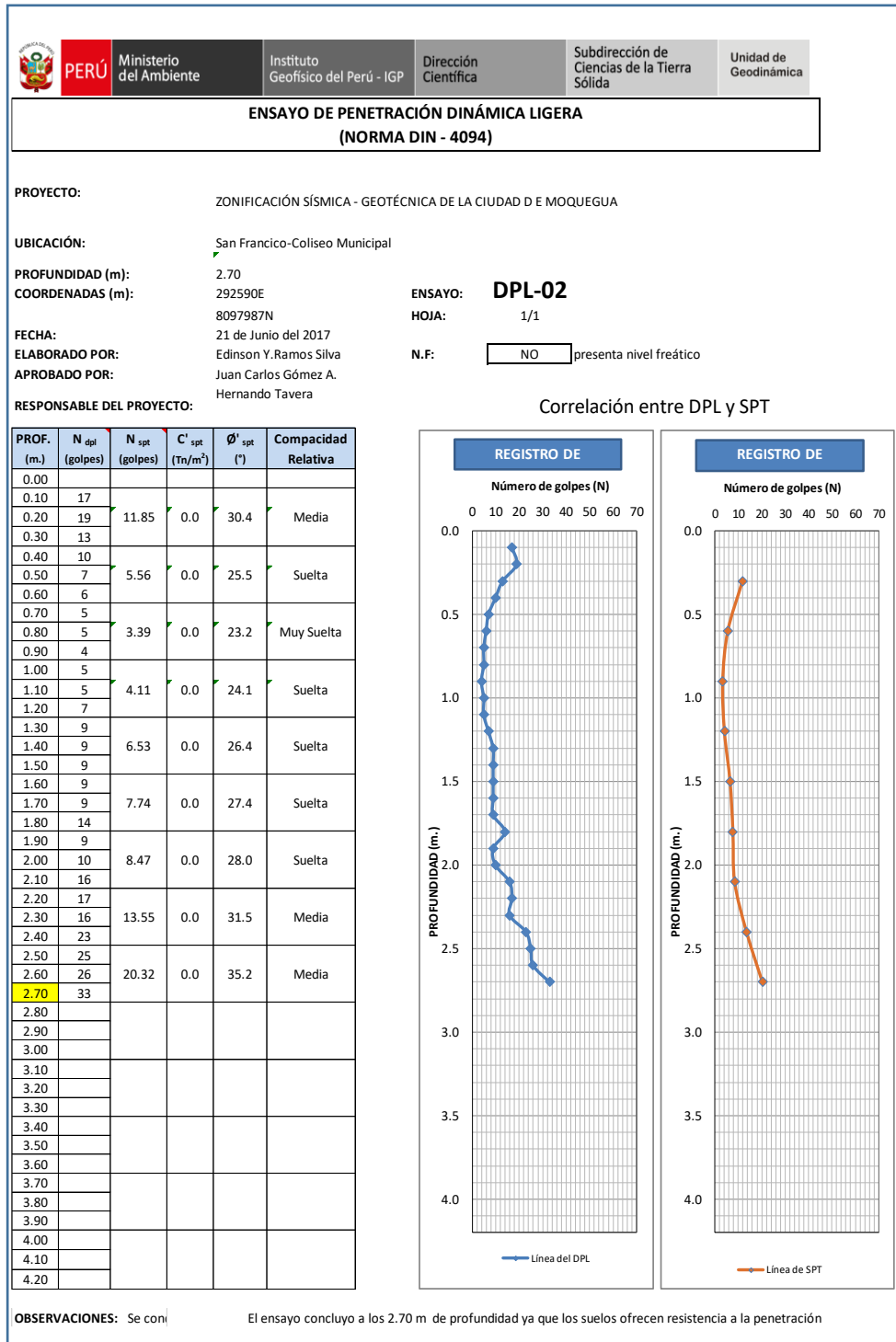


Figura 34: Diagrama de correlación entre el número de golpes del DPL y el número de golpes del SPT, y cálculo del ángulo de fricción interna corregido.

## 5.5. Clasificación SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y DPL, realizados en la ciudad de Moquegua; así como los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad realizados en el laboratorio de suelos, se ha identificado la existencia de 7 tipos de suelos, que han sido clasificados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), a la profundidad de 1.00 – 1.20 m. (Tabla 11 y Figura 35).

**Suelos tipo SP:** Conforman los primeros 0.60 m de profundidad por arenas limosas (SM), semicompactos de color beige y grano fino, luego infrayace un suelo areno arcilloso (SC), semicompacto y color marrón con humedad baja hasta los 1.50 m de profundidad. Estos suelos muy sueltos se identificaron en la calicata CM-05 realizada en la Villa Mariscal Nieto y representa el 4.5% de la zona de estudio.

Después de 1.40 m, de profundidad el subsuelo está conformado por arcillas inorgánicas (CL) con presencia de gravillas de plasticidad media, color negro, humedad baja y de compacidad relativa media a compacta.

**Suelos tipo SM:** Conformado por arenas limosas finas, de color pardo con nódulos de lodolitas subreadondeados (SM). Este suelo se encontró al inspeccionar la calicata CM-02, realizada en la urbanización El Paraíso en el sector San Antonio y también en la parte alta de Moquegua cercado y en el A.H El Siglo, hasta la profundidad de 1.20 m. A este suelo le sigue una capa de 30 cm de grava mal graduada (GP), de 1/2" de diámetro, con mezcla de arena, con pocos finos y que representan a suelos muy sueltos.

Entre 1.5 a 2.5 m. de profundidad se encuentra arcillas inorgánicas (CL) compactas de color rojo a marrón correspondiendo a suelos con un índice plástico de 11.98%. Este tipo de suelos abarca el 10% del área de estudio.

**Suelos tipo ML:** Suelos limos inorgánicos de color gris, semicompactos y secos con presencia de gravas de 12", presentes en la calicata CM-06, hasta la profundidad de 1.00 m. Luego hasta los 2.60 m de profundidad, se identifica suelos de gravas arenosas mal graduadas, con matriz limo arenosa, humedad alta, color pardo y con la presencia de niveles freáticos a profundidades de 2.60 m.

Tabla 11: Clasificación SUCS para los suelos de la ciudad de Moquegua.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LIQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
CM-01	1.10/2.20	N.P	50.1	41.7	8.28	---	---	---	4.14	GW-GM	Grava limosa bien graduada
CM-02	2.50/2.50	N.P	12	19.8	79.09	35.89	15.52	20.37	10.41	CL	Arcilla Inorgánica
CM-03	1.60/2.20	N.P	38.5	50.7	10.83	---	---	---	2.6	SP-SM	Arena limosa mal graduada
CM-04	1.00/3.00	N.P	21.8	68.3	9.97	---	---	---	4.89	SW-SM	Arena limosa bien graduada
CM-05	1.60/2.80	N.P	2.98	40.15	56.87	26.52	14.54	11.98	16.15	CL	Arcilla Inorgánica
CM-06	1.10/2.60	2.6	55.01	39.8	51.9	---	---	---	3.49	GP-GM	Grava limosa mal graduada
CM-07	1.90/2.30	N.P	47.1	43.91	8.98	---	---	---	2.25	GP-GM	Grava limosa mal graduada
CM-08	1.60/1.60	N.P	1.37	92.36	6.27	---	---	---	3.8	SP-SM	Arena limosa mal graduada
CM-09	1.00/3.10	N.P	47.72	47.13	5.15	---	---	---	1.21	GP-GM	Grava limosa mal graduada

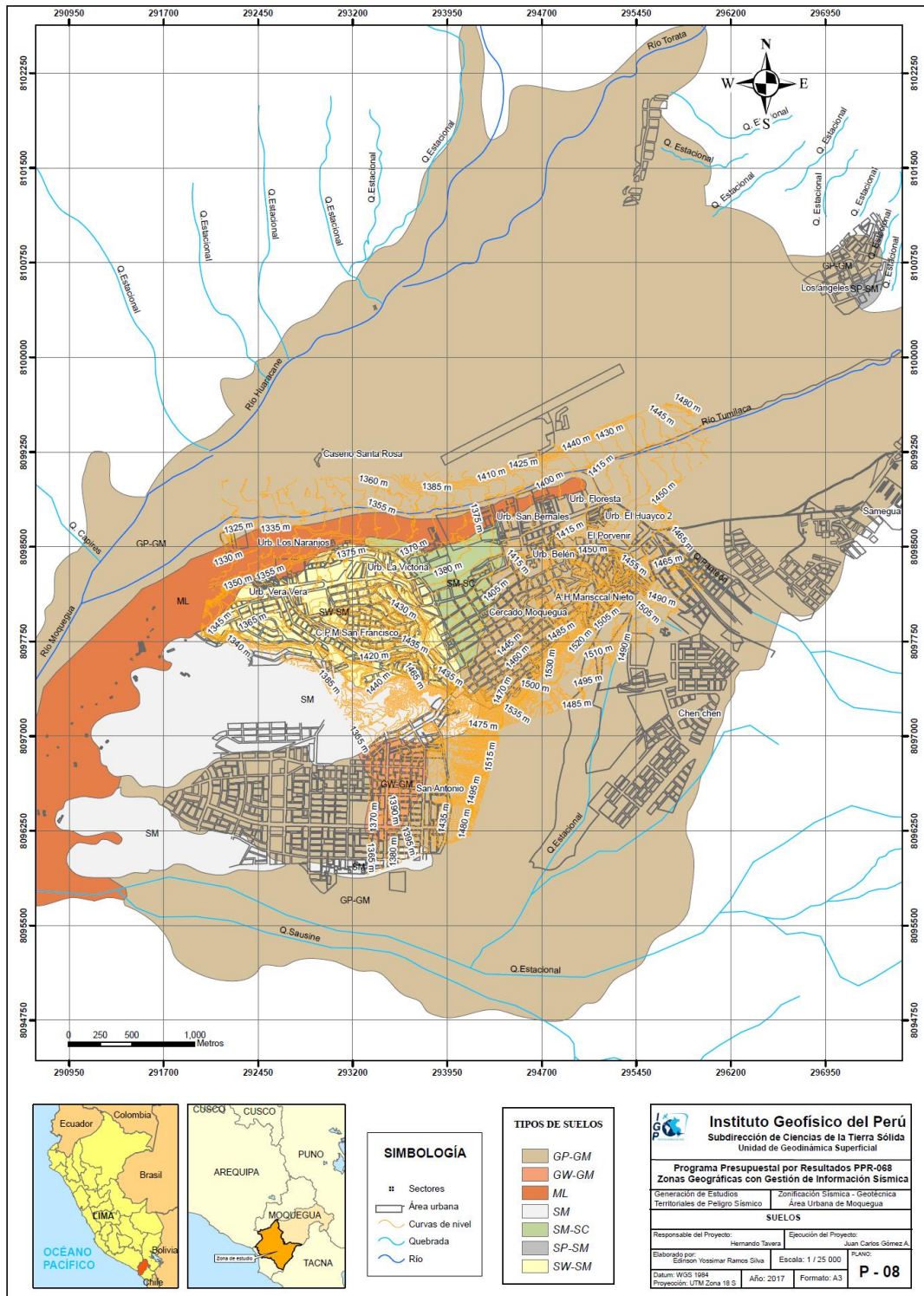


Figura 35: Mapa de clasificación SCS para los suelos de la ciudad de Moquegua.

Estos suelos han sido identificados en la calicata CM-06, predominando en las inmediaciones del Poder Judicial y a lo largo del margen izquierdo del río Tumilaca o Moquegua, representan a suelos medios. Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 5.5 % del área de estudio.

**Suelos tipo SP-SM:** Conformados por arenas limosas mal graduadas con presencia de grava subangulosas de color crema a blanco, de origen volcánico, presentan secuencia gradacional, son suelos sueltos de color crema y secos. Después de los 2.20 m. de profundidad se encuentran gravas angulosas de 12” que no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 1% del área de estudio y se han identificado en la calicata CM-03, en el sector Los Ángeles.

**Suelos tipo SW-SM:** Conformados por arenas limosas bien graduadas (SW-SM) con presencia del 9.97% de limos y 21.8% de gravas subredondeadas de color marrón claro, presentes hasta los 3 m de profundidad. Estos suelos no presentan plasticidad y corresponden a suelos muy sueltos identificados en la calicata CM-04 realizada en la parte alta del Sector San Francisco. Estos suelos representan el 6% del área de estudio.

**Suelos tipo GW-GM:** Conformados por gravas limosas bien graduadas (GW-GM) de color gris pardoso y de origen volcánico. Presentan el 8.28% de finos y corresponden a suelos medios. Los primeros 0.80 m. de profundidad está compuesta por material de relleno, seguidos por suelos gravolimosos hasta la profundidad de 2.20 m, no presentan plasticidad. Estos suelos se identificaron en la calicata CM-01, en el Sector San Antonio, corresponden a suelos medios. Estos suelos representan el 3% del área de estudio.

**Suelos tipo GP-GM:** Estos suelos están conformados por gravas mal graduadas con mezcla de gravas limosas (GP-GM) de color gris pardoso y de origen volcánico, Presentan, entre el 6 y 9 % de finos correspondiendo a suelos sueltos a medios. No presentan plasticidad. Estos suelos se identificaron en la calicata CM-07 en el sector Los Ángeles; en la calicata CM-08 en el sector Alto de Villa, Urbanización El Naranjal y en la calicata CM-09 en la zona céntrica del Sector San Antonio, específicamente en el campo de la Asociación José Carlos Mariátegui. Estos suelos representan el 70% del área de estudio.

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

La finalidad de este ensayo, es determinar la resistencia al esfuerzo de corte para una muestra de suelo sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia 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 la 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 en ambos extremos, luego se aplica una carga vertical de confinamiento (Pv) y una carga horizontal (Ph) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

Los resultados obtenidos para los ensayos de corte directo para la ciudad de Moquegua se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Valores obtenidos del ensayo de corte directo.

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ )	Cohesión aparente del suelo ( $\text{kg/cm}^2$ )	Densidad natural ( $\text{Tn/m}^3$ )	Densidad de matriz
CM-01	34.8	0	1.65	0.83
CM-02	24.1	0	1.81	1.78
CM-03	29.8	0	1.42	1.42
CM-04	24.1	0	1.48	1.15
CM-05	27.6	0.05	1.24	1.2
CM-06	30.1	0.03	1.18	1.18
CM-07	30.42	0.06	2	1.058
CM-08	35.4	0	---	1.32
CM-09	34.8	0	1.74	0.9

De resultados obtenidos, se evidencia que el 23.1% de los suelos presentan cohesión y los valores del ángulo de fricción interna están comprendidos entre 27.6° y 30.42° aproximadamente, presentando una compacidad relativa muy suelta a media.

El 76.9% de los suelos no presentan cohesión y los valores del ángulo de fricción interna están comprendido entre 24.10° y 35.4°, presentando una compacidad relativa muy suelta a media, pues su matriz predominante provienen de suelos granulares (arenas y gravas arenosas o limosas). Según la compacidad relativa de los suelos de Moquegua, a 0.74 m de profundidad (promedio según el ensayo de DPL), en su mayoría son suelos sueltos. Pasando esta profundidad, los suelos son sueltos a medios y por debajo 1.20 m., de profundidad, los suelos son medios a compactos.

## 5.7. 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. Este parametro se encuentra establecido por la relación entre la carga última y un factor de seguridad de 3, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones E.050.

### 5.7.1. Carga última

Es la presión última por unidad de área de cimentación soportada por el suelo, en exceso de la presión causada por el suelo ubicado alrededor del nivel de cimentación. Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo y en base al NSPT (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usaran para determinar la capacidad portante última mediante las fórmulas por corte general y local de Terzaghi (1943), según sea el suelo a ensayar:

Formula para falla por corte general:

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

Formula 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 (Tabla 13)

Tabla 13: Factores de cohesión, carga y volumen aplicados para la falla por corte general propuesto por Terzaghi y Kumbhojkar (1993) y para falla por corte local, los parámetros propuestos por Terzaghi (1943).

para falla general				para falla de corte local			
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

Luego, en base a los resultados de la carga última ( $q_u$ ) se calculó la capacidad portante admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m. Asimismo, para una profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad portante de carga admisible para suelos analizados se presentan en el Tablas 14 y 15.

Tabla 14: Capacidad de carga admisible para los suelos extraídos en la ciudad de Moquegua.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Corte	Capacidad de carga última (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Corte
CM-01	2.74	0.91	F.L	3.77	1.26	F.L
CM-02	2.74	0.91	F.G	3.34	1.11	F.G
CM-03	5.59	1.86	F.G	14.12	4.71	F.G
CM-04	0.92	0.31	F.L	1.59	0.53	F.L
CM-05	1.60	0.53	F.G	5.01	1.67	F.L
CM-06	2.40	0.68	F.L	2.26	0.75	F.L
CM-07	9.10	3.03	F.G	11.69	3.90	F.G
CM-08	13.72	4.57	F-G	18.29	6.10	F.G
CM-09	10.86	3.62	F-G	14.38	4.79	F.G
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00m			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00m		

Tabla 15: Capacidad de carga admisible (criterio de falla general y local) en base a los ensayos de DPL en la ciudad de Moquegua.

ENSAYO	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de corte	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de corte
20	0.92	0.31	F.L	1.59	0.53	F.L
DPL – 03	2.04	0.68	F.L	2.32	0.77	F.L
DPL – 08	8.82	2.94	F.G	---	---	---
DPL – 12	1.6	0.53	F.L	2.03	0.68	F.L
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00		

Tabla 16: Rango 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 obtenidos y tomando en cuenta los valores de la Tabla 16, se ha determinado que la zona urbana de la ciudad de Moquegua, en su mayoría, ha sido construida con cimentaciones de 1.00 m. de profundidad y ante ello los suelos han sido clasificados (Figura 36).

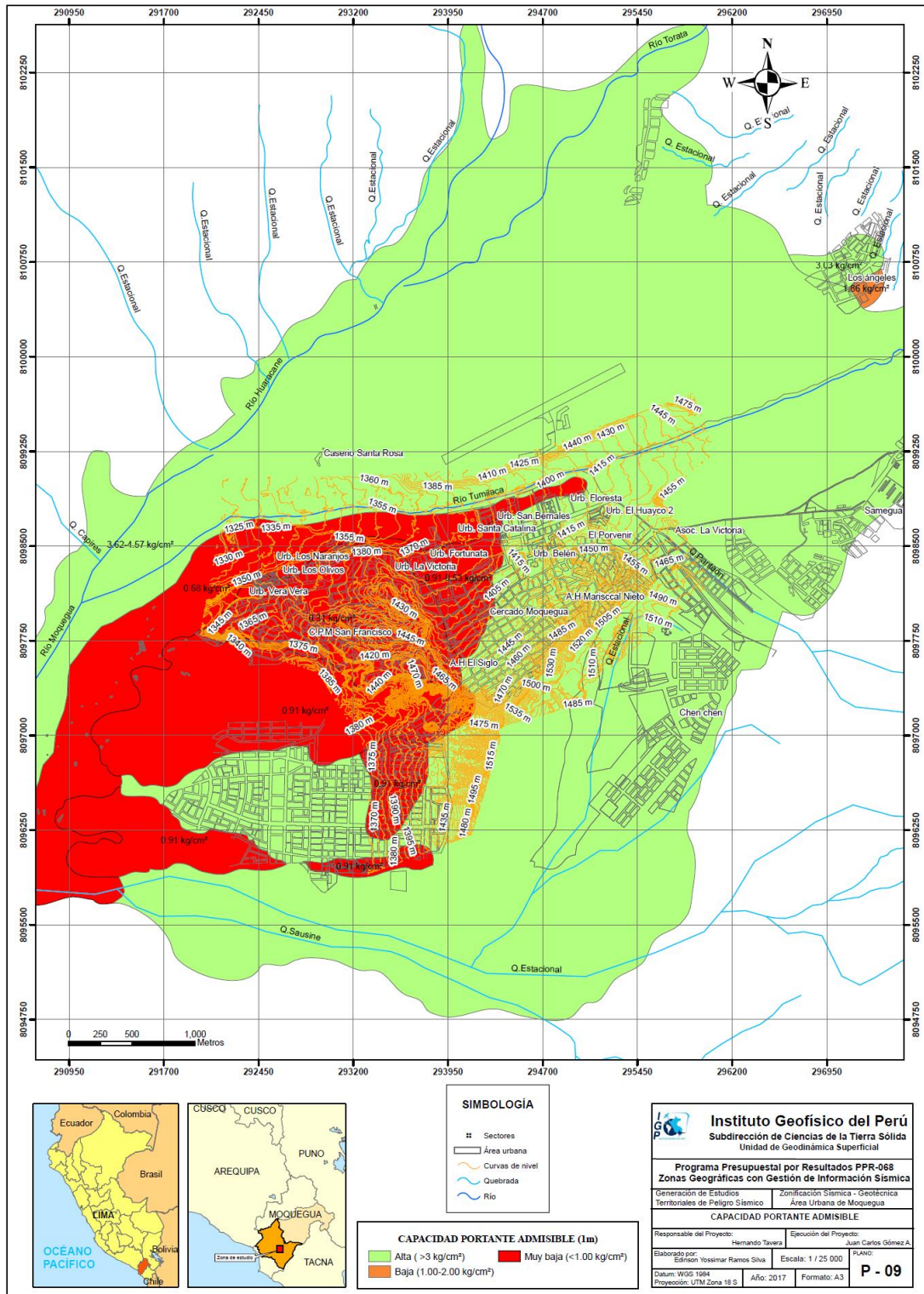


Figura 36: Mapa de capacidad de carga admisible para la ciudad de Moquegua.

### **5.7.2. Capacidad de carga admisible muy baja**

Comprende rangos de capacidad de carga admisible menores a  $1.00 \text{ kg/cm}^2$  y corresponden a suelos arenos limosos (SM) presente en la Urbanización El Paraíso; arenas bien graduadas con mezcla de arenas limosas (SW-SM) presentes en el Sector San Francisco; limos inorgánicos (ML) en las inmediaciones del Poder Judicial de Moquegua; gravas bien graduadas con mezcla de gravas limosas (GW-GM) presentes a los alrededores del Mercado Mariano Orqueta, Sector San Antonio; arenas limosas y arenas arcillosas (SM y SC), presentes a inmediaciones de la Villa Mariscal Nieto. Todos estos suelos fueron identificados hasta 1 m de profundidad, siendo su grado de compacidad a media a muy suelta y su capacidad admisible, entre  $0.31$  y  $0.91 \text{ kg/cm}^2$ .

### **5.7.3. Capacidad de carga admisible baja**

Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre  $1.00 - 2.00 \text{ kg/cm}^2$ , correspondido a suelo de arenas pobremente graduadas con mezcla de arenas limosas y gravas (SP-SM) presentes en Sector Los Ángeles, presentan una compacidad relativa suelta y una capacidad portante admisible de  $1.86 \text{ kg/cm}^2$ .

