



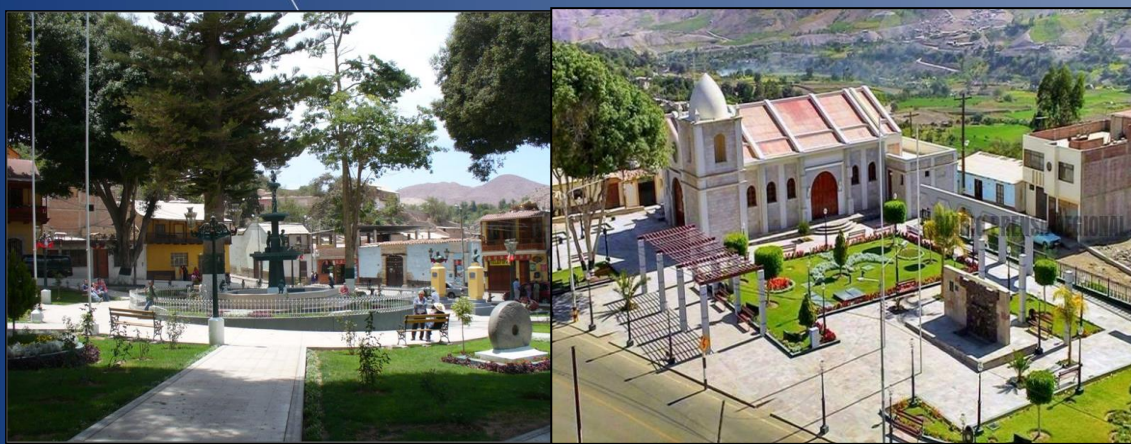
PERÚ

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 LAS ÁREAS URBANAS DE TORATA y YACANGO

Lima - Perú

2018

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipion

Autores

Isabel Bernal

Caracterización Sísmica y Geofísica de las áreas urbanas de Torata-Yacango

Juan Carlos Gómez

Caracterización Geológica y Geotécnica de las áreas urbanas de Torata-Yacango

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Marcos Matto

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

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Marisol Enriquez

Este Informe ha sido producido por:

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

**ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LAS ÁREAS
URBANAS DE TORATA y YACANGO**

**Distrito de Torata y Yacango – 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 Tachá (distrito de Cercado), Alto de la Alianza (distrito de Alto de la Alianza), Ciudad Nueva (distrito de Ciudad Nueva), Boca del Río (distrito de Sama), Ite (distrito de Ite), Ilo y Pampa Inalámbrica (distrito de Ilo), Moquegua (región Moquegua), Torata y Yacango (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 las áreas urbanas de Torata y Yacango”, 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 y la descripción de las características del área de estudio, así como sus conclusiones. En la segunda parte, se presenta el desarrollo del estudio realizado para la caracterización geológica y geotécnica, y en la tercera, el estudio para la caracterización sísmica y geofísica, en ambos casos, para las áreas urbanas de Torata y Yacango. Finalmente, en un CD se adjunta toda la documentación y mapas temáticos generados durante la realización del presente estudio.

ÍNDICE

RESUMEN

ÍNDICE

PARTE 1: Presentación

1.- Introducción

1.1.- Objetivo

1.2.- Historia

1.3.- Accesibilidad y clima

1.4.- Economía

1.5.- Estudios Previos

2.- Condiciones locales de sitio

2.1.- La Norma Técnica E.030

Conclusiones

PARTE 2: Caracterización geológica y geotécnica del área urbana de Yacango.

PARTE 3: Caracterización geológica y geotécnica del área urbana de Torata.

PARTE 4: Caracterización sísmica de las áreas urbanas de Torata y Yacango.

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS: Documentos y Anexos se adjunta en un CD.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 **“Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”**, el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2017 el Proyecto **“Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica”** y como parte del mismo, las Unidades de Ingeniería Sísmica y Geodinámica Superficial de la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollan la Actividad **“Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico”** a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las áreas urbanas de las siguientes ciudades (Figura 1):

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

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región sur ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en la región sur (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.