### **5.7.4. Capacidad de carga admisible alta**

Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre  $3.00-4.00 \text{ kg/cm}^2$ , correspondiente a suelos de tipo gravas pobremente graduadas con mezcla de gravas limosas (GP-GM). Este suelo está presente en el Sector Los Ángeles con compacidad relativa suelta y una capacidad admisible de  $3.03 \text{ kg/cm}^2$ . También se encuentran en la Urb. Naranjal en Alto Villa, con un grado de compacidad relativa media y capacidad admisible de  $4.57 \text{ kg/cm}^2$ . En la Asociación J. Carlos Mariátegui, el grado de compacidad relativa es media y su capacidad admisible es de  $3.62 \text{ kg/cm}^2$ . Estos suelos se han identificado a 1 m de profundidad.

A una profundidad de y 1.50 m capacidad portante admisible de los suelos cambian. En algunos casos, según el tipo de suelo, que se ha encontrado GW-GM capacidades admisibles, bajas de  $1.26 \text{ kg/cm}^2$  para suelo GW-GM; suelos CL con capacidad admisible baja entre  $1.11$  y  $1.67 \text{ kg/cm}^2$ ; suelos tipo SP-SM con capacidad admisible alta  $4.71 \text{ kg/cm}^2$ ; suelos tipo SW-SM con capacidad admisible muy baja,  $0.53 \text{ kg/cm}^2$ , suelos densos del tipo GP-GM con capacidad portante de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$ . En algunos casos la capacidad portante es alta con valores entre  $3.16$  a  $6.10 \text{ kg/cm}^2$ ; comportándose las gravas de Moquegua como roca.

## **CARACTERIZACIÓN SÍSMICA Y GEOFÍSICA DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA**

## 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. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

- 3.1. Estudio Sísmico con la Técnica de H/V
- 3.2. Estudio Sísmico con la Técnica de MASW
- 3.3. Periodos Dominantes
- 3.4. Estudios Eléctricos con la Técnica ERT

### 4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

- 4.1. Integración de resultados
- 4.2. Mapa de Zonificación

## 1. METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Moquegua, se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las metodologías que a continuación se describen:

### 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 su aplicación, se obtiene en campo registros de vibración ambiental para construir las razones espectrales H/V; es decir, obtener el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical (Nakamura, 1989), información que permite identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones máximas relativas para caracterizar el tipo de suelo presente en el área de estudio (Figura 1).

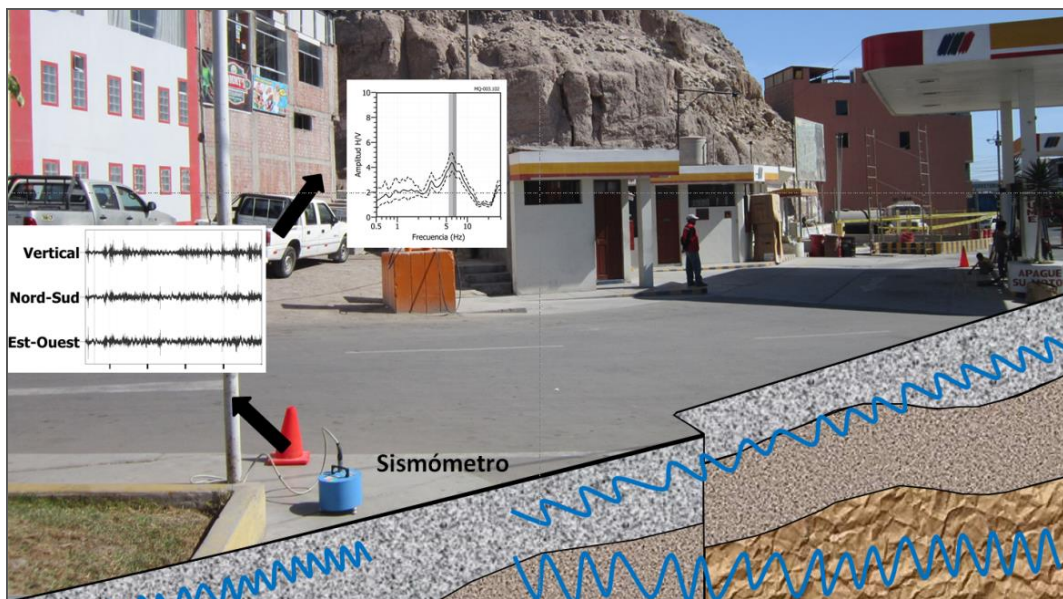


Figura 1: Registro de vibración ambiental y razones espectrales.

Estas características físicas del suelo son definidas por las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas en 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 el comportamiento dinámico del suelo.

Para el procesamiento y aplicar cuando la técnica de cocientes espectrales H/V, se consideran los siguientes pasos:

- ✓ Los registros de vibración ambiental son 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 sin la presencia de ruidos transitorios.
- ✓ Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- ✓ Los espectros horizontales de la señal se dividen entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedian para cada punto de observación 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).

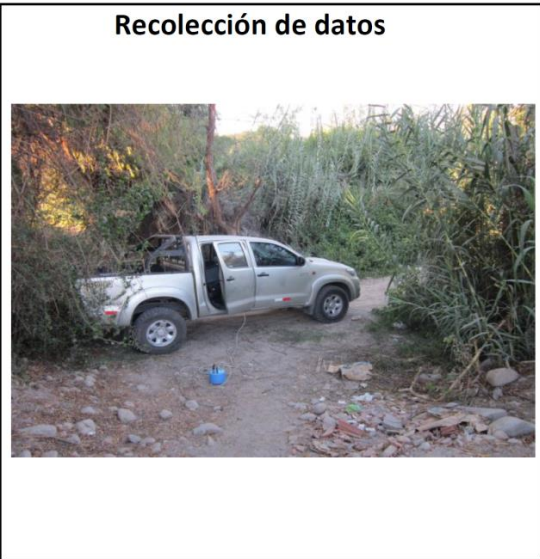
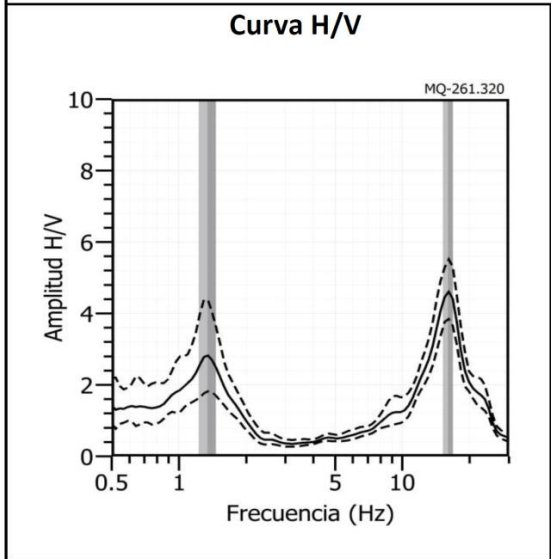
En la Figura 2, se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el total de la información obtenida en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O); seguidamente la curva H/V, en la cual la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

Para la interpretación de los resultados se dispone de mapas geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Para 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**  
**CIUDAD DE MOQUEGUA - MOQUEGUA**  
**Frecuencias predominantes del Suelo**

MQ - 261



**Interpretación de resultados**

Dudoso	Pico(s) H/V	f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>
Ningún pico	(Hz) <input checked="" type="checkbox"/>	1.35	-----	16.01
Observaciones				
Var. azimutal	Homogénea	Amplitud max. Entre y°		

Figura 2: Ejemplo de la ficha H/V para el punto MQ-261 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua y Abajo; resultados.

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

El arreglo lineal MASW es un método indirecto que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, 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 sensores sísmicos, tal como muestra en la Figura 3.

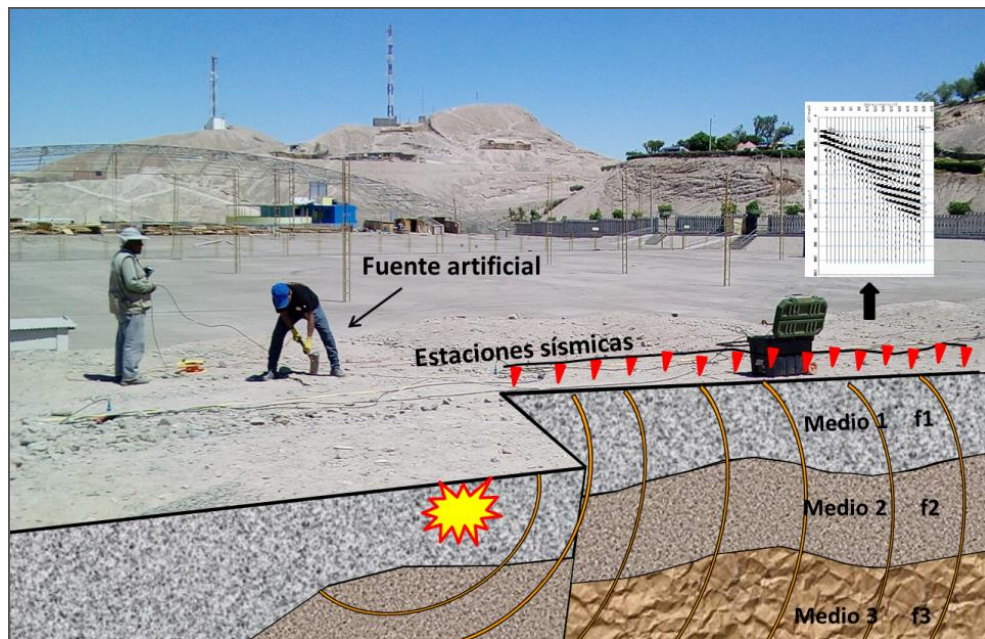


Figura 3: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

En esta técnica, 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 según el tipo de suelo, puede variar la longitud de arreglo sísmico y el tipo de fuente activa utilizada (Park, 2007).

El procesamiento de los datos recolectados, consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), lo cual permite la transformación de los datos en series de tiempo, dando como resultado una imagen de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión pertenecientes a un mismo perfil MASW, son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles  $V_s$  en una dimensión (1D), considerando como parámetros de entrada, la profundidad (30 m) y el número de capas (15 capas).

Finalmente, los perfiles  $V_s$  son promediados obteniendo 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 del arreglo MASW. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y de la derecha, el perfil de velocidad de ondas de corte  $V_s$  (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 del dominio de frecuencia a 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.

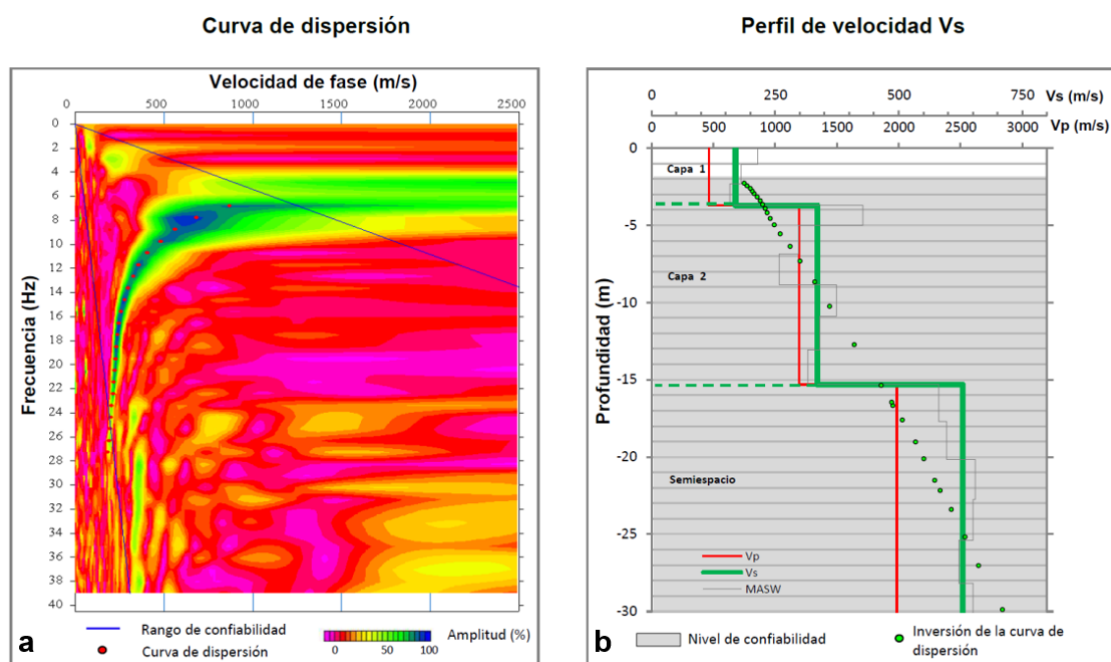


Figura 4 a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir de la técnica de MASW.

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030-2018. 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, esta nueva clasificación del perfil del suelo en representado con colores para una mejor interpretación (Tabla 1).

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	

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología y geotecnia de la zona de estudio, contenido de humedad o nivel freático ya que ambos parámetros que influyen en la variación de velocidad de ondas Vs.

### 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 resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua y sales disueltas presentes en las fracturas de las rocas y en la porosidad del suelo.

La tomografía eléctrica es un método convencional que se basa en introducir al 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), conectados a un milivoltímetro, donde se medirá la diferencia de potencial eléctrica  $\Delta V$  entre esos dos puntos (Figura 5).

La profundidad de investigación depende de la separación entre electrodos, por ejemplo, con 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.

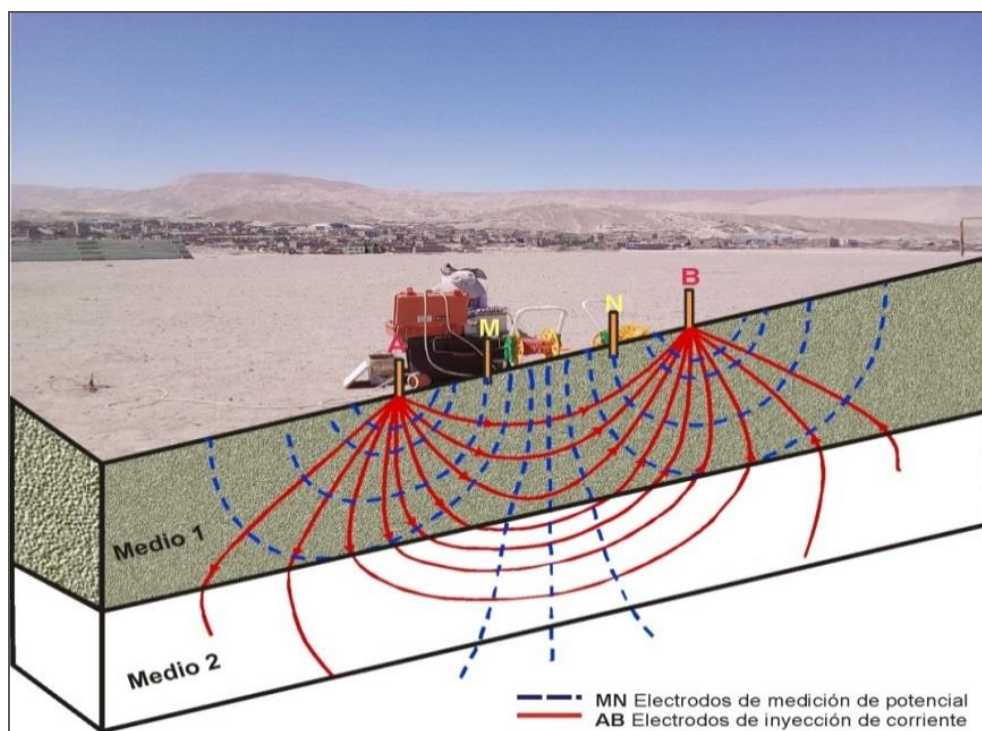


Figura 5: Principio del método de resistividad (LE04-MQ).

Para el análisis de los datos obtenidos en campo se procedió a calificar en función de su diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos ( $I$ : intensidad de corriente,  $V_p$ : diferencia de potencia y  $K$ : constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía.

Finalmente, los resultados son presentados en Secciones de Resistividad 2D (Resistividad) que relacionan la distancia - profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo. Además, estas secciones 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.

La Interpretación de la información considera todos los factores posibles que puedan influir en los resultados; es decir, grado de saturación del terreno, porosidad y la forma del poro, la salinidad del fluido, el tipo y composición de la roca, la temperatura, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Considerando la existencia de una estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la posible ubicación de las áreas de filtración y

las zonas saturadas en el subsuelo. De existir incrementos de fluidos en el terreno, estos se verán reflejados por una disminución en valores de resistividad.

En este estudio se considera 5 rangos de resistividad (Muy alto resistivo, Alto resistivo, resistivo, medianamente 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. Asimismo, 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, se ha resumido el rango de resistividades en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2: Rango de Resistividades

<b>Rango de resistividades</b>	<b>ohm.m</b>	<b>Tipo de suelo</b>	
Material muy resistivo	> 1500	Suelo desértico 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 como la técnica de razones espectrales (H/V) que utiliza registros de vibración ambiental, arreglos sísmicos lineales (MASW) para obtener registros sísmicos y los métodos eléctricos (ERT), valores de resistividad del suelo. A continuación, se describe brevemente la toma de datos.

### 2.1. Registro de Vibración Ambiental (H/V)

Para la obtención de los registros de vibración ambiental se utilizó un equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CityShark y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 6).



Figura 6: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en la ciudad de Moquegua: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.

En el área urbana de la ciudad de Moquegua, se consideró 275 registros de vibración ambiental obtenidos de manera puntual y distribuidos según la Figura 7. Para el trabajo se

procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Moquegua, a definir la distribución de los puntos de registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. Cada punto, se registra datos por un periodo de 15 minutos, lo cual permite disponer de información para su posterior análisis.

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 MQ-195 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en MQ-169, 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.

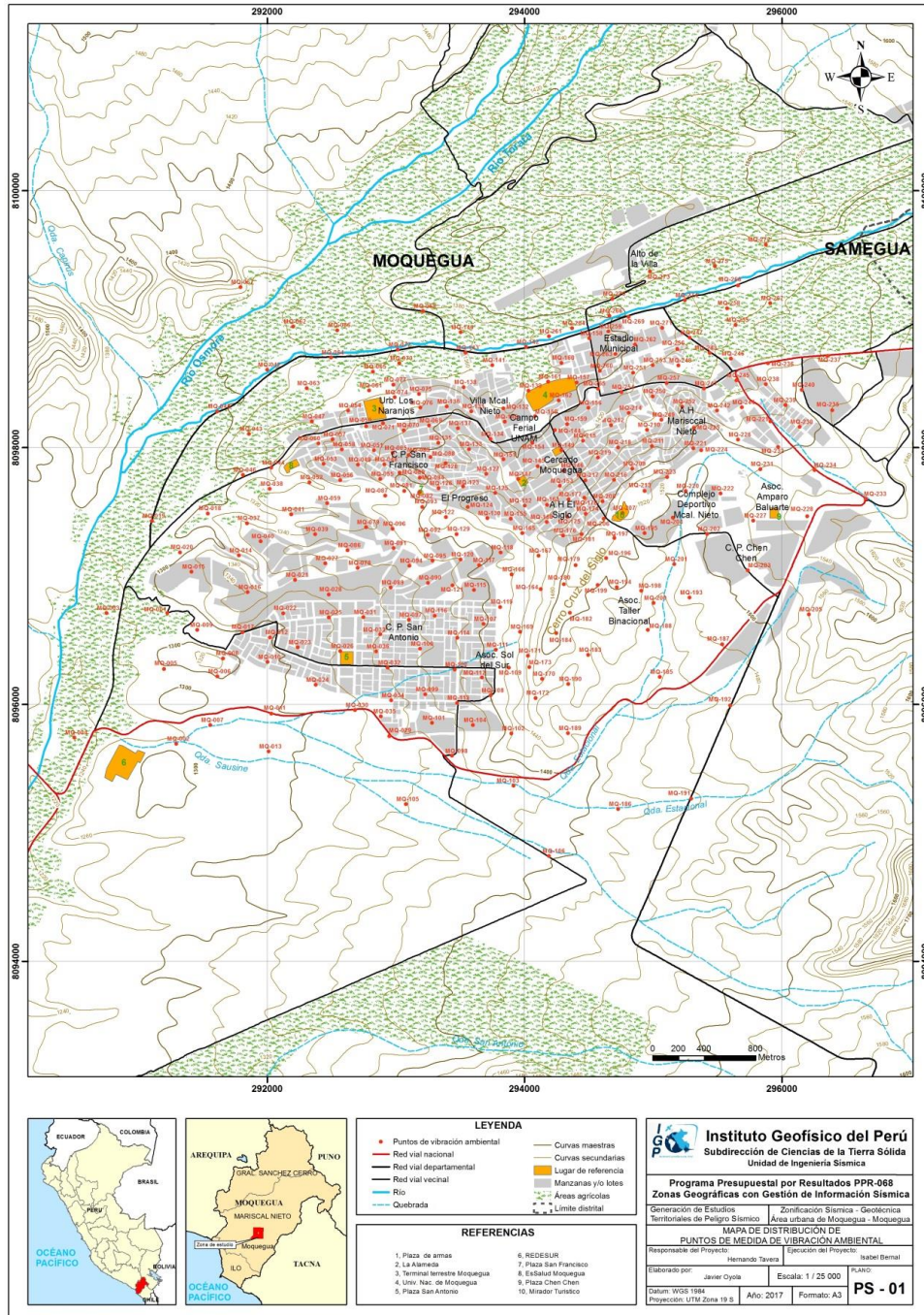


Figura 7: Mapa catastral del área urbana de la ciudad de Moquegua y la distribución de puntos donde se tomaron los registros de vibración ambiental HV.

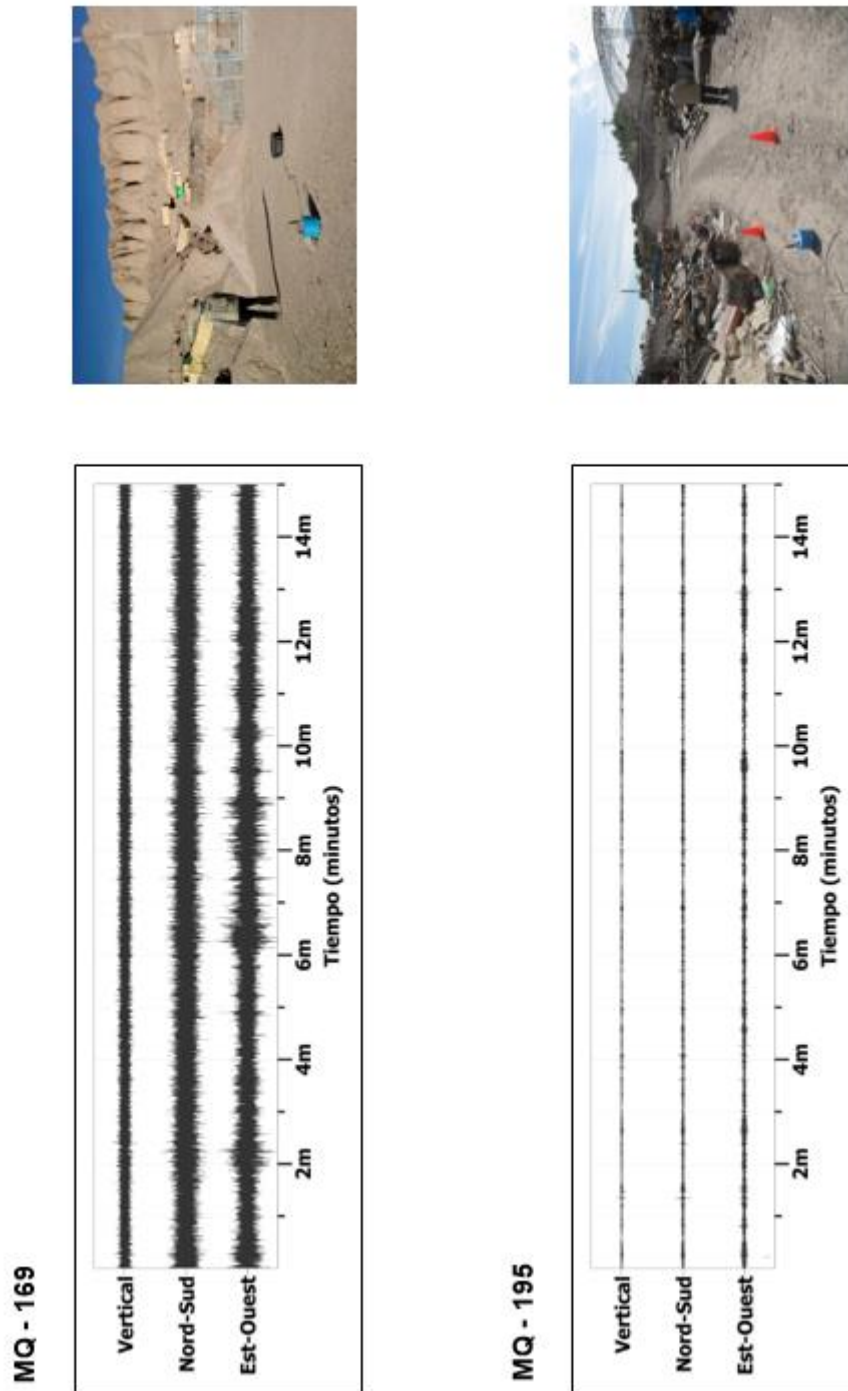


Figura 8: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (MQ-169) y otro con ruido de fondo constante (MQ-195). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada 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 y el espaciamiento 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 el área urbana de la ciudad de Moquegua se realizaron 14 arreglos lineales MASW cuyas coordenadas (UTM -WGS84) se muestran en la Tabla 3 y su distribución espacial en la Figura 10: LS01-MQ,... LS14-MQ.

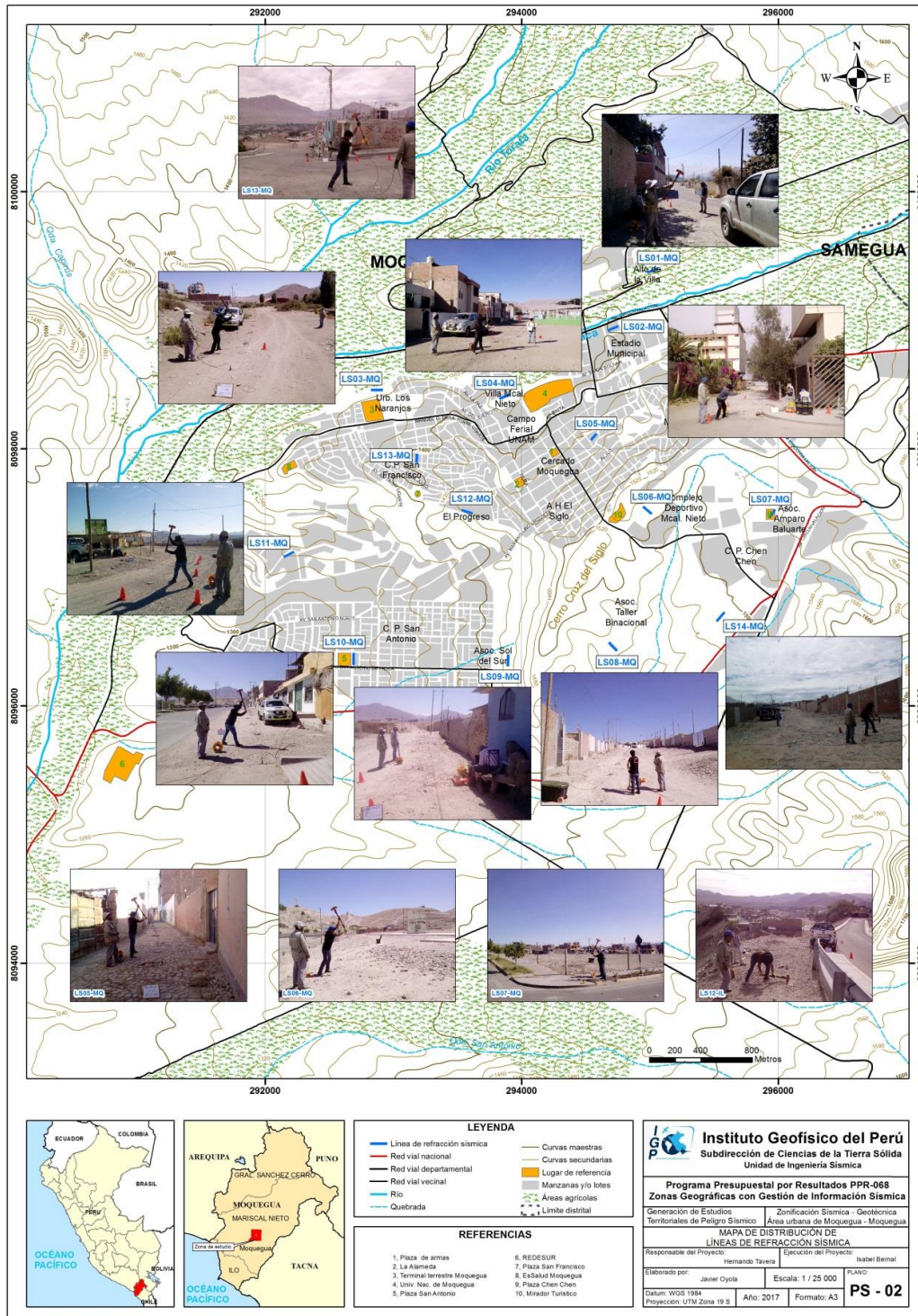


Figura 10: Mapa del área urbana de la ciudad de Moquegua y distribución espacial de las líneas sísmicas MASW codificadas como: LS01-MQ, ..., LS14-MQ.

Tabla 3: Coordenadas y características de los arreglos lineales MASW realizados en Moquegua.

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-MQ	295063	8099404	1461	4	92
	294979	8099372	1459		
LS02-MQ	294670	8098920	1405	4	92
	294753	8098954	1408		
LS03-MQ	292824	8098458	1358	4	92
	292918	8098458	1361		
LS04-MQ	293912	8098423	1379	4	92
	293827	8098390	1380		
LS05-MQ	294539	8098067	1432	3	69
	294584	8098120	1431		
LS06-MQ	295013	8097494	1517	4	92
	294945	8097550	1519		
LS07-MQ	295974	8097528	1544	4	84
	295931	8097463	1538		
LS08-MQ	294742	8096429	1471	4	92
	294679	8096494	1480		
LS09-MQ	293897	8096400	1440	4	92
	293891	8096306	1440		
LS10-MQ	292690	8096412	1341	4	92
	292690	8096318	1339		
LS11-MQ	292145	8097158	1365	4	92
	292226	8097200	1369		
LS12-MQ	293532	8097523	1451	4	92
	293618	8097499	1466		
LS13-MQ	293184	8097961	1417	3	66
	293179	8097894	1424		
LS14-MQ	295582	8096729	1498	4	92
	295550	8096693	1495		

Durante la adquisición se visualiza los datos sísmicos (sismogramas), a fin de verificar su calidad y el nivel de ruido (Figura 11). Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (sumatoria de registros sísmicos), realizando de cuatro a cinco golpes en cada punto “shot”. Finalmente, se realiza el procesamiento preliminar para determinar si la profundidad y la velocidad sísmica obtenida, tienen sentido geológico y completan la finalidad del estudio.

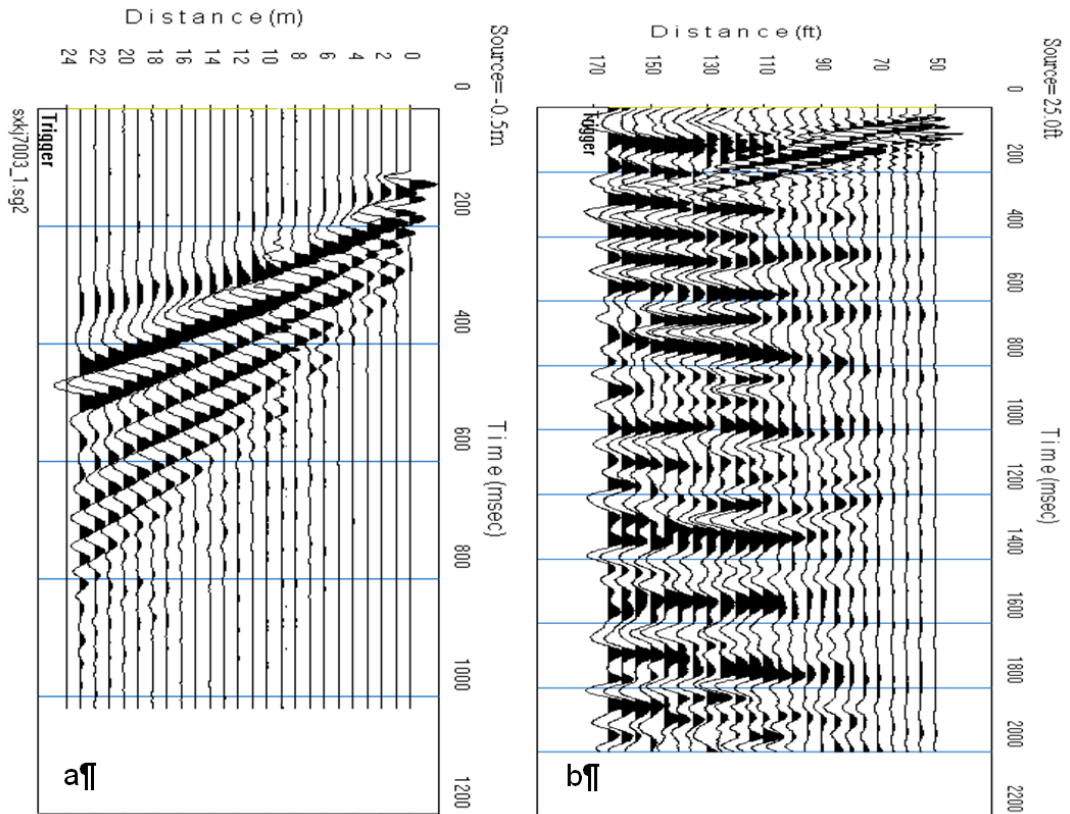


Figura 11: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental, es decir, alta calidad. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 12, se muestra como ejemplo la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LSO2-MQ, realizado próximo al Estadio Municipal. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental y registrados por sensores ubicados a lo largo de la línea considerando punto de disparo a una distancia de 6 metros al final de la línea sísmica.

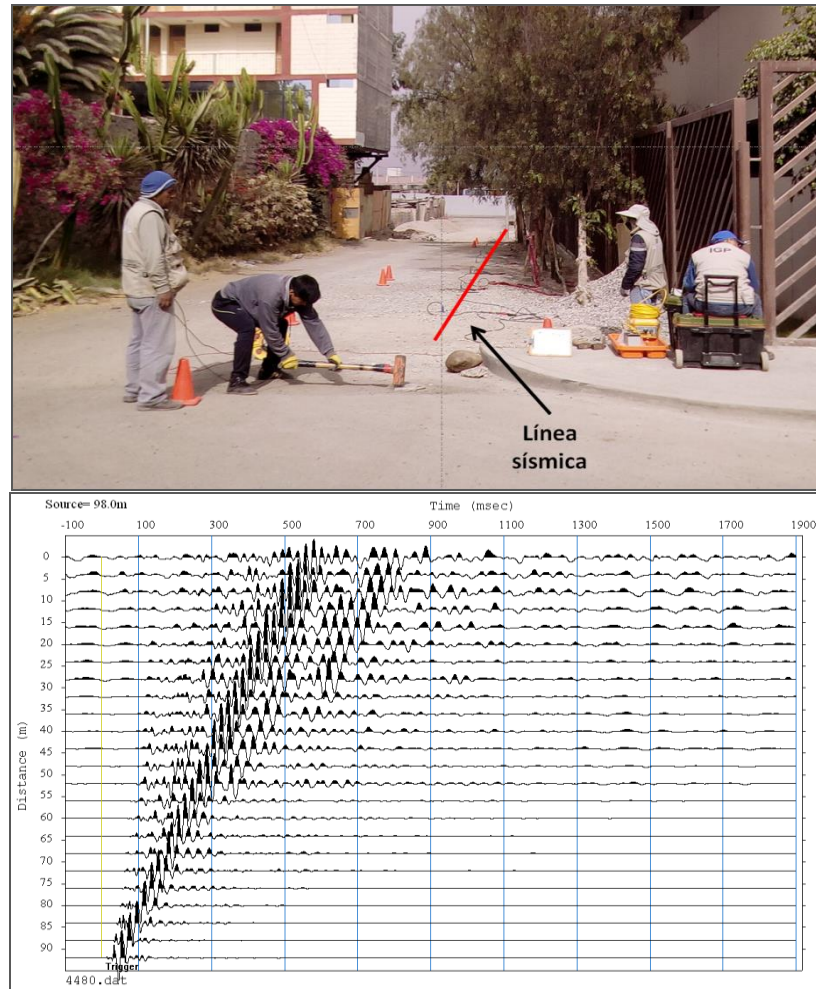


Figura 12: Disposición del equipo de adquisición por el método de MASW y el registro sísmico obtenido.

### 2.3. Registro de Resistividad del Suelo (ERT)

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

En la ciudad de Moquegua se realizó nueve (9), 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 170 y 290 metros lo cual permitió tener alcances en profundidad mayores a los 30 metros.

La Tabla 4, muestra las coordenadas UTM (WGS84) que corresponden a los puntos extremos de las líneas eléctricas.

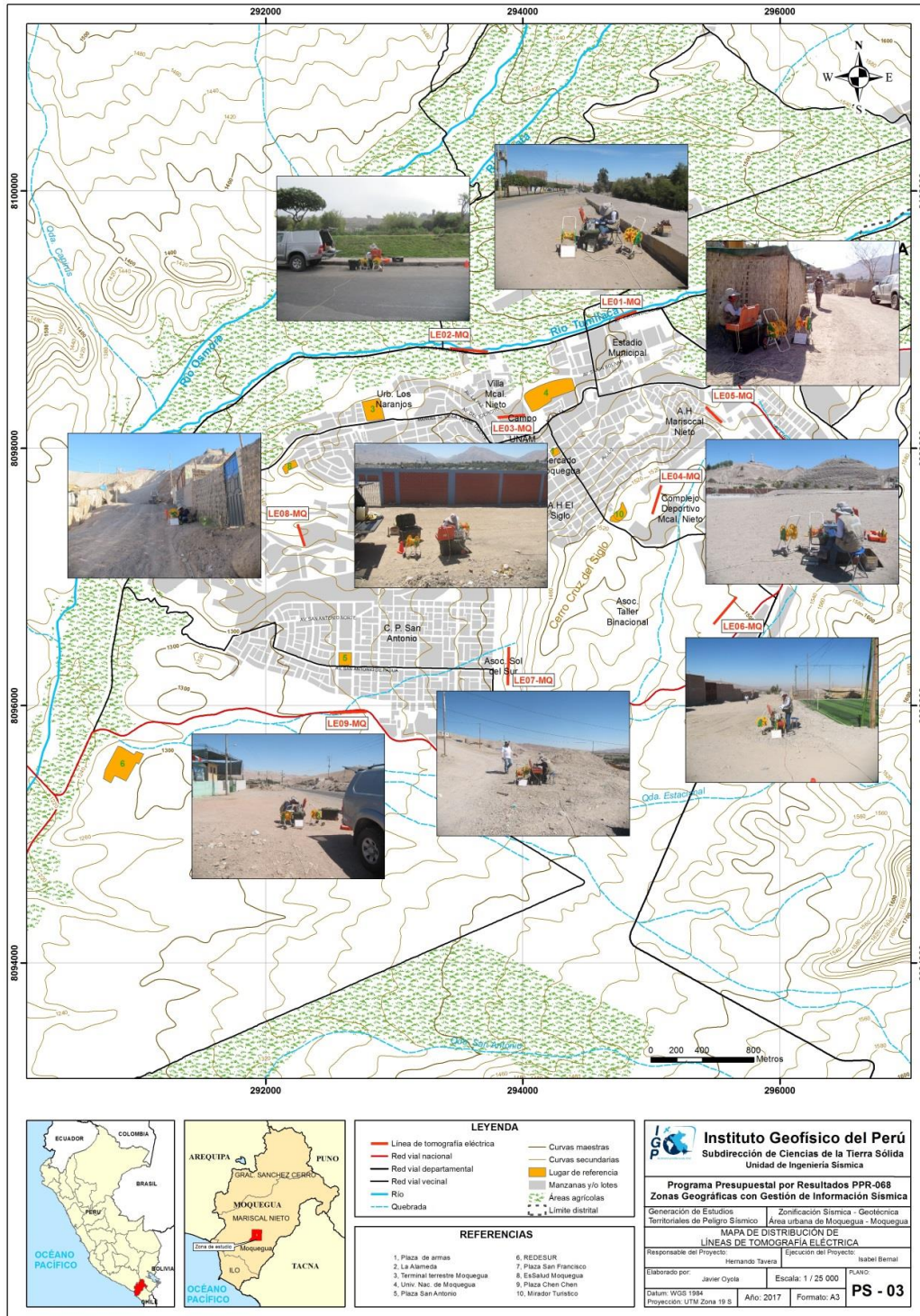


Figura 13: Mapa del área urbana de la ciudad de Moquegua y la distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-MQ, ..., LE09-MQ.

Tabla 4: Coordenadas de las Líneas eléctricas (LE) del área urbana de la ciudad de Moquegua

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01-MQ	294885	8099066	1416	10	170
	294718	8099006	1408		
LE02- MQ	293728	8098750	1375	10	290
	293431	8098778	1365		
LE03- MQ	294019	8098258	1397	10	210
	293805	8098239	1394		
LE04- MQ	295076	8097712	1519	10	230
	295007	8097487	1512		
LE05- MQ	295422	8098321	1475	10	170
	295546	8098200	1488		
LE06- MQ	295664	8096843	1511	10	270
	295484	8096633	1495		
LE07- MQ	293892	8096454	1437	10	290
	293883	8096155	1432		
LE08- MQ	292248	8097409	1345	10	180
	292304	8097237	1363		
LE09- MQ	292781	8095953	1331	10	280
	292498	8095943	1318		

La calidad de la señal eléctrica registrada se evalúa mediante un test de resistencia de contacto entre los electros y el terreno, garantizando la obtención de datos confiables para el procesamiento, donde se busca mejorar las imágenes con el uso de filtros que disminuyeran 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 consideran 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  $\Omega$ m.

En la Figura 14, se muestra la disposición del equipo eléctrico en campo y un ejemplo del análisis preliminar del registro obtenido.

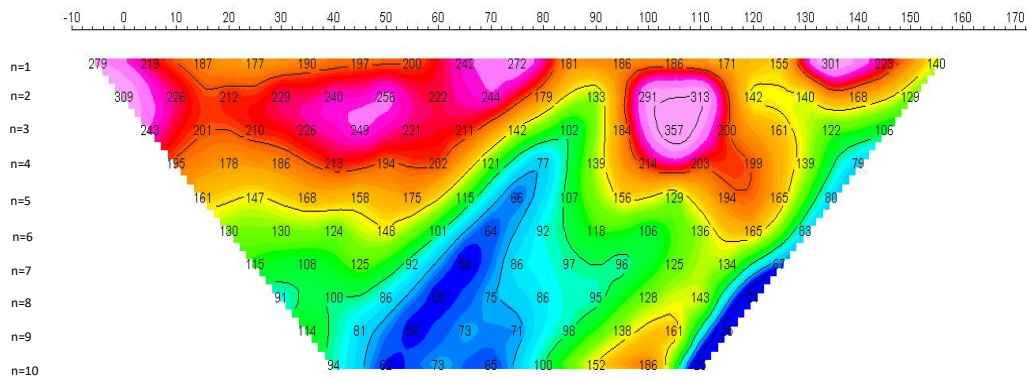


Figura 14: Disposición del equipo de adquisición por la técnica de ERT (LE01-MQ) y el registro eléctrico obtenido en campo.

### 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 el área urbana de la ciudad de Moquegua.

#### 3.1. Estudio Sísmico con la Técnica de H/V

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro de vibración ambiental obtenidos de manera puntual en 275 puntos (Figura 7) y a partir de la razón de estos (componentes horizontales con la vertical), permite conocer las frecuencias predominantes 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. Para la ciudad de Moquegua, los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permitió definir que los suelos del área urbana de Moquegua responden en dos rangos de frecuencias  $F_0$  ( $F \leq 2.0$  Hz) y  $F_1$  ( $F > 2.0$  Hz), mostrando un pico de frecuencia bien definido y en algunos puntos dos picos. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en el área urbana de la ciudad de Moquegua.

- **Frecuencia predominante  $F_0$ :** En la Figura 15, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de  $F_0$ , donde predominan frecuencias de entre 0.9 y 2.0 Hz. De forma sectorizada los valores medios a altos de  $F_0$  se encuentran presentes en dirección noreste y paralelo al río Tumilaca (estadio Municipal), del mismo modo en el C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio (principalmente al noroeste del C.P. San Antonio). Asimismo, al sureste de San Antonio (quebrada estacional) presentan valores bajos de  $F_0$ . Sin embargo, en el mercado de Moquegua en dirección este de la Plaza de Armas y en el C.P. Chen Chen, no muestra

la presencia de frecuencias predominantes; es decir, las capas de suelos no responden a dicho rango de análisis.

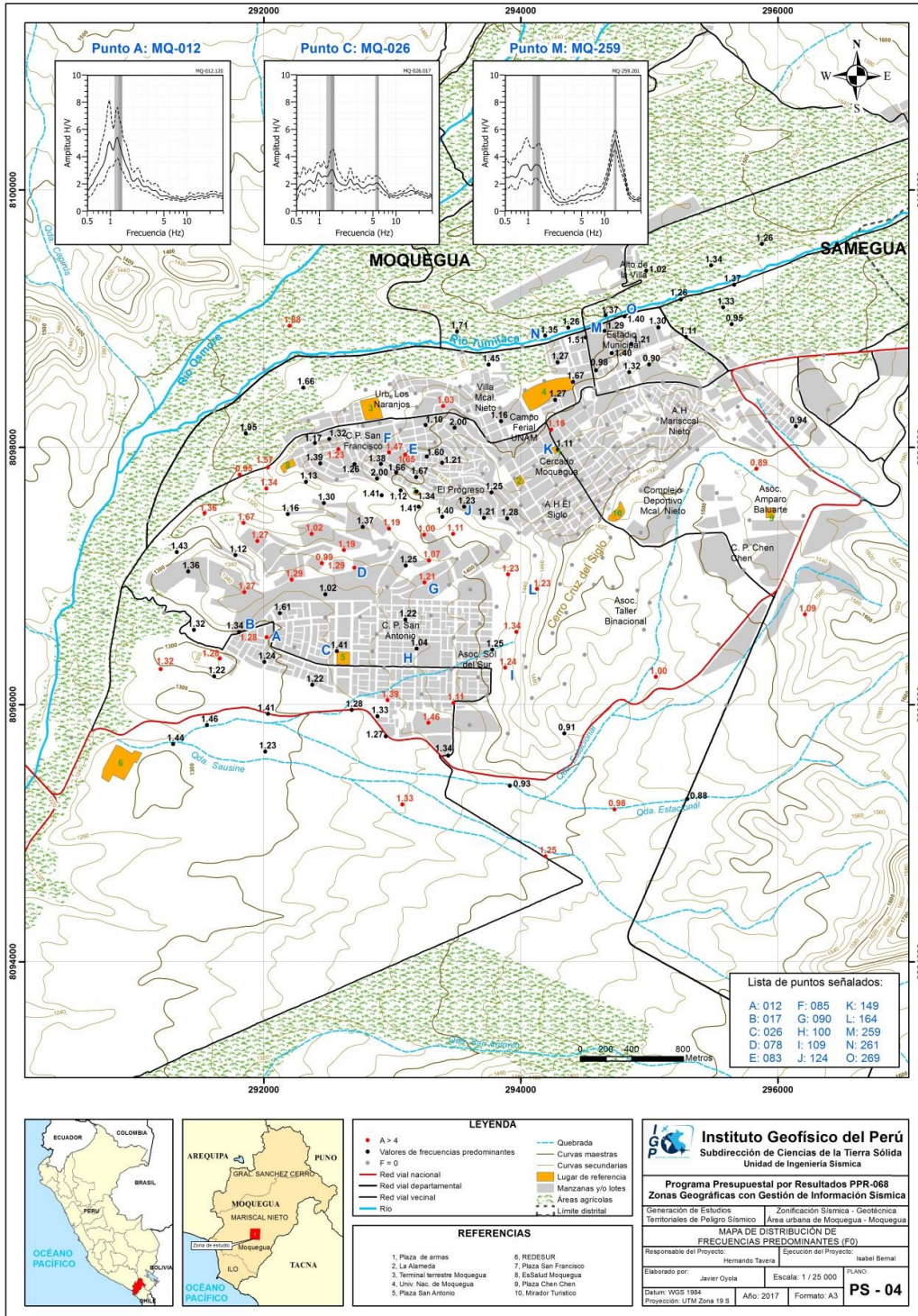


Figura 15: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_0$  ( $F \leq 2.0$ Hz). Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 16 como característicos de este rango.

En el extremo noreste de El Cercado (próximo al estadio Municipal), los puntos MQ-259(H), MQ-261(N) y MQ-269(O), presentan como frecuencia predominante de 1.29, 1.35 y 1.4 Hz con amplificaciones de 3.42, 2.82 y 2.95 veces respectivamente. Estos resultados corresponden a una capa de suelo consolidado que se encuentra en profundidad, se extiende a lo largo de la margen izquierda del río Tumilaca desde la zona de cultivo al noreste y desaparece antes de llegar a la Universidad Nacional de Moquegua.

Otra de las zonas en donde se identificó frecuencias  $F_0$  es en el C.P. San Francisco, los puntos MQ-083(E), MQ-085(F) y MQ-124(I), presentan frecuencias predominantes de 1.65, 1.47 y 1.23 Hz con amplificaciones de 4.59, 4.07 y 3.88 veces respectivamente. valores similares de frecuencia, que en la zona anterior, pero con mayor amplificación corresponderían a la misma capa de suelo emplazada en profundidad y poco consolidadas. Asimismo, un factor que aporta a la alta amplificación, es la topografía constituida de lomas y sobre el cual se encuentra dicho centro poblado.

En el caso de las razones (H/V) obtenidas para los puntos MQ-012(A), MQ-078(D) y MQ-090 (G), ubicados al oeste y al noroeste del C.P. San Antonio (límite de la zona urbana central con la zona de expansión), presentan frecuencias predominantes de 1.28, 1.29 y 1.21 Hz con amplificaciones de 5.14, 4.77 y 4.32 veces respectivamente. Los resultados sugieren la presencia de suelos poco consolidados y al igual que en el C.P. San Francisco, afloran en superficie con un rango a bajas frecuencias. De forma similar se presenta en toda la zona de expansión del C.P. San Antonio. En algunos sectores existe una respuesta en altas frecuencias ( $F_1$ ), las cuales serán descritas más adelante.

En el caso de los puntos MQ-017(B), MQ-026(C) y MQ-100(H) ubicados en la zona urbana del C.P. San Antonio, presentan frecuencias predominantes de 1.34, 1.41 y 1.04 Hz con amplificaciones de 2.83, 2.98 y 2.28 veces respectivamente. Los resultados encontrados sugieren que corresponde a los mismos suelos descritos anteriormente, pero en este caso se encuentran en profundidad y consolidados al igual que en la zona del estadio Municipal.

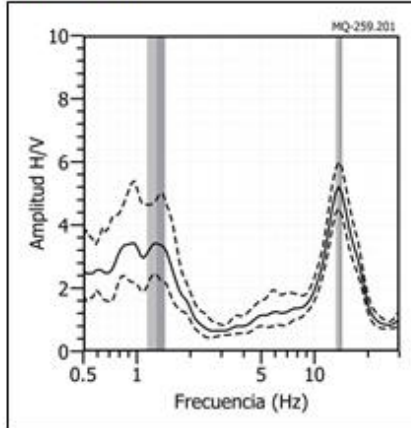
Por otro lado, al este del C.P. San Antonio (Asoc. Sol de Sur), los puntos MQ-109(I), MQ-164(K) y MQ-169(L), presentan frecuencias predominantes de 1.24, 1.23 y 1.34 Hz con amplificaciones de 4.49, 4.47 y 4.01 veces respectivamente. La forma de la razón

espectral muestra una particularidad, desplazaron el nivel cero a dos veces y con alta amplificación. En este caso podría deberse a factores topográficos, puesto que en esta zona la pendiente de la ladera es alta y para su interpretación fue conveniente realizar una corrección de nivel. Según los resultados correspondería a suelos poco consolidados.

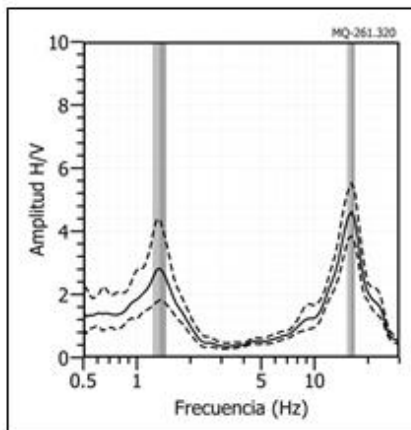
Las amplificaciones para las frecuencias  $F_0$  mayores a 4 veces se encuentran presentes con mayor densidad en el C.P. San Antonio (zonas de expansión) y en el C.P. San Francisco. Ambas zonas se encuentran formadas por lomas y colinas, además de estar constituidos de materiales finos semiconsolidados (INGEMMET, 2011), razón por el cual se presentaría altas amplificaciones.

En la Figura 16, se muestra ejemplos de las razones espectrales para los puntos MQ-012, MQ-078, MQ-090, MQ-017, MQ-026, MQ-100, MQ-109, MQ-164 y MQ-169 ubicados en el C.P. San Antonio, MQ-083, MQ-085 y MQ-124 ubicados en C.P. San Francisco y los puntos MQ-259, MQ-261 y MQ-269 al noreste del cercado de Moquegua. En algunos puntos se identifica un solo pico que corresponda a  $F_0$ , en otros puntos se adiciona un segundo pico con tendencia a mayores valores de frecuencia.

**MQ - 259**



**MQ - 261**



**MQ - 269**

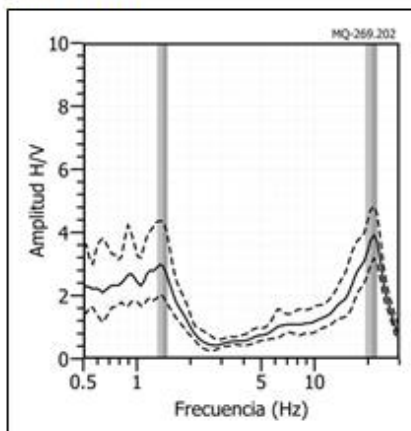
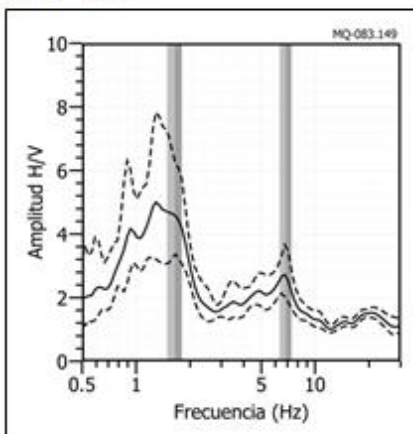
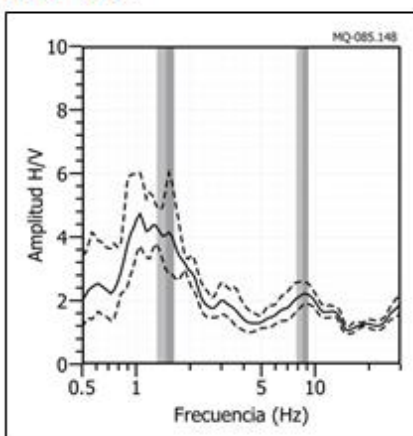


Figura 16: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ); puntos MQ-259(H), MQ-261(N) y MQ-269(O) ubicados al noreste del mercado de Moquegua. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 083**



**MQ - 085**



**MQ - 124**

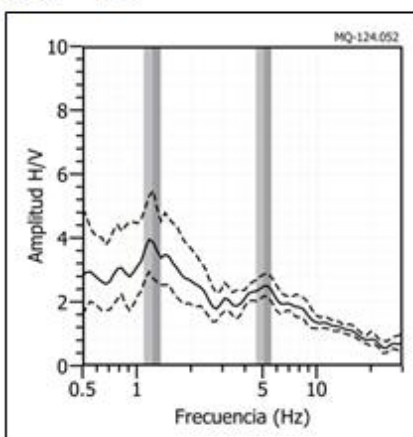
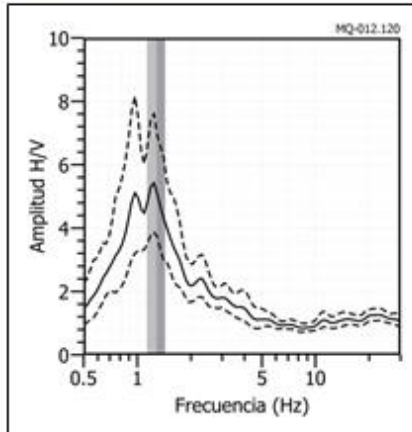
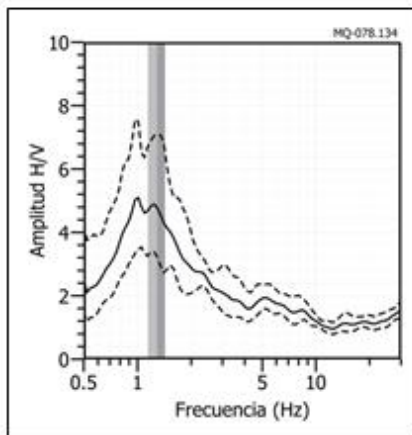


Figura 16: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-083(E), MQ-085(F) y MQ-124(J) ubicados en el C.P. San Francisco. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ- 012**



**MQ- 078**



**MQ- 090**

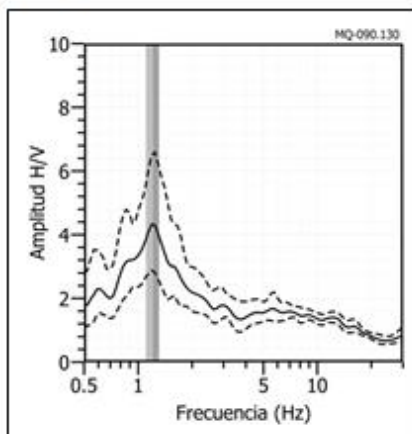
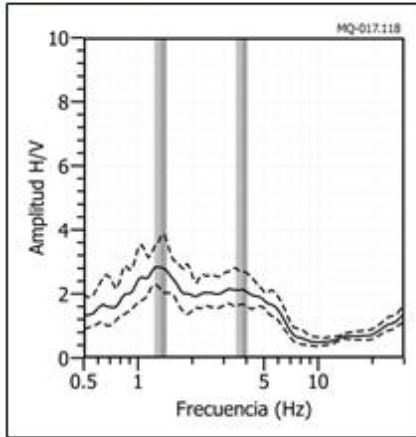
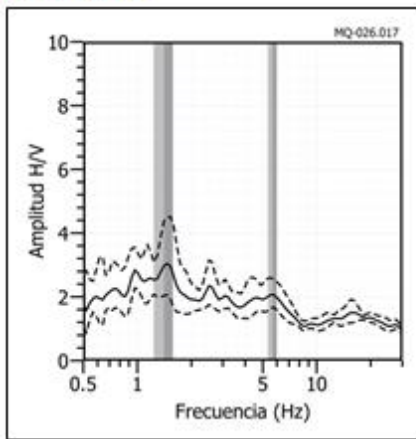


Figura 16: ...Continuación.../Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-012(A), MQ-078(D) y MQ-090(G) ubicados en el C.P. San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ--017**



**MQ--026**



**MQ--100**

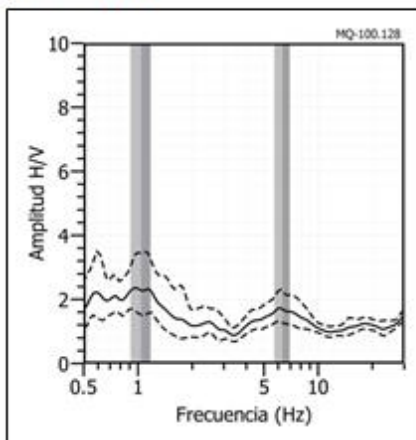
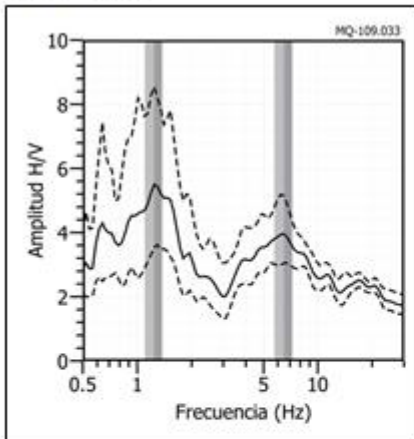
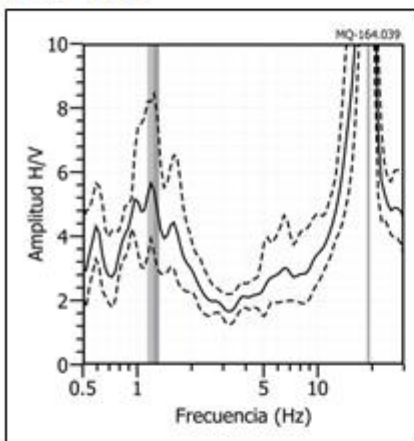


Figura 16: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango Fo ( $F \leq 2.0$ Hz): puntos MQ-017(B), MQ-026(C) y MQ-100(H) ubicados en el C.P. San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 109**



**MQ - 164**



**MQ - 169**

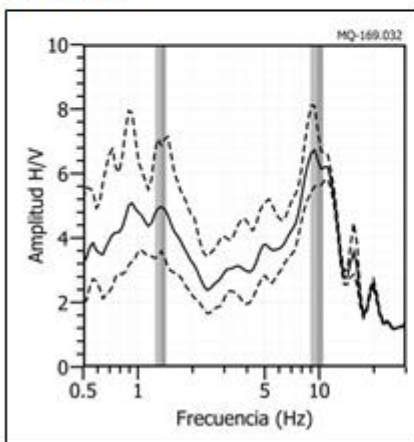


Figura 16: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F \leq 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-109(I), MQ-164(K) y MQ-169(L) ubicados en el C.P. San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencias predominantes F1:** La Figura 17, muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ), y en donde predominan frecuencias de 2.30 y 23.1 Hz. En el área urbana del C.P. San Francisco, en la zona central del C.P. San Antonio y parte del Cercado de Moquegua (Campo Ferial UNAM) predominan frecuencias bajas, que conforme se va en dirección noreste (estadio Municipal), predominan las frecuencias medias y altas. Por otro lado, frecuencias bajas, medias y de forma puntual las altas, se encontraron en el flanco del cerro Cruz del Siglo (Sector el Mirador, Asoc. Sol del Sur y Asoc. Taller Binacional) y en el C.P. San Antonio (zonas de expansión). En la Figura 18, presenta ejemplos de los gráficos de razones espectrales que caracterizan los suelos de esta ciudad en el rango de frecuencias F1.

Las razones (H/V) obtenidas para los puntos MQ-259(E'), MQ-261(F') y MQ-269(G'), ubicados paralelo al río Tumulaca (estadio Municipal), presentan frecuencias predominantes de 13.74, 16.01 y 20.96Hz con amplificaciones de 5.18, 4.58 y 3.80 veces respectivamente. Estos resultados sugieren la presencia de una capa de suelo superficial poco consolidado, que conforme se avanza hacia el noreste del estadio, podría ser de menor espesor (Figura 18).

Sin embargo, las razones espectrales obtenidas para los puntos MQ-134(M), MQ-139(N) y MQ-149(P) ubicados en El Cercado (Campo Ferial UNAM y Plaza de Armas), presentan frecuencias predominantes de 4.48, 11.99 y 3.88 Hz con amplificaciones de 1.78, 1.48 y 1.74 veces respectivamente. Estos ejemplos muestran que la zona presenta suelos bien consolidados ya que responden a una sola frecuencia con amplificación bien definida por debajo de los dos veces. De manera local, en el punto P (Plaza de Armas), el suelo responde a dos rangos de frecuencias, lo cual sugiere la presencia de dos capas de suelo, posiblemente el rango de frecuencias bajas ( $F_0$ ), corresponda a un suelo consolidado similar al encontrado en profundidad en la zona del estadio Municipal (Figura 18).

Asimismo, al este del cercado de Moquegua (A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto y Complejo Deportivo Mariscal Nieto), los puntos MQ-153(Q), MQ-242(B') y MQ-250(D'), presentan frecuencias predominantes de 6.57, 6.10, y 8.86 Hz con amplificaciones de 2.35, 2.37 y 2.08 veces respectivamente. Los resultados sugieren la presencia un suelo medianamente consolidado que se distribuye de manera uniforme por los lugares mencionados (Figura 18).

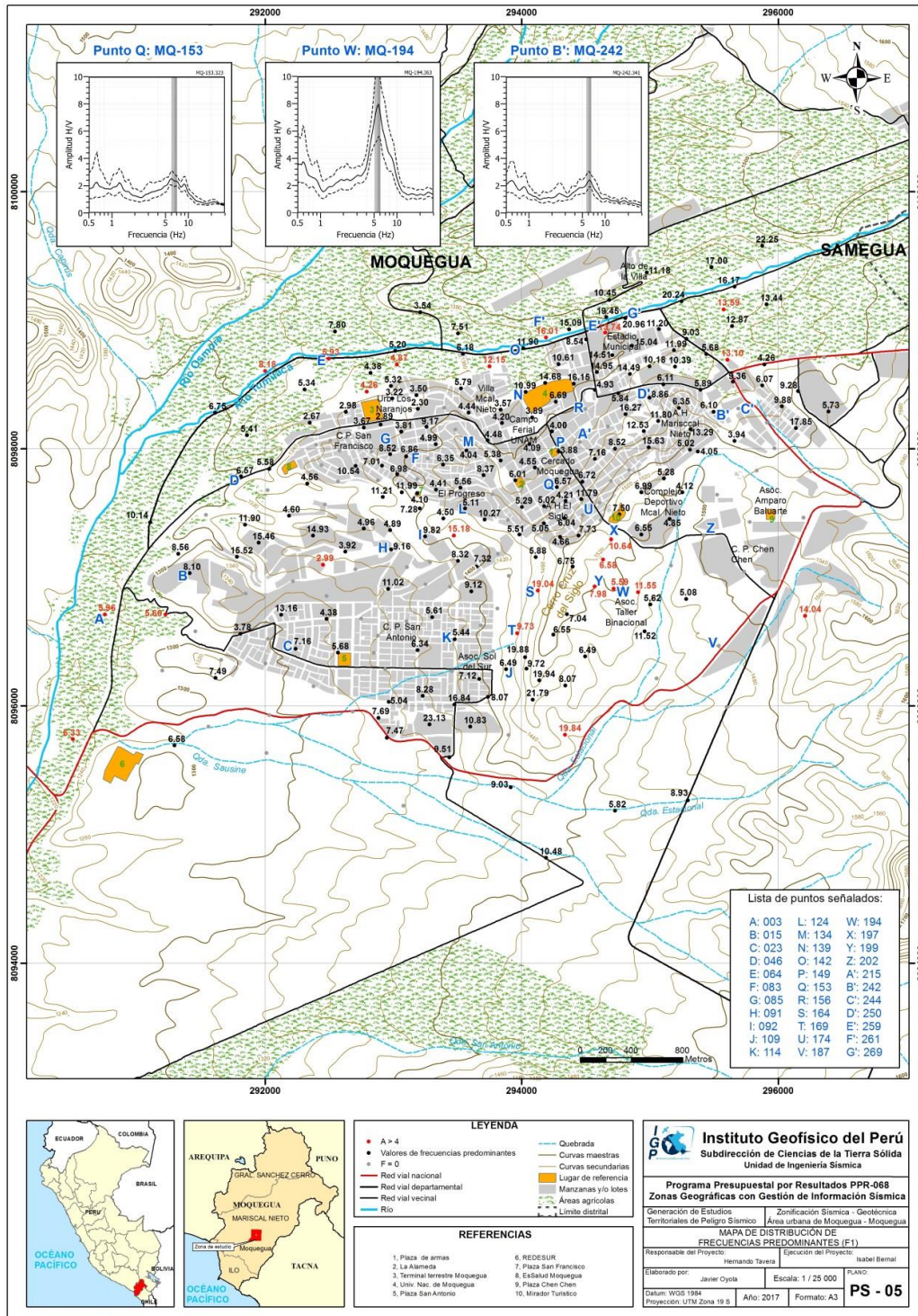


Figura 17: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 (F > 2.0 Hz). Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 18 como característicos de este rango.

Las razones espectrales que no muestran frecuencias predominantes en El Cercado, son los puntos MQ-156(R) y MQ-215(A) ubicados por el centro (próximo a la Sunat y ONP) y MQ-174(U) ubicado al pie del Mirador Turístico (A.H. El Siglo). Los resultados sugieren que son suelos bien consolidados (Figura 18).

En el caso de las razones espectrales en MQ-003(A), MQ-064 (E) y MQ-142(O), ubicados en la margen izquierda y paralelo al río Moquegua y Tumilaca (al oeste y noroeste de Moquegua), presentan el predominio de frecuencias de 5.96, 5.93 y 11.9 Hz con amplificaciones de 4.28, 4.64 y 2.99 veces. Estos puntos fueron registrados sobre suelos destruidos a cultivo, desde este aspecto, los resultados sugieren suelos poco consolidados que conforme se avanza hacia al noreste, disminuyen su espesor (punto O) (Figura 18).

En el C.P. San Francisco, los puntos MQ-083(F), MQ-085(G) y MQ-124(L), presentan frecuencias predominantes de 6.86, 8.52 y 5.11 Hz con amplificaciones de 2.66, 2.19 y 2.50 veces respectivamente. Estos resultados corresponden a una capa de suelo superficial que se encuentra emplazado sobre otra más profunda que responde a frecuencias  $F_0$ . El centro poblado se encuentra situado sobre lomas que influyen significativamente en la respuesta del suelo (Figura 18).

Las razones (H/V) obtenidas para los puntos MQ-015(B), MQ-046(D) y MQ-092(I), ubicados en la zona de expansión del C.P. San Antonio, presentan frecuencias predominantes de 8.10, 6.57 y 9.82 Hz con amplificaciones de 1.71, 2.51 y 2.36 veces respectivamente. La forma de la razón espectral sugiere la presencia de dos capas de suelo, en este caso los resultados indican la respuesta de la capa más superficial que se encuentra emplazada en una mayor parte de la zona de expansión (Figura 18).

Las razones (H/V) obtenidas para los puntos MQ-023(C), MQ-091(H) y MQ-114(K), ubicados en la zona urbana central del C.P. San Antonio, presentan frecuencias de 7.16, 9.16 y 5.44 Hz, con amplificaciones de 1.79, 2.23 y 1.52 respectivamente. Estos ejemplos muestran bajas amplificaciones, lo cual sugieren suelos superficiales y consolidados al igual que en el Cercado (puntos M, N y P) (Figura 18).

En el caso de los puntos MQ-109(J), MQ-164(S) y MQ-169(T), presentan frecuencias predominantes de 6.49, 19.04 y 9.73 Hz respectivamente con amplificaciones altas que superan hasta 4 veces en los puntos S y T. Estos suelos son poco consolidados y

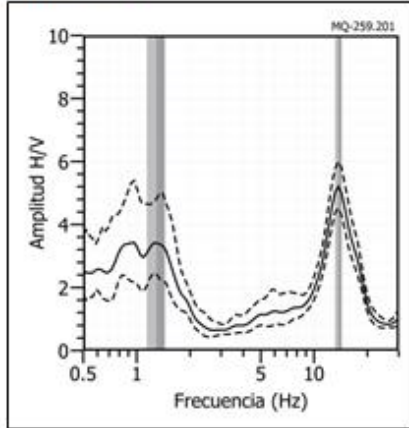
*altamente sensibles a este rango de frecuencias, pudiendo deberse a la topografía del lugar flaco noroeste del cerro Cruz del Siglo (Figura 18).*

*Las razones espectrales obtenidas para los puntos MQ-194(W), MQ-197(X) y MQ-199(Y) ubicados en el flanco sureste del cerro Cruz del Siglo (próximo al Mirador Turístico), presentan frecuencias predominantes de 5.59, 10.64 y 7.98 Hz y con amplificaciones de 7.86, 5.88 y 10.16 veces respectivamente. Los resultados muestran que corresponden a una capa superficial con características de ser un suelo muy blando. Estos valores se presentan solo en este sector (Figura 18).*

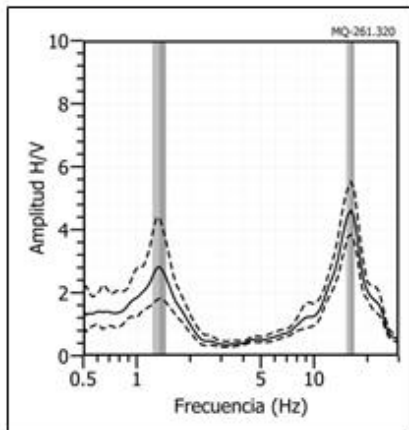
*Las razones espectrales que no muestran frecuencias predominantes, son los puntos MQ-187(V), MQ-202(Z) y MQ-244(C1) ubicados en el C.P. Chen Chen. Los resultados sugieren que son suelos bien consolidados, no presentan picos de frecuencias en el rango de investigación, pero se muestra una tendencia en el que el suelo pueda responder a frecuencias menores a 0.5 Hz (Figura 18).*

*La presencia de dos rangos de frecuencia en gran parte del C.P. San Francisco, el C.P. San Antonio (zona de expansión) y la parte noreste del Cercado de Moquegua (estadio Municipal), muestra la complejidad de estos suelos a pesar de presentar baja amplificaciones para el segundo pico. Por otro lado, la parte céntrica de El Cercado (Campo Ferial, A.H. El Siglo) presenta un pico bien definido de bajas amplificaciones al igual que en la parte central del C.P. San Antonio.*

**MQ - 259**



**MQ - 261**



**MQ - 269**

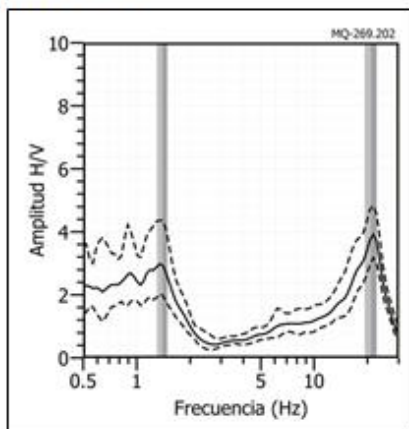
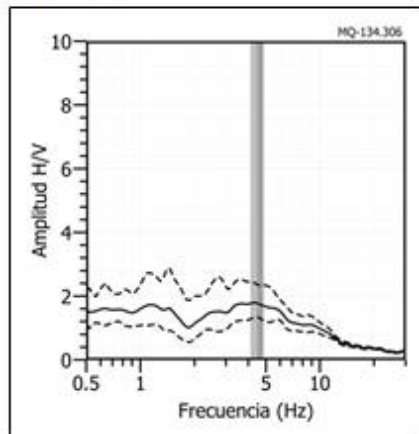
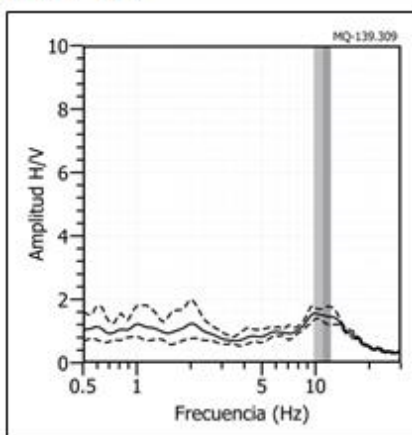


Figura 18: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-259(E1), MQ-261(F1) y MQ-269(G1) ubicados próximo al río Tumilaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 134**



**MQ - 139**



**MQ - 149**

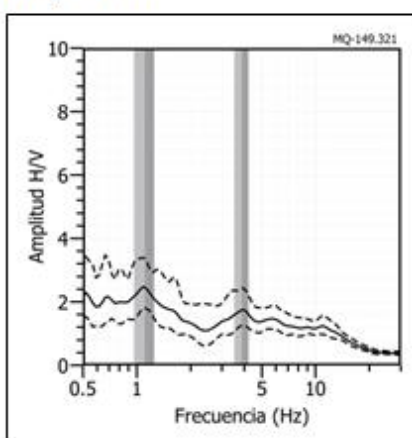
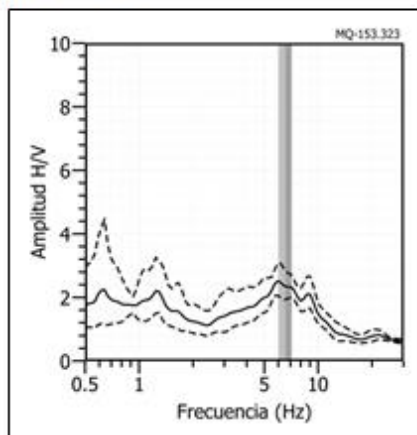
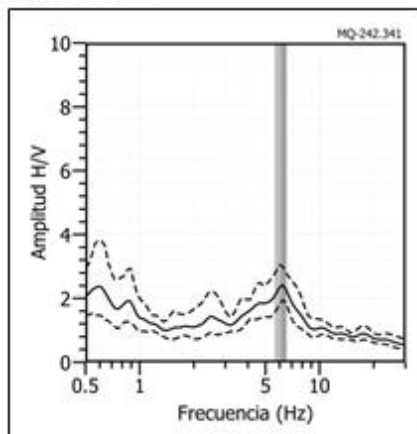


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): puntos MQ-134(M), MQ-139(N) y MQ-149(P) ubicados en el Cercado de Moquegua. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 153**



**MQ - 242**



**MQ - 250**

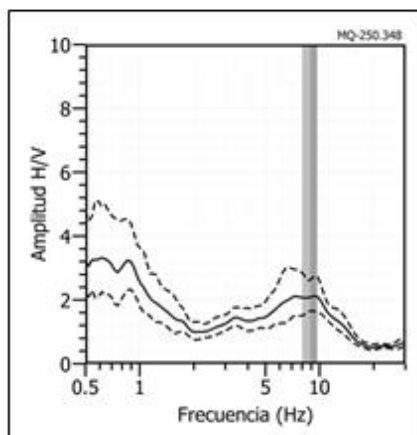
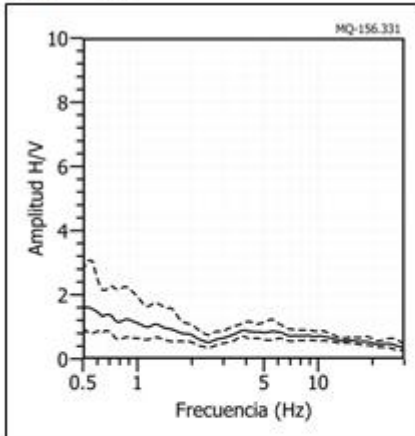
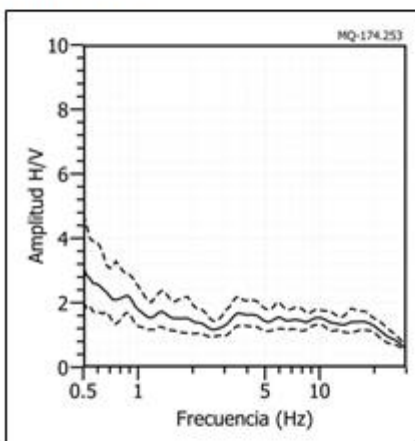


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-153(Q), MQ-242(B1) y MQ-250(D1) ubicados en el Cercado de Moquegua. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 156**



**MQ - 174**



**MQ - 215**

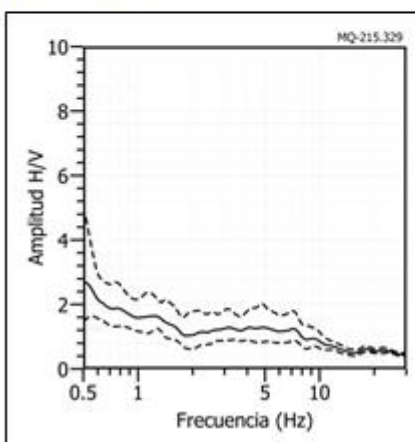
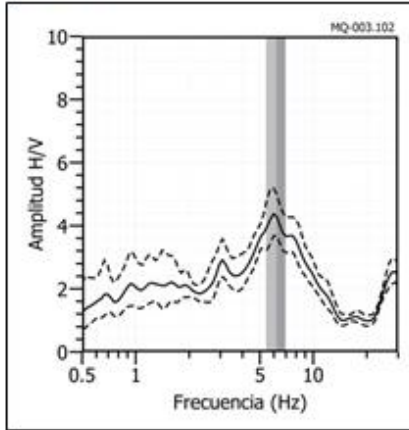
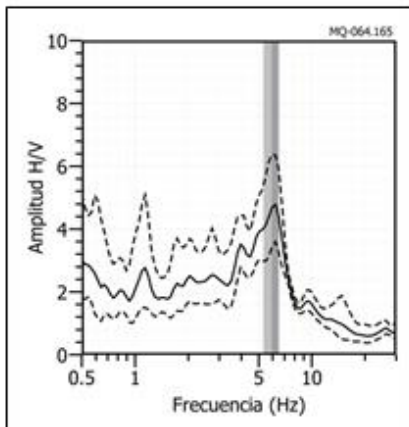


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-156(R), MQ-174(U) y MQ-215(A1) ubicados en el Cercado de Moquegua. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 003**



**MQ - 064**



**MQ - 142**

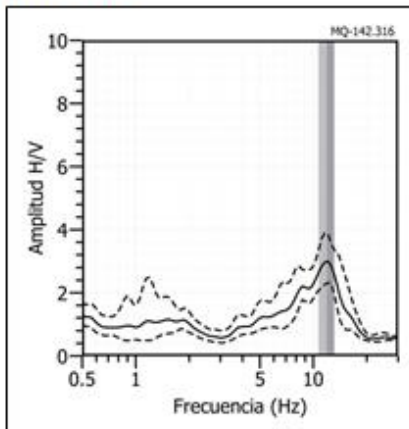
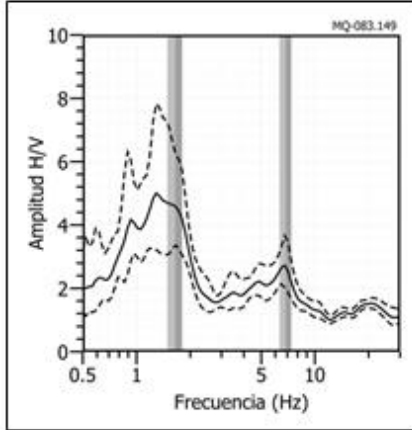
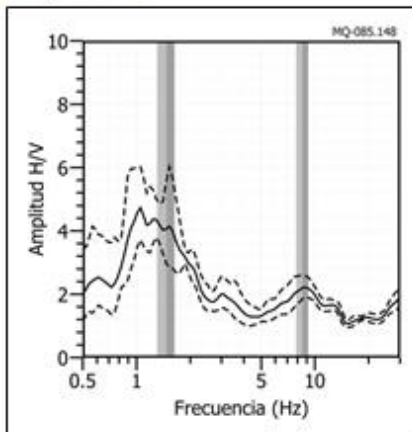


Figura 18: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-003(A), MQ-064(E) y MQ-142(O) ubicados próximo al río Moquegua y Tumilaca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 083**



**MQ - 085**



**MQ - 124**

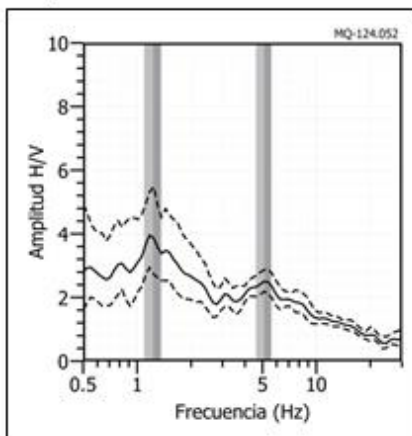
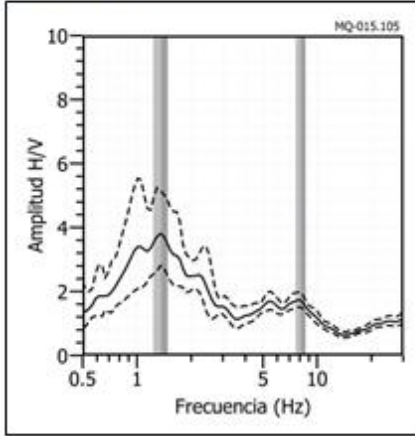
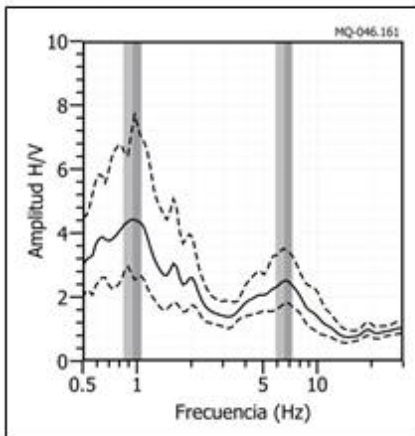


Figura 18: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-083(F), MQ-085(G) y MQ-124(L) ubicados en el C.P. San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 015**



**MQ - 046**



**MQ - 092**

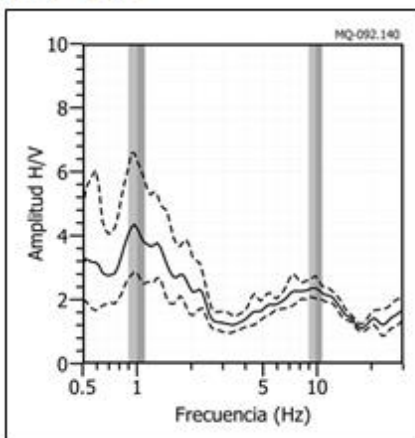
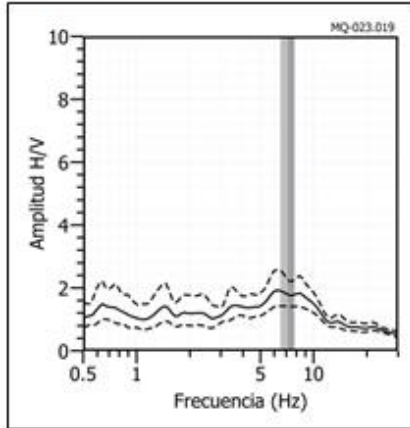
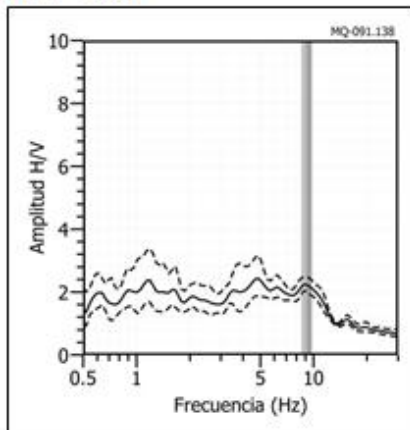


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0$ Hz): puntos MQ-015(B), MQ-046(D) y MQ-092(I) ubicados en el C.P. San Antonio (zona de expansión). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 023**



**MQ - 091**



**MQ - 114**

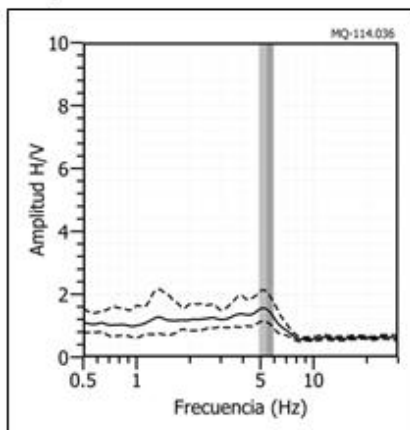
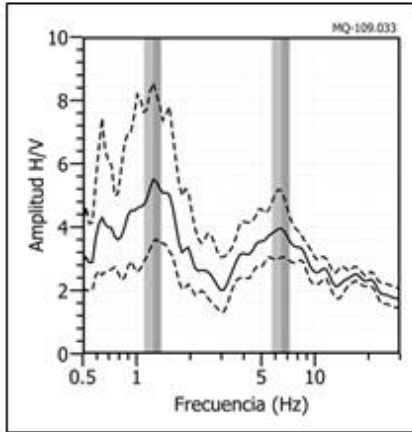
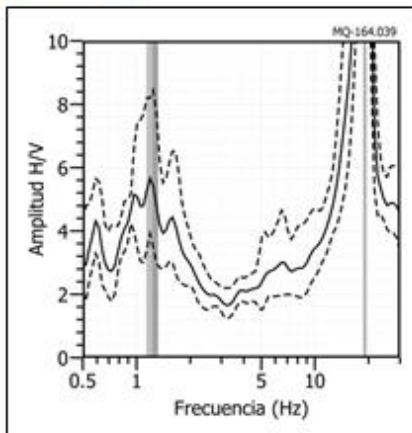


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-023(C), MQ-091(H) y MQ-114(K) ubicados en el C.P. San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 109**



**MQ - 164**



**MQ - 169**

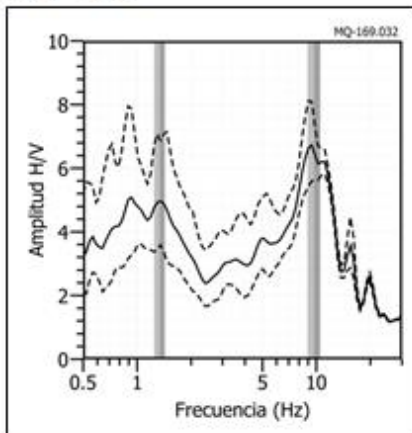
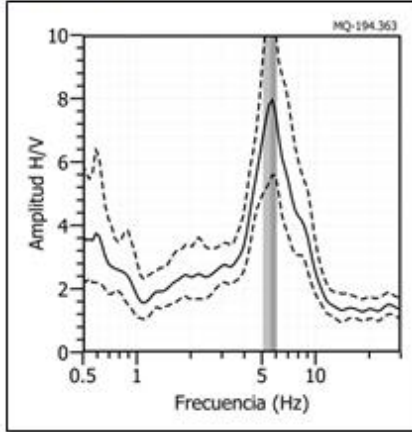
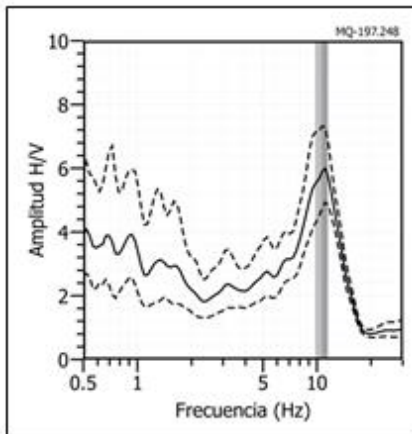


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-109(F), MQ-164(P) y MQ-169(Q) ubicados en el cerro límite C.P. San Antonio y C.P. Chen Chen. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 194**



**MQ - 197**



**MQ - 199**

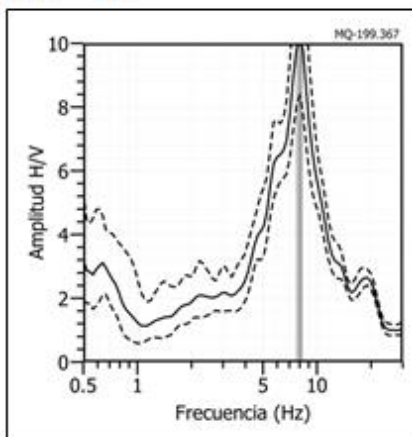
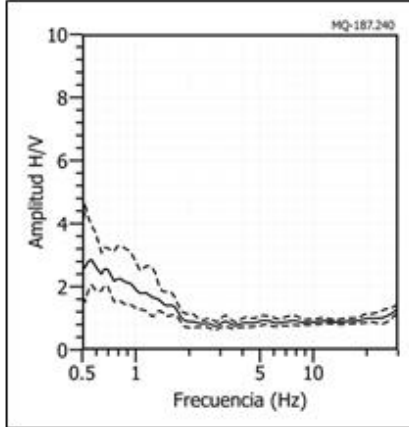
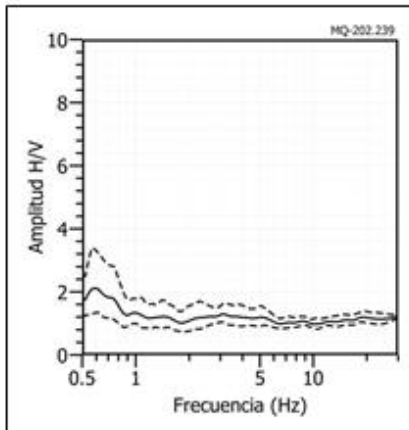


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-194(W), MQ-197(X) y MQ-199(Y) ubicados en el cerro Cruz del Siglo, próximo al mirador Turístico. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**MQ - 187**



**MQ - 202**



**MQ - 244**

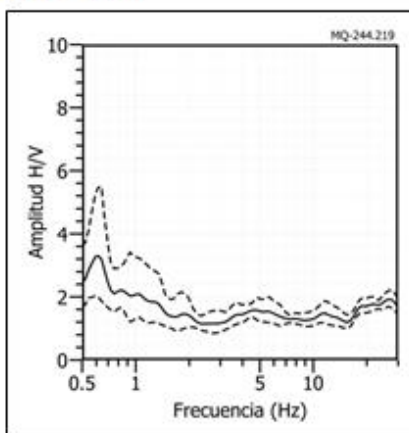


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F > 2.0\text{Hz}$ ): puntos MQ-187(V), MQ-202(Z) y MQ-244(C1) ubicados en el C.P. Chen Chen. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

## ***Interpretación***

El análisis de razones espectrales H/V en la ciudad de Moquegua ha permitido observar, dos rangos de frecuencias, F0 (0.9-2.0 Hz) presente en los C.P. San Francisco y San Antonio (zona de expansión), de igual forma al noreste del Cercado de Moquegua (Estadio Municipal). Las frecuencias F1 (>2.0 Hz) se presenta en toda la zona de estudio, con frecuencias que varían de 2.3 a 23 Hz y máximas amplificaciones mayores a 4 veces en el cerro Cruz del Siglo próximo al Mirador Turístico. La zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, se encuentra influenciada por frecuencias Fo, estas a la vez presentan máximas amplificaciones mayores a 4 veces.

La zona de estudio presenta una geomorfología, geología y/o tipo de suelo variado, de ahí la diferente respuesta que se observa de una zona a otra. Al noreste del Cercado de Moquegua (Estadio Municipal) se evidencia la presencia de dos capas de suelo, siendo la superficial de menor espesor y poco consolidada y conforme se tiende hacia sur (Plaza de Armas y Campo Ferial UNAM) la capa de suelo en superficie se encuentra consolidada y en algunos sectores muy consolidadas (la Sunat y al pie del Mirador Turístico). En el resto de las zonas del cercado de Moquegua (A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto) se identificó un suelo medianamente consolidado.

Por otro lado, en C.P. San Francisco y la zona de expansión del C.P. San Antonio- Se tiene la presencia de dos capas de suelo y por sus amplificaciones moderadas a altas, se sugiere que se encuentran poco consolidados. En este caso es necesario considerar la topografía local (constituido de lomas) ya que influyen en la respuesta sísmica. Sin embargo, la zona urbana del C.P. San Antonio presenta suelos consolidados y en algunos sectores bien consolidados, pero conforme alcanza al este de San Antonio (parte alta de la Asoc. Sol del Sur); sugiere la presencia de suelos poco consolidados y sensibles a amplificarse ante la ocurrencia de un evento sísmico.

En la ladera oriental del cerro Cruz del Siglo (Asoc. Taller Binacional y el Complejo Deportivo Mariscal Nieto), la respuesta de H/V sugiere la presencia de una sola capa de suelo consolidado y en el sector próximo al Mirador Turístico se identificó suelos poco consolidados debido a las altas amplificaciones > 4 veces. En cuanto a la zona urbana del C.P. Chen Chen, se identificó suelos consolidados en superficie, ya que no muestra la presencia de frecuencias predominantes en el rango de análisis, pero se presume que estos suelos respondan a frecuencias menores a 0.5Hz.

### 3.2. Estudio Sísmico con la Técnica de MASW

Los modelos de velocidad de propagación ( $V_s$ ) representan ser una información muy útil para el reconocimiento de la estructura y naturaleza del subsuelo. En el área de estudio, el procesamiento de datos

permitió llegar hasta los 30 metros de profundidad para cada línea sísmica. Las líneas LS01, LS02, LS04 y LS05 en El Cercado; las líneas LS03, LS12 y LS13 en el C.P. San Francisco; las líneas LS09, LS10 y LS11 en el C.P. San Antonio y LS06, LS07, LS08 y LS14 en el C.P. Chen Chen (Figura 10). A continuación, se describe los resultados obtenidos, agrupados según similitud de velocidad  $V_s$  y ubicación:

**Líneas sísmicas LS01-MQ, LS02-MQ, LS05-MQ y LS12-MQ:** Ubicadas en el sector Alto de la Villa (LS01), próximo al estadio de Municipal (LS02), P.j. Bayoneta (LS05) y en el Agrup. Vecinal el Progreso (LS12) (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 4 a 13 metros de espesor y velocidades  $V_s$  entre 285 a 312 m/s que sugieren la presencia de suelos moderadamente rígidos. La segunda, con velocidades  $V_s$  que varían entre 515 a 645 m/s, considera suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 622$  m/s; que sugiere también la existencia de suelos muy rígidos.

**Líneas sísmicas LS03-MQ:** Ubicada en la Urb. Los Naranjos (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidad  $V_s$  de 170 m/s que sugiere la presencia de suelos blandos. La segunda, con espesor de 12 metros y velocidades  $V_s$  de 336 m/s que corresponde a suelo moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 630$  m/s que sugieren la presencia de suelos muy rígidos.

**Líneas sísmicas LS04-MQ:** Realizado próximo a la Villa Mariscal Nieto (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 9 metros de espesor con velocidades  $V_s$  de 218 m/s; la segunda, con velocidades  $V_s$  de 329 m/s y el semiespacio con velocidades  $V_s > 456$  m/s. Ambas capas y el semiespacio sugiere la presencia de suelo moderadamente rígido.

**Líneas sísmicas LS06-MQ, LS07-MQ, LS09-MQ, LS10 y LS14-MQ:** Ubicadas en el Complejo Deportivo Mariscal Nieto (LS06), Asoc. Amparo Baluarte (LS07),

*Sol del Sur (LS09), en la plaza de San Antonio (LS10) y en el C.P. Chen Chen (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por dos capas: La primera de 4 a 9 metros de espesor y velocidades  $V_s$  entre 227 a 261 m/s que sugieren la existencia de suelos moderadamente rígidos. La segunda capa, con velocidades  $V_s$  entre 354 a 492 m/s y espesores de 7 a 14 metros correspondientes a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 592$  m/s, lo cual sugiere la existencia de suelos muy rígidos.*

**Líneas sísmicas LS08-MQ:** Ubicado en la Asoc. Taller Binacional (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 218 m/s y la segunda, con velocidades  $V_s$  de 348 m/s y 5 metros de espesor; ambos sugieren la existencia de suelos moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 655$  m/s que sugiere la presencia de suelos muy rígidos.

**Líneas sísmicas LS11-MQ:** Ubicado en la Asoc. Villa de la Paz (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 5 metros de espesor y velocidad  $V_s$  de 256 m/s y la segunda, con velocidades  $V_s$  de 346 m/s y 8 metros de espesor; ambos sugieren la existencia de suelos moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 489$  m/s que sugiere la presencia de suelos rígidos.

**Líneas sísmicas LS13-MQ:** Ubicadas próximo a la Parroquia San Francisco (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por una capa de 13 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 305 m/s que corresponde a suelo moderadamente rígido. El semiespacio con velocidades  $V_s > 486$  m/s sugiere la presencia de suelos rígidos.

En la Tabla 6, se resume los valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  para los distintos tipos de perfiles de suelo (Tabla 1) y en la Figura 19, se presenta los resultados obtenidos para la línea sísmica LS01. Para otras líneas, ver Anexos.

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

		Superficie <span style="font-size: 2em;">→</span> Profundidad					
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-MQ	312	4	533	9	706	-	572
LS02-MQ	285	4	645	9	785	-	619
LS03-MQ	170	4	336	12	630	-	374
LS04-MQ	218	9	329	7	456	-	314
LS05-MQ	311	11	527	12	784	-	441
LS06-MQ	254	9	492	14	775	-	405
LS07-MQ	241	4	354	9	592	-	406
LS08-MQ	218	4	348	5	655	-	461
LS09-MQ	227	4	371	7	653	-	456
LS10-MQ	261	7	417	13	722	-	411
LS11-MQ	256	5	346	8	489	-	379
LS12-MQ	307	5	515	10	622	-	484
LS13-MQ	305	13	486	-	-	-	386
LS14-MQ	242	4	415	7	599	-	457

	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)
	duro ( $V_s > 1500$ m/s)

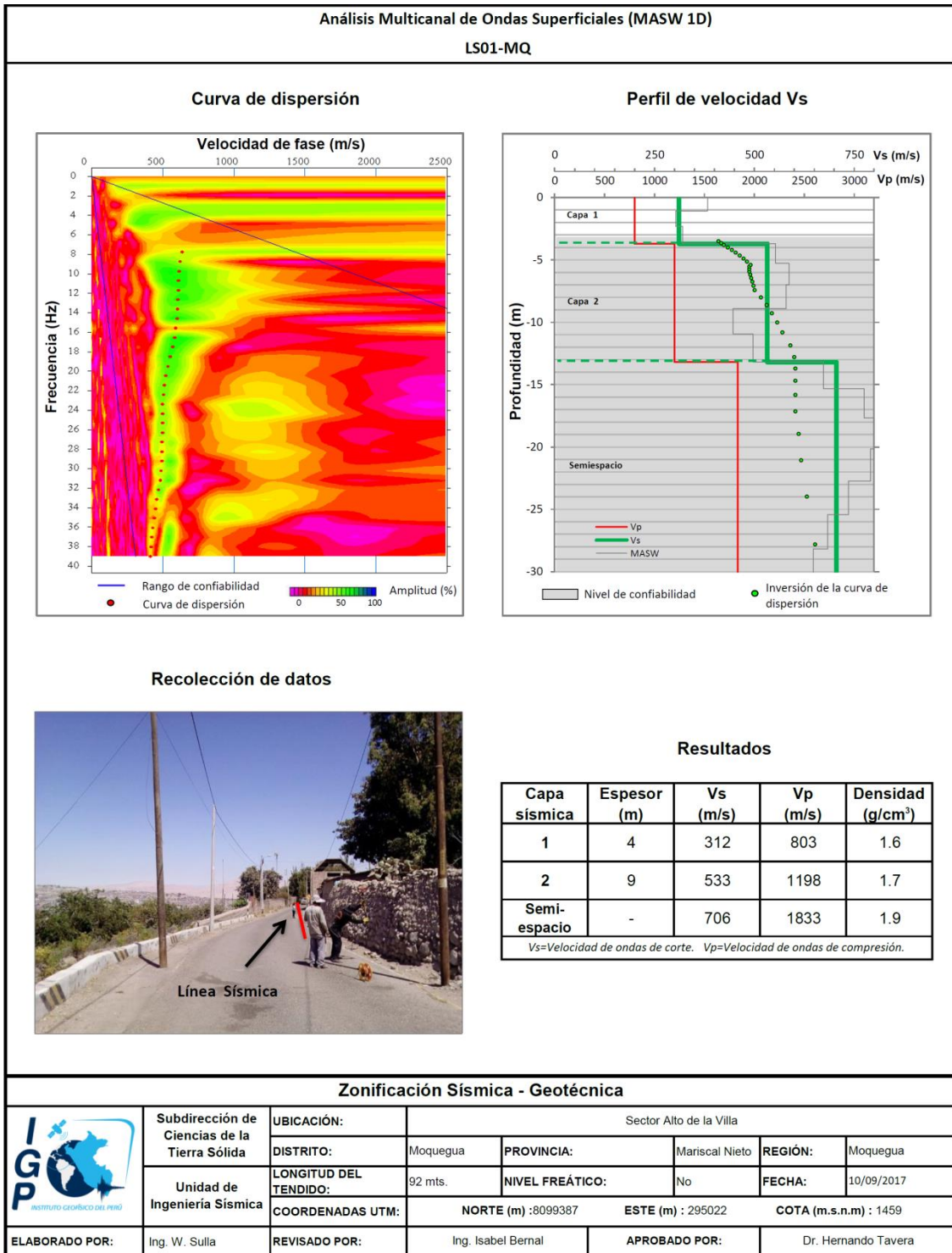


Figura 19: Resultados obtenidos con el método MASW para la línea sísmica LS01-MQ.

## Interpretación

Los resultados obtenidos con el método MASW definen la presencia de 2 capas sísmicas y un semiespacio (Tabla 5). El análisis de los resultados según cada capa sísmica identificada y su correlación con la geológica son:

El área de estudio presenta suelos moderadamente rígidos en superficie ( $V_s$  218 a 312 m/s) con espesores que varían de 4 a 16 metros, siendo los menores espesores próximos al estadio Municipal y que conforme se avanza al suroeste (Plaza de Armas) aumenta el espesor. Los máximos espesores se encuentran en el Campo Ferial UNAM y alrededores, y conforme avanza al río Tumilaca mantendría dichas características. Por debajo se encuentran suelos muy rígidos ( $V_s$  533 a 785 m/s) y cuyo emplazamiento predomina en dirección suroeste – noreste (Plaza la Alameda, Estadio Municipal). Asimismo, los suelos rígidos ( $V_s$  456 m/s) también son encontrados por debajo de la capa superficial en sectores próximos a la Villa Militar Mariscal Nieto.

De acuerdo a la geología, se sugiere la presencia de depósitos aluviales constituidos por arenas y gravas mayormente depositados próximos al río Tumilaca. Estos depósitos se encuentran sobre materiales finos y arenas consolidadas emplazados en gran parte de El Cercado de la ciudad de Moquegua y que posiblemente corresponda a la formación Sotillo o Moquegua superior (Figura 20).



Figura 20: Suelos rígidos y muy rígidos que se extienden en profundidad, emplazados por debajo de suelos moderadamente rígidos (Vista del Cercado de Moquegua desde el Mirador)

Con respecto al C.P. San Francisco, en superficie presenta suelos moderadamente rígidos ( $V_s$  305 m/s) con espesores que fluctúan entre los 5 metros en los sectores más altos (El Progreso) y conforme se avanza en dirección noroeste se

incrementa hasta los 13 metros. Por debajo de esta capa se identificó suelos muy rígidos para los sectores más altos (sector el Portillo) y hacia el noroeste suelo rígido; es decir, a medida que se avanza hacia el río Tumilaca decrece la rigidez del suelo en profundidad. Según la geología, los suelos de San Francisco se encuentran constituidos por materiales finos y arenas que correspondería a la formación Sotillo.

En el caso del C.P. San Antonio, se observa el predominio de suelos moderadamente rígidos en superficie ( $V_s$  227 a 346 m/s) con espesores variables entre 4 a 13 metros, mostrando las máximas profundidades al noroeste de San Antonio (zona de expansión urbana). Esta capa superficial suprayace a suelos rígidos ( $V_s$  371 a 489 m/s) que conforme crece en profundidad, presenta suelos muy rígidos ( $V_s > 653$  m/s). Según la geología, el C.P. San Antonio se encuentra emplazado sobre materiales finos y arenas en superficie que corresponden a depósitos poco consolidados de la Formación Sotillo. Asimismo, en la parte central de la zona urbana y alrededores (Plaza principal) presentan una morfología casi llana constituida por depósitos aluviales.

El sector próximo al río Tumilaca (Urb. Los Naranjos) se identificó suelos blandos en superficie ( $V_s$  170 m/s) con 4 metros de espesor y por debajo, suelos moderadamente rígidos y que a medida que se incrementa la profundidad pasan a suelos muy rígidos. El perfil de suelo correspondería a depósitos aluviales, siendo el estrato superficial constituido de material de cultivo (bajas velocidades) que a mayor profundidad, se encontraría más consolidados, pero con presencia de humedad.

En el caso del C. P. Chen Chen, se tiene el predominio de los suelos moderadamente rígidos en superficie ( $V_s$  218 a 254 m/s) con espesores que varían entre 4 a 9 metros, estando los de mayor espesor presentes en los sectores de la Asoc. Taller Binacional, el Mirador Turístico y el Complejo Deportivo Mariscal Nieto, con una dirección suroeste – noreste. Por debajo de esta capa suprayace suelos rígidos a muy rígidos en profundidad ( $V_s > 355$  m/s). Geológicamente, el C.P. Chen Chen, presenta suelos en superficie constituidos de material granular, siendo altamente compactos los aluviales sobre el cual se encuentra asentado la zona urbana, a diferencia del flanco sureste del cerro Cruz del Siglo (Asoc. Taller Binacional y el complejo deportivo Mariscal Nieto) constituidos de depósitos de gravas y arenas poco consolidados que corresponden a la Formación Moquegua Superior.

### 3.3. Periodos Dominantes

Los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes a fin de construir el mapa de periodos y para ello 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 21, se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Moquegua, los cuales han sido separados en dos grupos, de color negro para periodos menores a 0.5 segundos y en gris los periodos mayores. Para ambos grupos, en color rojo, se muestra los periodos con amplitudes mayores a 4.

Para el primer grupo, los periodos con rangos de 0.1 y 0.2 segundos se distribuyen de manera casi uniforme en toda la ciudad de Moquegua; muestra que de manera sectorizada los periodos de 0.2 y 0.3 segundos en el Cercado (Campo Ferial UNAM y Plaza de Armas) y hasta 0.4 segundos en el C.P. San Francisco (Terminal Terrestre de Moquegua). Asimismo, la zona de estudio también presenta sensibilidad a periodos que corresponden al segundo grupo, de 0.6 a 1.0 segundos en el C.P. San Francisco y en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio. Al noreste del Cercado de Moquegua (Estadio Municipal), los suelos presentan sensibilidad a periodos de 0.7 a 1.0 segundos. Las mayores amplificaciones, para ambos grupos, se presentan en la zona de expansión del C.P. San Antonio, la zona entre el Mirador Turístico y la Asoc. Taller Binacional; además de sectores puntuales en el C.P. San Francisco y próximos al río Tumulaca

Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de la ciudad de Moquegua 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 las ondas de corte. Asumiendo velocidades de 300 m/s, 250 m/s y 200 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.1, 0.2 y 0.3 segundos, se estima la existencia de una capa superficial con espesores de entre 8, 13 y 15 metros. Los resultados muestran que los mayores espesores. Para las capas está en la zona próxima al Campo Ferial UNAM y la zona, entre el terminal Terrestre y el río Tumulaca (C.P. San Francisco). Estos espesores de capas de suelo, son confirmados con los modelos de velocidad y espesores obtenidos con los arreglos sísmicos (ver punto 3.2). Del mismo modo, al considerar periodos de 0.6, 0.8 y 1.0 segundos, las capas del suelo varían entre 45 a 50 metros de espesor y se encuentran emplazados en la zona de expansión del C.P. San Antonio y C.P. San Francisco, por debajo de una capa de

suelo superficial. Sin embargo, en gran parte del Cercado de la ciudad de Moquegua, y en la zona céntrica del C.P. San Antonio, no se tiene respuesta para esta segunda capa.

En el C.P. Chen Chen, no se ha identificado periodos predominantes en el rango de análisis y según la forma de las razones espectrales, se considera la existencia de capas de suelos con grandes espesores bien consolidados y que podrían responder a periodos más altos.

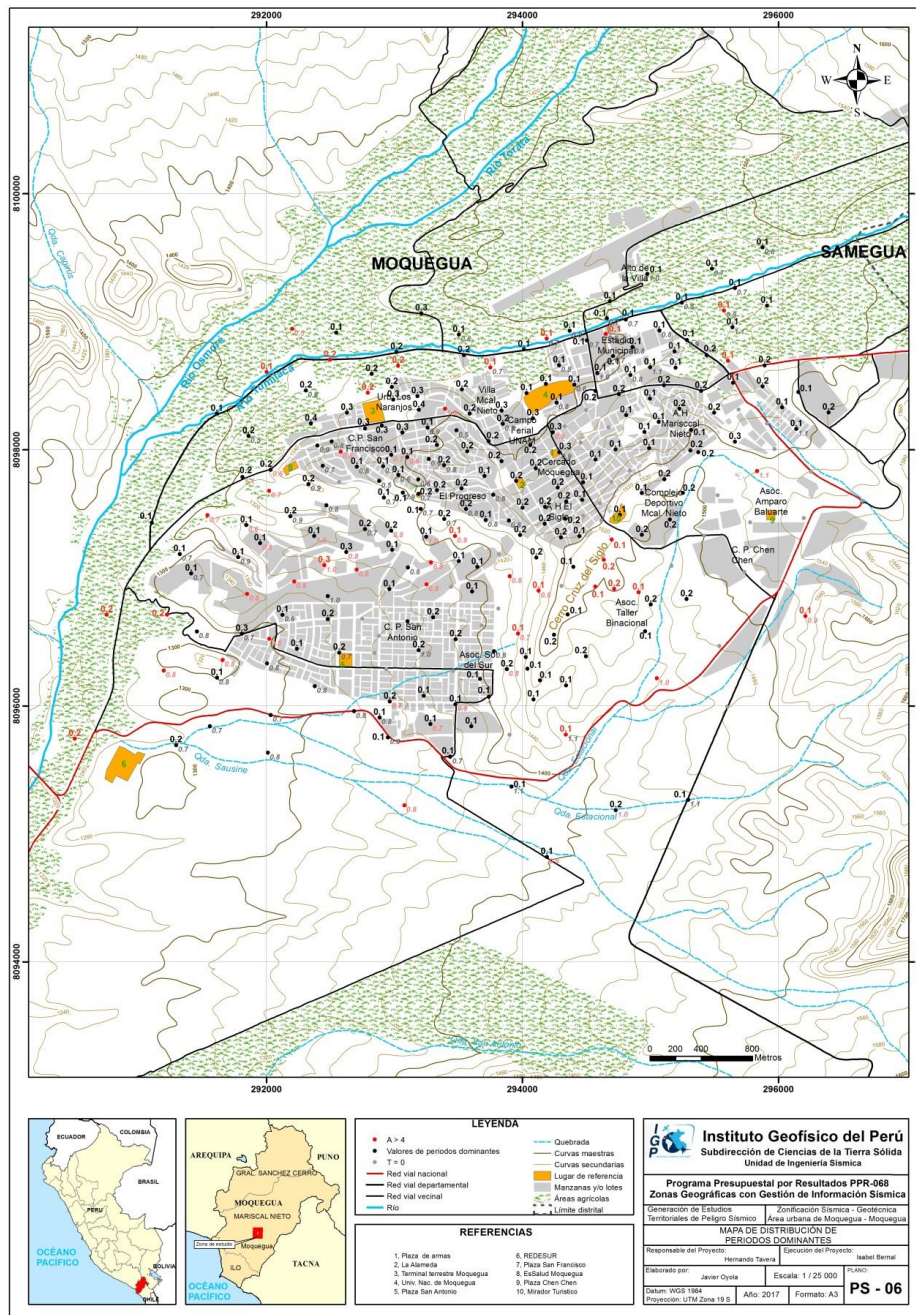


Figura 21: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

### 3.4. Estudios Eléctricos con la Técnica ERT

A continuación, se describe los resultados obtenidos con el método de tomografía eléctrica realizados en el área urbana de la ciudad de Moquegua:

**Las líneas eléctricas LE01-MQ y LE02-MQ**, se encuentran ubicadas paralelas al río Tumilaca, en la Av. Circunvalación (LE01) y en sector Los Chirimoyos (LE02) (Figura 22). En estas zonas se identificaron valores medianamente resistivos en superficie ( $> 100 \Omega.m$ ), sugiriendo que corresponderían a la presencia de gravas de diversos tamaños utilizadas en la canalización de la ribera del río; además de la presencia de materiales bajo resistivos a muy bajo resistivos conforme se incrementa la profundidad (sector Los Chirimoyos), lo cual sugiere la presencia de niveles freáticos y se corroboraría con las calicatas realizadas en la zona (ver Anexo).



Figura 22. Vista de las líneas eléctricas LE01-MQ y LE02-MQ.

**Las líneas eléctricas LE03-MQ y LE05-MQ**, realizada en el campo Ferial y en el A.H. Mariscal Nieto respectivamente (Figura 23). En ambos se identifica valores medianamente resistivos en superficie ( $> 100 \Omega.m$ ). La línea LE03 sugiere la presencia de depósitos con bajo contenido de humedad que a medida que incrementa en profundidad, presenta valores menores a los  $20 \Omega.m$ , lo que sugiere la existencia de depósitos constituidos principalmente de arenas, arcillas

y limos. Asimismo, en la línea LE05 predomina los valores bajo muy bajo resistivos que sugiere la presencia de depósitos arenas y gravas con probable contenido de humedad.

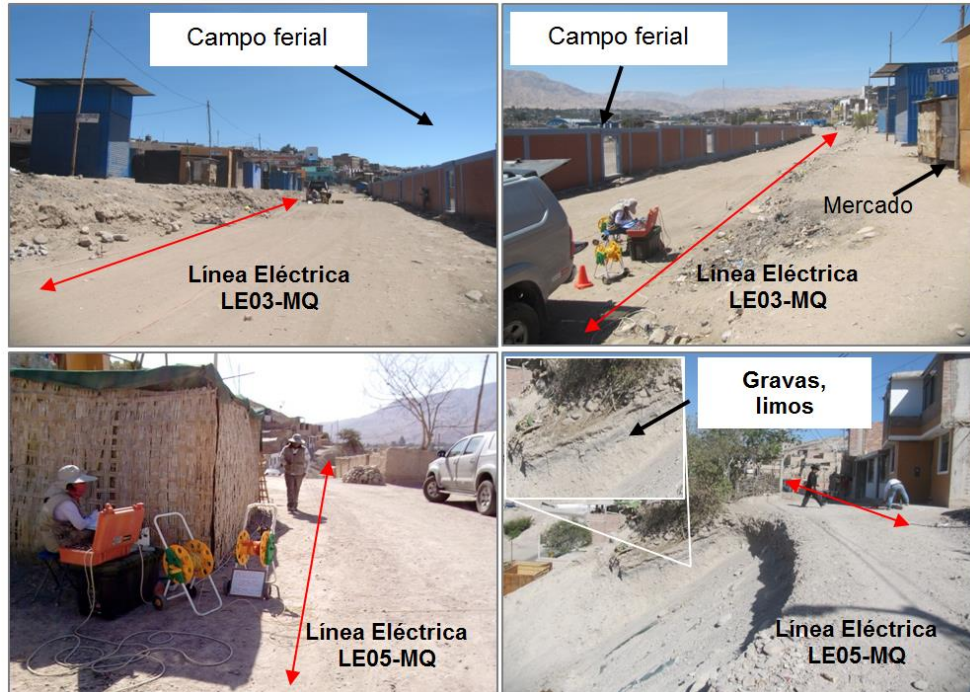


Figura 23: Vista de las líneas eléctricas LE03-MQ y LE05-MQ.

**Las líneas eléctricas LE04-MQ y LE06-MQ** ubicadas en el complejo deportivo Mariscal Nieto y en la zona urbana del C.P. Chen Chen, respectivamente (Figura 24). En estas áreas predominan los valores medianamente resistivos y en algunos niveles de manera puntual, bajo resistivos. Estas líneas eléctricas fueron tomadas sobre depósitos constituidos de gravas y arenas con mínima probabilidad de saturación que corresponden a la formación Moquegua Superior (LE04) y a depósitos aluviales (LE06).

**Las líneas eléctricas LE07-MQ y LE09-MQ**, realizada en la Asoc. Sol del Sur y en la Av. Circunvalación, ambos lugares se encuentran en el C.P. San Antonio (Figura 25).

**La línea eléctrica LE07-MQ**, realizada presenta dos horizontes; el primero con resistividades  $> 100 \Omega.m$  y el segundo con resistividades  $< 100 \Omega.m$ . En la línea LE09 predominan los valores bajo a muy bajos resistivos y pueden deberse a la influencia de los terrenos de cultivo que se encuentran próximos a las líneas, como también a la presencia de estanques (ver Anexo).

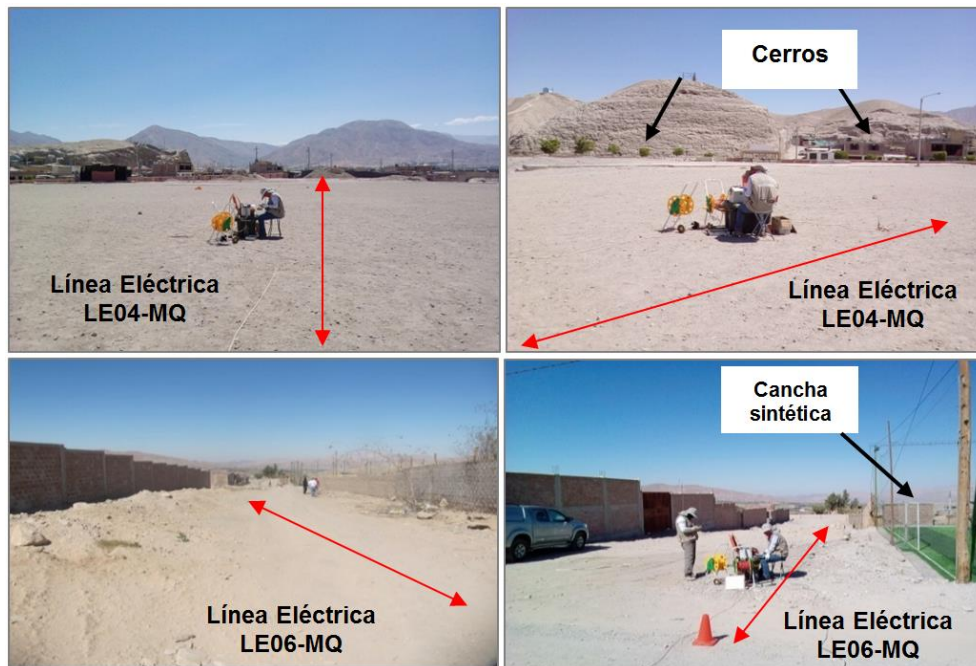


Figura 24: Vista de las líneas eléctricas LE04-MQ y LE06-MQ.

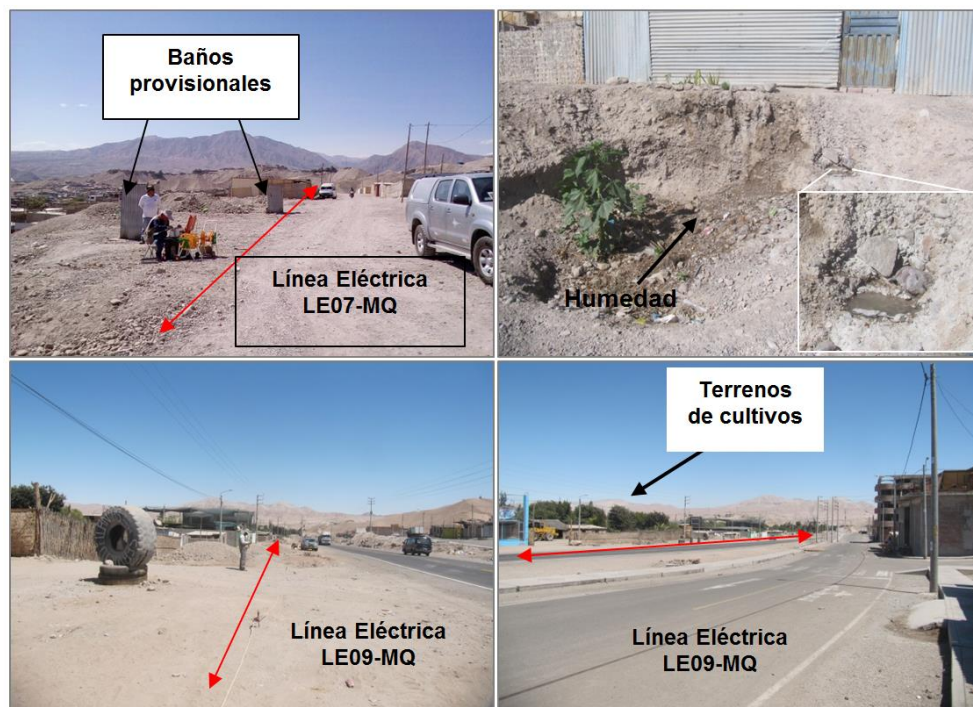


Figura 25: Vista de las líneas eléctricas LE07-MQ y LE09-MQ.

**Línea eléctrica LE08-MQ**, realizada en el C.P. San Antonio y en el cual predominan materiales medianamente resistivos a lo largo de la línea y en forma aislada, materiales bajos y muy bajo resistivos (Anexo). El material es

caracterizado de arenas y limos que corresponden a la formación Sotillo (Figura 26).



Figura 26: Vista de las líneas eléctricas LE08-MQ.

### Interpretación

En la Tabla 6, se muestra la orientación, profundidad alcanzada en el estudio y la saturación del medio, y en la Figura 27, los resultados obtenidos para la línea LE01–MQ..., LE09. En los Anexos se presenta los resultados para las otras líneas.

Tabla 6: Profundidad y presencia o no de medios saturados de las líneas eléctricas en el área urbana de la ciudad de Moquegua.

Línea Eléctrica	Orientación	Profundidad de alcance (m)	Horizontes geoelectrónicos	Saturación
LE01-MQ	NE-SO	39		NP
LE02- MQ	NE-SO	39		P
LE03- MQ	E-O	39	Horiz. 1 (21-223 $\Omega$ .m)	P
			Horiz. 2 (1-20 $\Omega$ .m)	P
LE04- MQ	E-O	39		P
LE05- MQ	NO-SE	39		P
LE06- MQ	NE-SO	39		P
LE07- MQ	N-S	39	Horiz. 1 (109-1500 $\Omega$ .m)	NP
			Horiz. 2 (1-108 $\Omega$ .m)	P
LE08- MQ	NO-SE	39		P
LE09- MQ	NO-SE	39		P

Np= no saturado, P = saturado

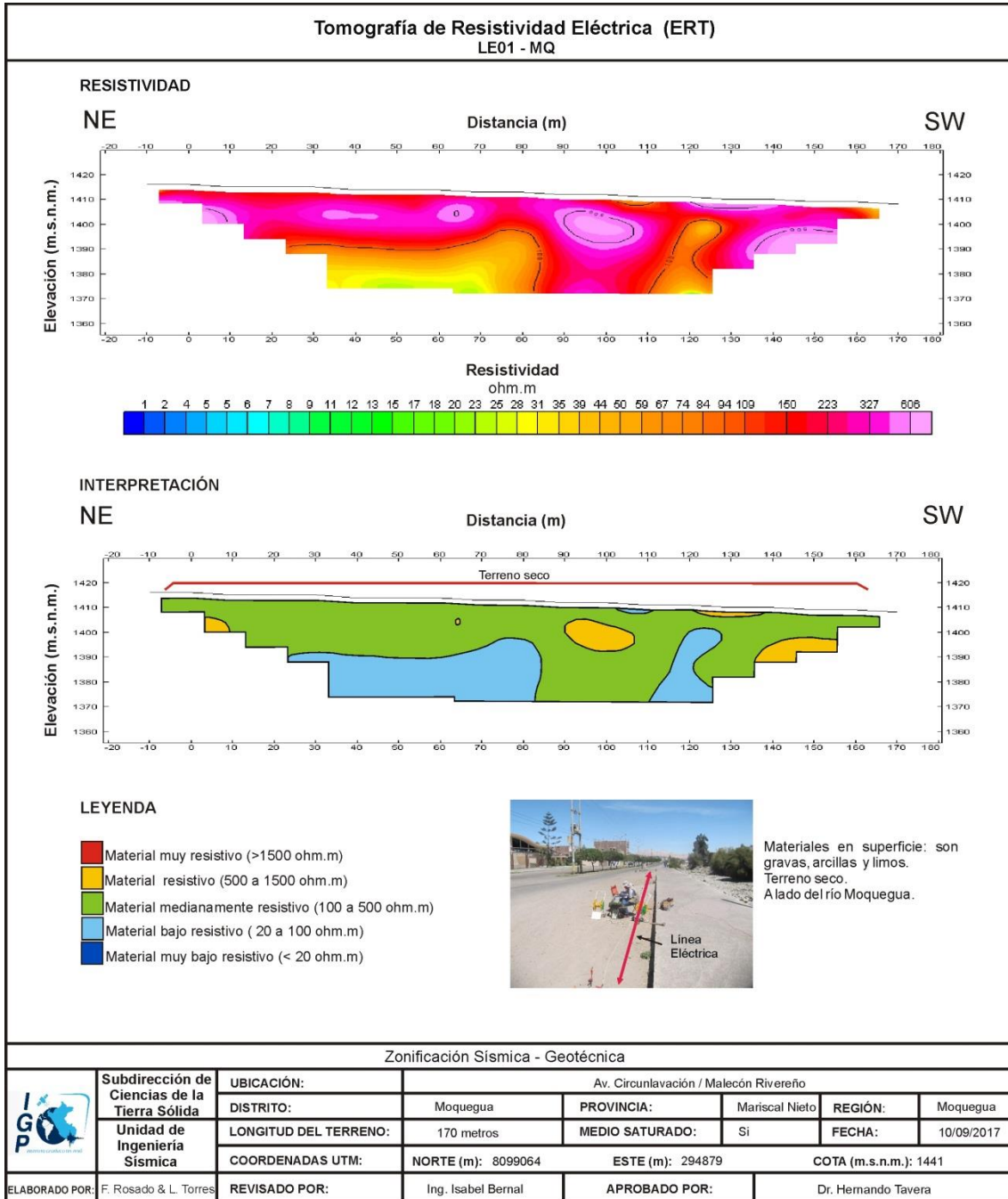


Figura 27: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-MQ

Los resultados muestran que en El Cercado (próximo la río Tumilaca), se identificó la presencia de materiales resistivos en superficie que sugiere suelos con bajo contenido de humedad, pero conforme se incrementa la profundidad, la humedad aumenta a posible saturación, principalmente en el sector denominado Los Chirimoyos. Similares características se presentan en la zona de expansión urbana y en la Asoc. Sol del Sur, ambos ubicados dentro del C.P. San Antonio.

Los sectores con predominio de materiales bajo a muy bajo resistivos están ubicados en el A.H. Mariscal Nieto (en El Cercado próximo al límite con Samegua) y al sur del C.P. San Antonio (Av. Circunvalación). Estos resultados sugieren la existencia de suelos con contenido de humedad en superficie a medios saturados en profundidad. El alto contenido de humedad puede ser debido a la infiltración a través del lecho del río, canales sin revestir y terrenos de cultivo que se encuentran bajo riego.

En el C.P. Chen Chen predominan los materiales resistivos, lo que indica la presencia de suelos con bajo contenido de humedad que se mantiene de manera uniforme hasta la profundidad investigada.

Los resultados obtenidos para la parte central de El Cercado (Campo Ferial UNAM), presenta materiales resistivos en superficie sobre materiales bajo a muy bajo resistivos en profundidad (2 horizontes). La parte superficial corresponde a depósitos aluviales constituidos principalmente de arenas y arcillas; mientras que, en profundidad se tiene el predominio de los suelos finos con bajo contenido de humedad.

## 4. ZONIFICACION SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El mapa de zonificación sísmica – geotécnica se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos de los estudios geológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. En Base a estos resultados, se delimita zonas con características físicas y dinámicas similares de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030. Se ha identificado la existencia de suelos de Tipo S1 y S4 que corresponden a suelos rígidos, flexibles y excepcionales respectivamente.

### 4.1. Integración de resultados

El área urbana de la ciudad de Moquegua presenta suelos con diferentes características dinámicas y físicas, siendo suelos complejos. Estos suelos responden a dos rangos de periodos: el primero constituido de periodos largos (0.5 a 1.1 seg), se encuentran presentes en la zona de expansión del C.P. San Antonio, el C.P. San Francisco, la zona este de El Cercado (estadio municipal) y el flanco noroeste del cerro Cruz del Siglo, tal como se muestra en la Figura 28. Según los perfiles en los lugares mencionados, considera en su mayoría suelos moderadamente rígidos; siendo los de mayor espesor en la zona de expansión del C.P. San Antonio, con bajo contenido de humedad en superficie y que aumenta conforme se incrementa la profundidad, principalmente en el sector próximo al río Tumilaca (sector los Chirimoyos).

El segundo rango es definido por periodos cortos que varían entre 0.1 a 0.4 seg., y que corresponden a la respuesta sísmica de la capa superficial distribuida en la mayor parte de la ciudad de Moquegua. Según los perfiles, los suelos se caracterizan por ser de mayor rigidez, siendo solo la capa más superficial y de poco espesor considerada como suelos moderadamente rígidos y con bajo contenido de humedad.

De manera particular, se ha identificado sectores donde no se obtuvo el periodo predominante dentro del rango de análisis, principalmente el suelo emplazado en la zona urbana central del C.P. Chen Chen y de forma puntual, en El Cercado y en el C.P. San Antonio (Figura 28).

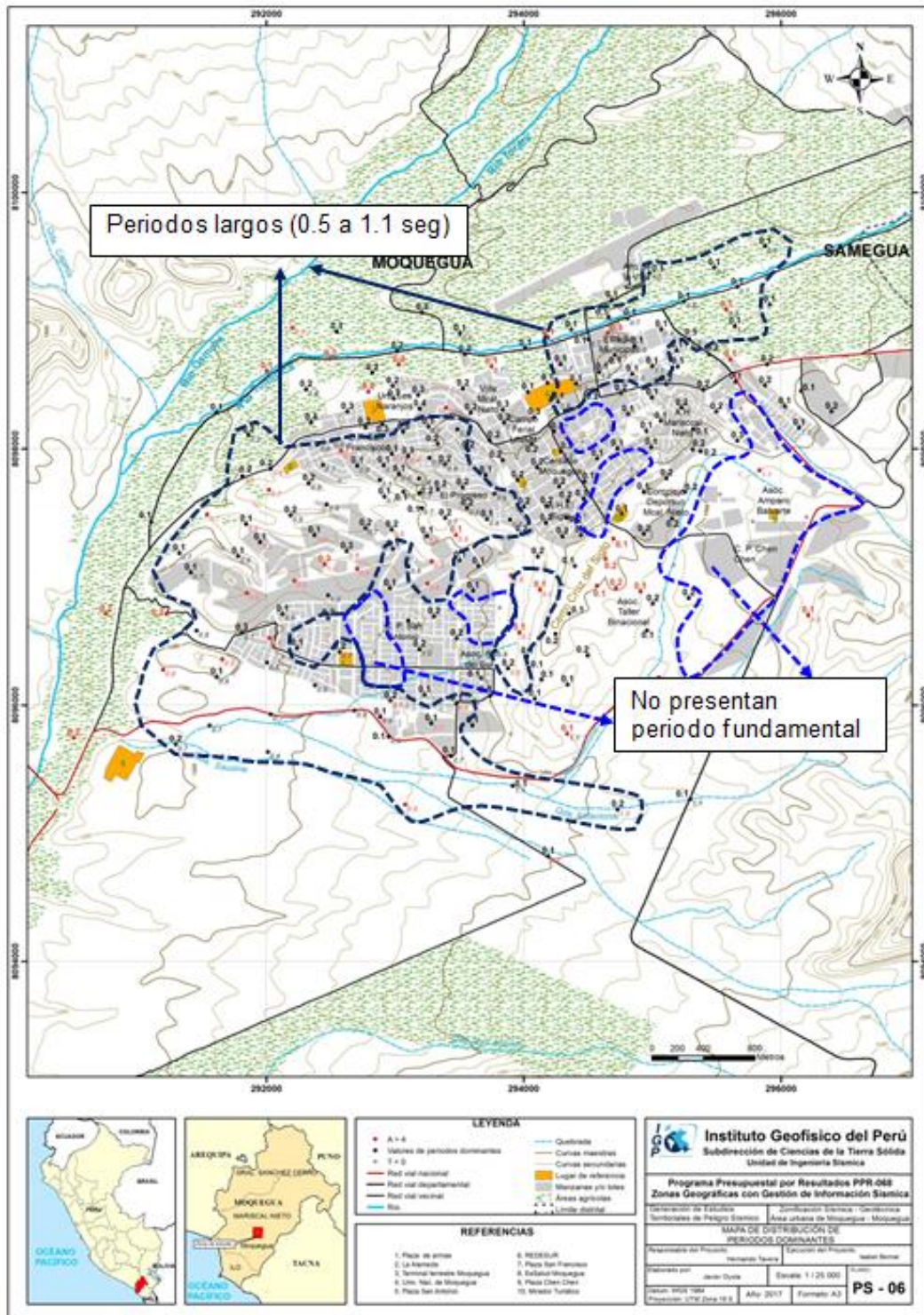


Figura 28: Mapa de periodos con amplificación mayor a 4 veces. Suelos que responden a periodos largos (áreas en negro) y suelos sin respuesta a periodos dentro del rango de análisis (áreas en azul)

Dentro de este contexto, se ha realizado el análisis considerando que los periodos predominantes presenten amplificaciones mayores a 3 y 4 veces.

**-Los periodos predominantes**, con amplificación mayor a 4 veces, son mostrados en color rojo (Figura 29). Estos resultados sugieren que de producirse un sismo podrían originar mayores sacudimientos en los suelos ubicados en el cerro Cruz del Siglo, en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, en la zona próxima al río Tumilaca y de forma puntual en el C.P. San Francisco. Una de las causas que originarían dichas amplificaciones es la geomorfología o topografía en los lugares mencionados; es decir, además de presentar suelos que responden a dos rangos de periodos y ser considerados como moderadamente rígidos, pueden sufrir grandes acudimientos durante el evento sísmico. En el caso del cerro Cruz del Siglo presenta una topografía con alta pendiente, lo mismo sucede en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio y en el C.P. San Francisco. Las zonas próximas al río Tumilaca (C.P. San Antonio y San Francisco), donde se presentan amplificaciones moderadas a altas, podrían deberse al alto contenido de humedad que presentan estos suelos.

En el caso de los periodos predominantes con amplificaciones mayores a 3 veces (Figura 29), se encuentran en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, el C.P. San Francisco, los sectores próximos al río Tumilaca y la zona ubicada al este de EL Cercado (estadio Municipal).

La ciudad de Moquegua, al presentar una geomorfología variada, la zona donde la topografía presenta mayor pendiente aporta de forma significativa el sacudimiento del suelo, siendo en estos lugares donde se producirían los mayores daños ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Como, por ejemplo, durante el sismo ocurrido en el año 2001 (M8.2), en la ciudad de Moquegua se produjo los mayores daños en viviendas ubicadas en laderas del C.P. San Francisco.

En la ladera sureste del cerro Cruz del Siglo, próximo al mirador turístico, se ha identificado una zona de grandes amplificaciones en el rango de periodos cortos (área en azul) (Figura 29). Este sector, además de la calidad del suelo, podría estar asociado a la presencia de un lineamiento que cruza en dirección SE-NO, a zona de estudio (Martínez y Zuloaga, 2000).

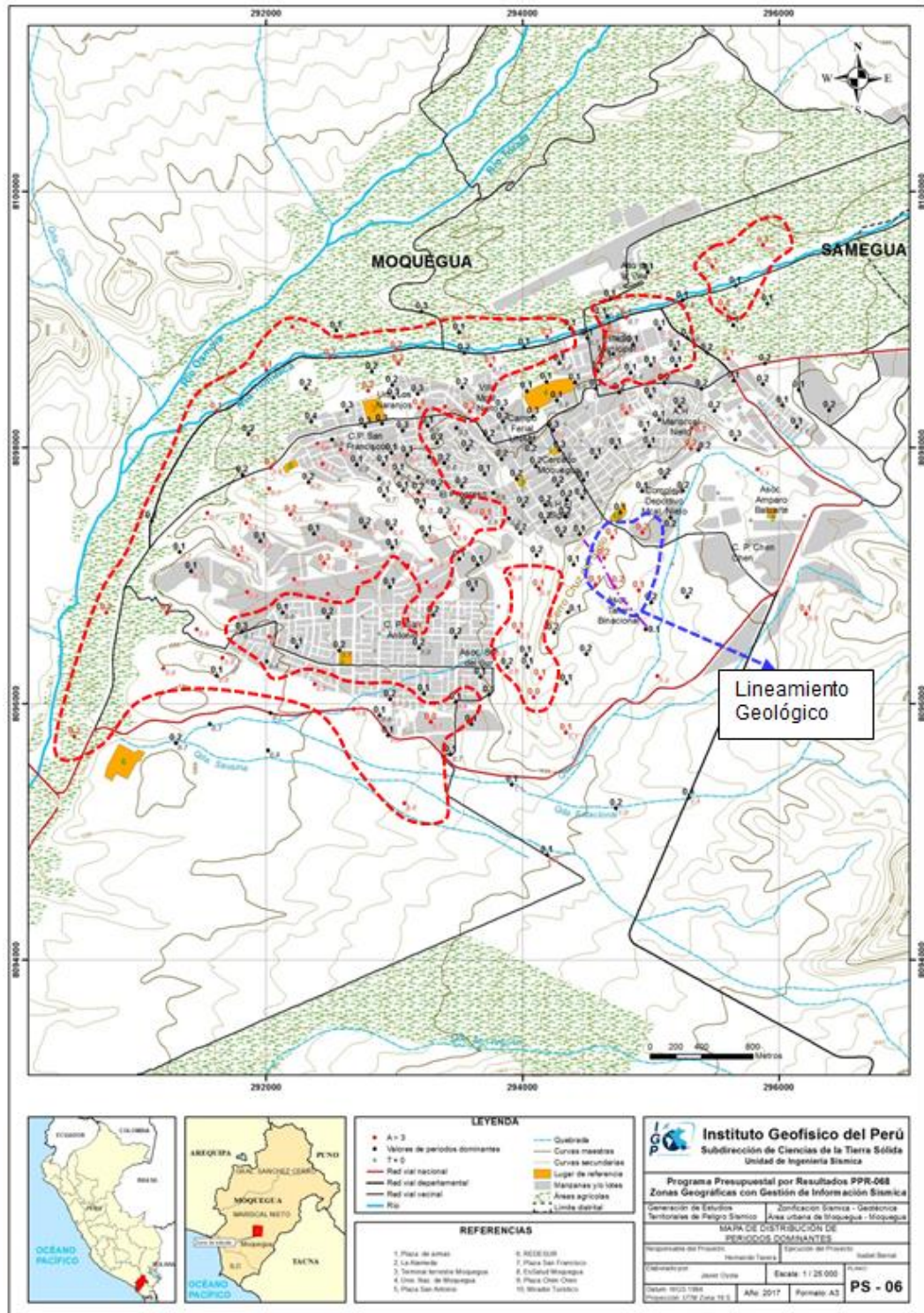


Figura 29: Mapa de periodos con amplificación mayor a 3 veces (área en rojo)

## 4.2. Mapa de Zonificación Sísmica

Para el área urbana de la ciudad de Moquegua, se propone la siguiente zonificación sísmica-geotécnica (Figura 30):

- **ZONA I:** Conformada por suelos más consolidados de la ciudad, constituidos por estratos de grava aluvial desde el nivel superficial y en algunos sectores cubiertos de arenas de poco espesor. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 250 m/s en la capa más superficial y 780 m/s a profundidades de hasta 30 metros. Los periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos. Se asocian a suelos con un comportamiento rígido y es considerado como suelos Tipo S1 según la norma sismorresistente peruana los suelos presentan, una capacidad admisible mayor a 3.0 Kg/cm<sup>2</sup>. Esta zona comprende gran parte del área céntrica de Moquegua (Plaza de Armas, A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto), hacia el sur el área urbana central del C.P. San Antonio y hacia el este parte del C.P. Chen Chen.

Las líneas inclinadas en naranja, delimitan suelos que muestran sensibilidad a un segundo rango de periodos (0.6 a 1.0 seg.) pero con mínimas amplificaciones, presentes al este del cercado de Moquegua (estadio Municipal) y en el sector sur del C.P. San Antonio (pampa San Antonio). Estos suelos se consideran rígido en profundidad y están constituidos de arena limoso, que material afloran en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio.

Las líneas inclinadas en negro, delimitan áreas de muy baja amplificación en los sectores ubicados en el cercado de Moquegua, en el C.P. San Antonio y en el C.P. Chen Chen, sugiriendo que los suelos superficiales muestran mayor consistencia y por lo tanto, menor el sacudimiento durante la ocurrencia de un evento sísmico.

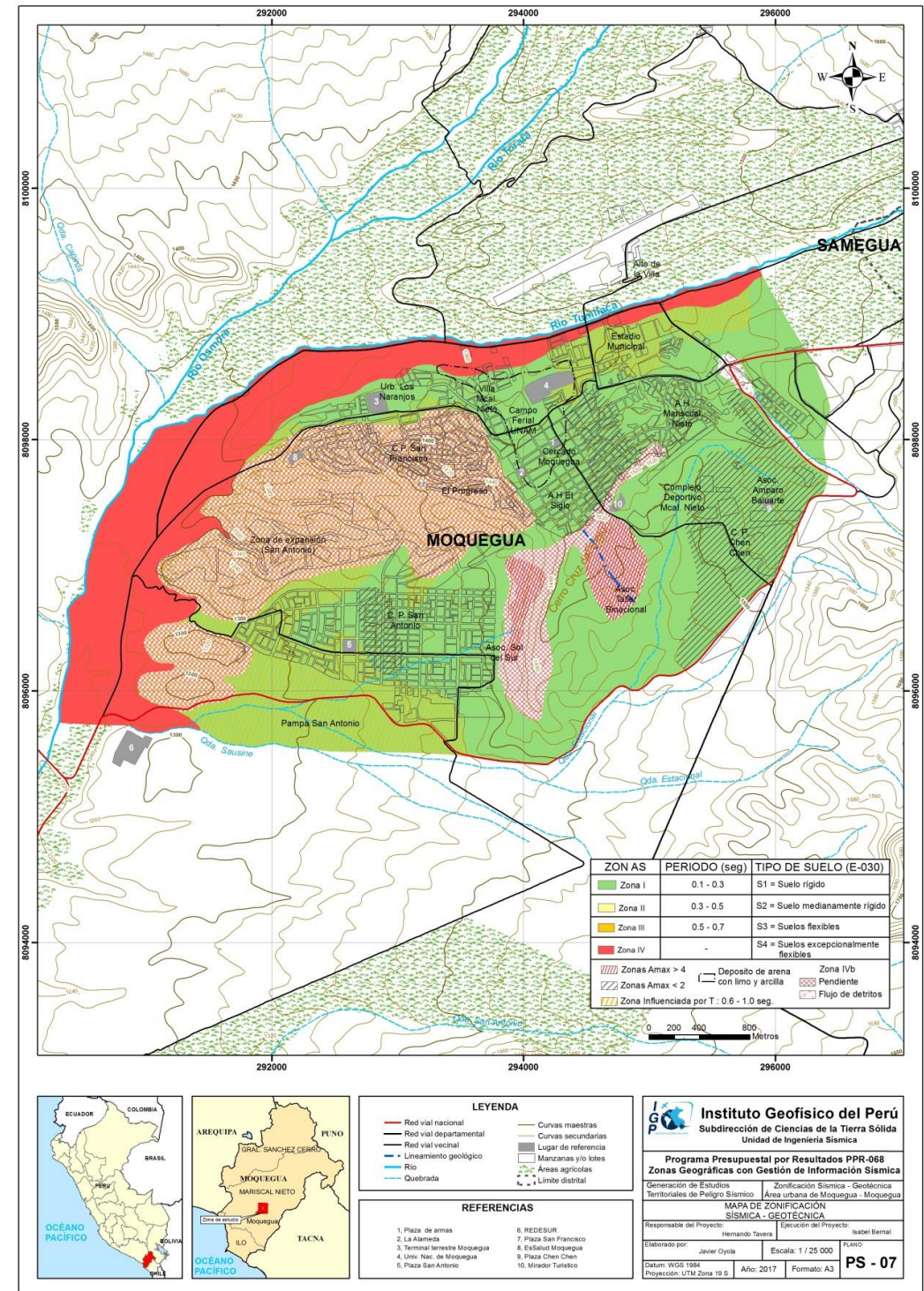


Figura 30: Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica del área urbana de la ciudad de Moquegua.

La línea negra punteada ubicada entre el campo ferial UNAM y Villa Mariscal Nieto (cercado de Moquegua), indica que los suelos se encuentran constituidos por depósitos de arenas con limos y arcillas.

- **ZONA IV:** Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales, por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4 de la norma sismoresistente peruana; sin embargo, para realizar una mejor zonificación, se ha visto por conveniente subdividir a fin de considerar dos zonas con características específicas.

- **Zona IVa:** Constituida por depósitos fluviales y aluviales con alto contenido de humedad y en algunos sectores cubiertos por limos (áreas de cultivo) y que se encuentran emplazados próximo al río Tumilaca. Esta zona se extiende desde el noreste (estadio Municipal), siguiendo una franja delgada, y que conforme se avanza hacia la suroeste abarca mayor área (sector de cultivo, carretera interoceánica sur). Esta zona presenta baja capacidad de carga admisible ( $0.68 \text{ Kg/cm}^2$ ) y puede generar procesos geodinámicos externos como inundaciones, procesos de licuación y mayores sacudimientos del suelo durante la ocurrencia de un evento sísmico.

- **Zona IVb:** Corresponde a zonas de topografía irregular en donde pueden generarse caída de rocas y flujo de detritos. Abarca el área urbana del C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, donde los suelos que cubren este sector; además de presentar una topografía accidentada, responden en dos rangos de periodo de vibración (0.1 a 0.3 segundos y 0.6 a 1.0 segundos.) con amplificaciones relativas de hasta 3 veces. Asimismo, presenta capacidad de carga admisible muy baja siendo el valor de  $0.31 \text{ Kg/cm}^2$  para el C.P. San Francisco y  $0.91 \text{ Kg/cm}^2$  para la zona de expansión de San Antonio.

Los suelos emplazados en el cerro Cruz del Siglo responden a amplificaciones mayores a 4 veces. En la ladera noroeste (Asc. Sol del Sur), presenta una topografía con pendiente alta susceptible a generar caída de rocas y/o derrumbes. En el caso de la ladera sureste y con pendiente moderada, las mayores amplificaciones se presentan principalmente en el sector ubicado entre la Asc. Taller Binacional y el mirador Turístico, y debido a la presencia de suelos poco consistente en superficie; además de estar influenciado por la presencia de un lineamiento geológico importante.

*Suelos, conformados por flujos de detrito, se han identificado al noreste del A.H. Mariscal Nieto (límite con el distrito de Samegua), en donde se ubica una quebrada cuyas márgenes presentan pendiente moderadas, registrándose caída de roca y flujo de detritos (huaycos) que generaría inundaciones con dirección al río Tumilaca.*

En general, se debe considerar que esta zonificación condiciona el tipo de estructuras 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 que experimente el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

## CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Moquegua, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Existen siete unidades geomorfológicas que abarcan la ciudad Moquegua como son: terraza aluvial, fluvialuviales, torrenteras, lecho fluvial, colinas, lomas y montañas; siendo las lomas, las terrazas aluviales y fluvioaluviales las geoformas donde se ha asentado esta ciudad.
- La geodinámica está representada por movimientos en masa (flujo de detritos, caída de rocas) en el sector de San Antonio, San Francisco, Chen Chen, ubicados al suroeste, sur y sureste de la ciudad de Moquegua respectivamente. Las zonas de acarreo de flujos de detritos se ubican cerca de las quebradas estacionarias de San Antonio, Sausine, Q. Panteón y las zonas potencialmente a inundarse, se encuentran en dos zonas delimitadas en la trayectoria del río Tumilaca-Moquegua.
- Los suelos presentes en la ciudad de Moquegua son 7 tipos: gravas pobremente graduadas (GP-GM) con capacidad admisible alta de 3.03 a 4.57 kg/cm<sup>2</sup>; gravas bien graduadas con mezcla de gravas limosas (GW-GM) con capacidad admisible muy baja de 0.91 kg/cm<sup>2</sup>; arenas bien graduadas con mezcla de arenas limosas (SW-SM), arenas pobremente graduadas con mezcla de arena limosas (SP-SM) con capacidad admisible muy baja de 0.31 kg/cm<sup>2</sup>; limos inorgánicos (ML) con capacidad admisible muy baja de 0.68 kg/cm<sup>2</sup>; arena limosas (SM) con capacidad admisible muy baja de 0.91 kg/cm<sup>2</sup>; arenas limosas y arenas arcillosas (SM y SC) con valores bajos de 0.91 y 0.53 kg/cm<sup>2</sup>.
- Para la ciudad de Moquegua se ha identificado, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procesamiento establecido en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de dos zonas correspondientes a suelos Tipo S1 y S4.
  - **ZONA I:** Conformada por los suelos más consolidados de la ciudad. Están constituidos por estratos de grava aluvial desde el nivel superficial y en algunos sectores cubiertos de arenas de poco espesor. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 250 m/s en la capa más superficial y 780 m/s a profundidad de hasta 30 metros, con periodos de vibración

natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos; tienen un comportamiento rígido y es considerado como suelos Tipo S1 según la norma sismorresistente peruana; además, presenta suelos con capacidad admisible mayor a  $3.0 \text{ Kg/cm}^2$ . Esta zona comprende gran parte del área céntrica de Moquegua (Plaza de Armas, A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto), hacia el sur el área urbana central del C.P. San Antonio y hacia el este parte del C.P. Chen Chen. El segundo rango de periodos (0.6 a 1.0 seg.) con mínimas amplificaciones. Estos suelos se encuentran en el cercado de Moquegua (estadio Municipal) y en el sector sur del C.P. San Antonio (pampa San Antonio), siendo rígido en profundidad al estar constituido por material areno limoso que aflora principalmente en la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio. Asimismo, las áreas de muy baja amplificación corresponden a los sectores ubicados en el cercado de Moquegua, en el C.P. San Antonio y en el C.P. Chen Chen. Aquí los suelos superficiales muestran mayor consistencia y por lo tanto menor el sacudimiento durante la ocurrencia de un evento sísmico menor.

**-ZONA IV:** Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales, por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4 de la norma sismoresistente peruana. Para realizar una mejor zonificación, se ha visto por conveniente subdividir en dos zonas con características específicas.

**-Zona IVa:** Constituida por depósitos fluviales y aluviales con alto contenido de humedad y en algunos sectores, cubiertos por limos (áreas de cultivo); se encuentran emplazados próximo al río Tumilaca. Esta zona se extiende desde el Estadio Municipal (franja delgada) hacia el extremo suroeste abarcando mayor área (sector de cultivo, carretera interoceánica sur). Esta zona presenta baja capacidad de carga admisible ( $0.68 \text{ Kg/cm}^2$ ); y por lo tanto, puede generarse procesos geodinámicos externos como inundaciones, procesos de licuación y mayores sacudimientos del suelo durante la ocurrencia de un evento sísmico.

**- Zona IVb:** Corresponde a zonas de topografía irregular, donde puede generarse caída de rocas y flujos de detritos. Abarca el área urbana del C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio,

donde los suelos; además de presentar una topografía accidentada, responden en dos rangos de periodo de vibración (0.1 a 0.3 segundos y 0.6 a 1.0 segundos.), con amplificaciones relativas de hasta 3 veces. Asimismo, presenta capacidad de carga admisible muy baja siendo el valor de 0.31 Kg/cm<sup>2</sup> para el C.P. San Francisco y 0.91 Kg/cm<sup>2</sup> para la zona de expansión de San Antonio.

## BIBLIOGRAFIA

- 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
- Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), (2016) - Caracterización de Moquegua. Lima-Perú. BCRP.  
<http://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Arequipa/moquegua-caracterizacion.pdf>
- 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
- Bellido, E. (1979) Geología del cuadrángulo de Moquegua. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 15, 78 p.
- Bernal, I. (2006) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Castro-Cuba, M., Chang, L. y A Salas, L. (2003) Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua, CISMID. Presentado en el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- CISMID, (2015): "Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua".
- Crespo, V. C. (2004) - Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 5ta edición.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtremores con el método SPAC", Geophysics, Vol. 24, Nº 3, 438-445
- Fontan et, at., (1995) - Estudio de la Falla Huanocollo, GEOCATMIN.
- INDICI, (2001): "Evaluación de Peligros en la Ciudad de Moquegua".
- INEI, (2007) - Censo Nacional de Población y Vivienda. Lima- Perú. INEI. Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados>.
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. IEEE Tansactions on Instrumentation and Measurement, 47(1): 74-77.

- Guzmán, A., Fidel, L., Zavala, B., Valenzuela, G., Nuñez, S. y Pari, W. (2000) Estudio de Riesgos Geológicos del Perú. Franja N°1. INGEMMET, Boletín N°23, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 343 p.
- Gutiérrez, M. (2008) - Geomorfología. Edit. Pearson/Prentice Hall, Madrid, 898 p. ISBN 97884832-23895.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 2308-
- Hutchinson, J. N. (1968) - Mass Movement. In the Enciclopedia of Geomorphology (Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York). 668-696 p.
- Hutchinson, J. N. (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides, (Ed: Bonnard, C.). 1, 3-35 p. Rotterdam: Balkema.
- Kosaka, R., Gonzales, E., Palza, E., Minaya, A., Farfán, E. y Ticona, J. (2001) Evaluación de los Peligros de la Ciudad de Moquegua, Arequipa. Convenio UNSA-INDECI.
- Lermo, J., Lázares L. y Cuenca, J. (2003) El terremoto de Arequipa, Perú del 23 de junio del 2001 (Mw=8.2), efectos de sitio en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Ilo y Tacna y su relación con los daños en las edificaciones. Instituto de Ingeniería. Mexico. Presentado en el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b). Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423 pp.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Martínez, W. (1979) - Geología del Cuadrángulo de Moquegua- Carta 35u.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). Consulta de seguimiento de ejecución de Proyectos de Inversión. Lima – Perú. Recuperado de [http://apps5.mineco.gob.pe/bingos/seguimiento\\_pi/Navegador/default.aspx?y=2014&ap=ActProy](http://apps5.mineco.gob.pe/bingos/seguimiento_pi/Navegador/default.aspx?y=2014&ap=ActProy).
- Moreno, R. y Zenón, A. (2003) Análisis de Riesgo Sísmico de la ciudad de Moquegua usando sistemas de información geográfica. CISMID. Presentado en el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.

- Municipalidad Mariscal Nieto. (2017) - Acta del Taller de Priorización de Proyectos 2017. Moquegua-Perú. Recuperado de [http://www.munimoquegua.gob.pe/sites/default/files/archivos/pb/acta\\_ppr\\_2017.pdf](http://www.munimoquegua.gob.pe/sites/default/files/archivos/pb/acta_ppr_2017.pdf).
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.
- Noller, (1993) - Estudio de la Falla Pampa Trapiche. GEOCATMIN.
- Noller, (1995) - Estudio de la Falla Alto los Chilenos. GEOCATMIN.
- 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.
- Ruiz, W, (2004) - Ciudad de Moquegua Plan de desarrollo urbano 2014-2024. Moquegua-Perú.
- 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.
- Sepúlveda, S.A. (2000) - Metodología de Evaluación del Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos. Revista Comunicaciones, Departamento de Geología, Universidad de Chile, No.51, p. 3-28.

- 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.
- Suárez, D. J. (1998) - Estabilidad de Taludes en Tropicales. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Colombia. Ed. Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p.
- Tarback, E. D. Lutgens, F., K., (2005) - Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física Pretince Hall. Cap16. 8a edición. 710 pp.
- Tavera, H., Fernández, E. y Bernal, I. (2006) The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology* (2006) DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2.
- Varnes, D. J. (1958) - Landslide types and processes in Eckel E.B., ed., *Landslides and Engineering Practice*, Highway Research Board Special Report 29, NAS- NRC Publication 544, Washington, D.C. 20-47 p.
- Varnes, D. J. (1978) - Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster R. L. y Krizek, R. J. ed. *Landslides analysis and control*: Washington, D. C. National Academy Press, Transportation Research Board Special report 176. 9-33 p.
- Wyllie, D. C. & Norrish, N. I. (1996) - “Stabilization of rock slopes”. *Landslides investigation and mitigation*. Special report 247. Transportation Research Board. National research council, pp. 474-504.
- 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.
- Zenteno, E., Rubio, R., Guevara, E. y Fernández, F. (2004) Estudio Hidrológico del Valle de Moquegua –Ilo. Instituto Nacional de Recursos Naturales.

## **ANEXOS**

## ANEXO

La documentación del presente Informe Técnico: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Moquegua”, se adjunta en un DVD.

### 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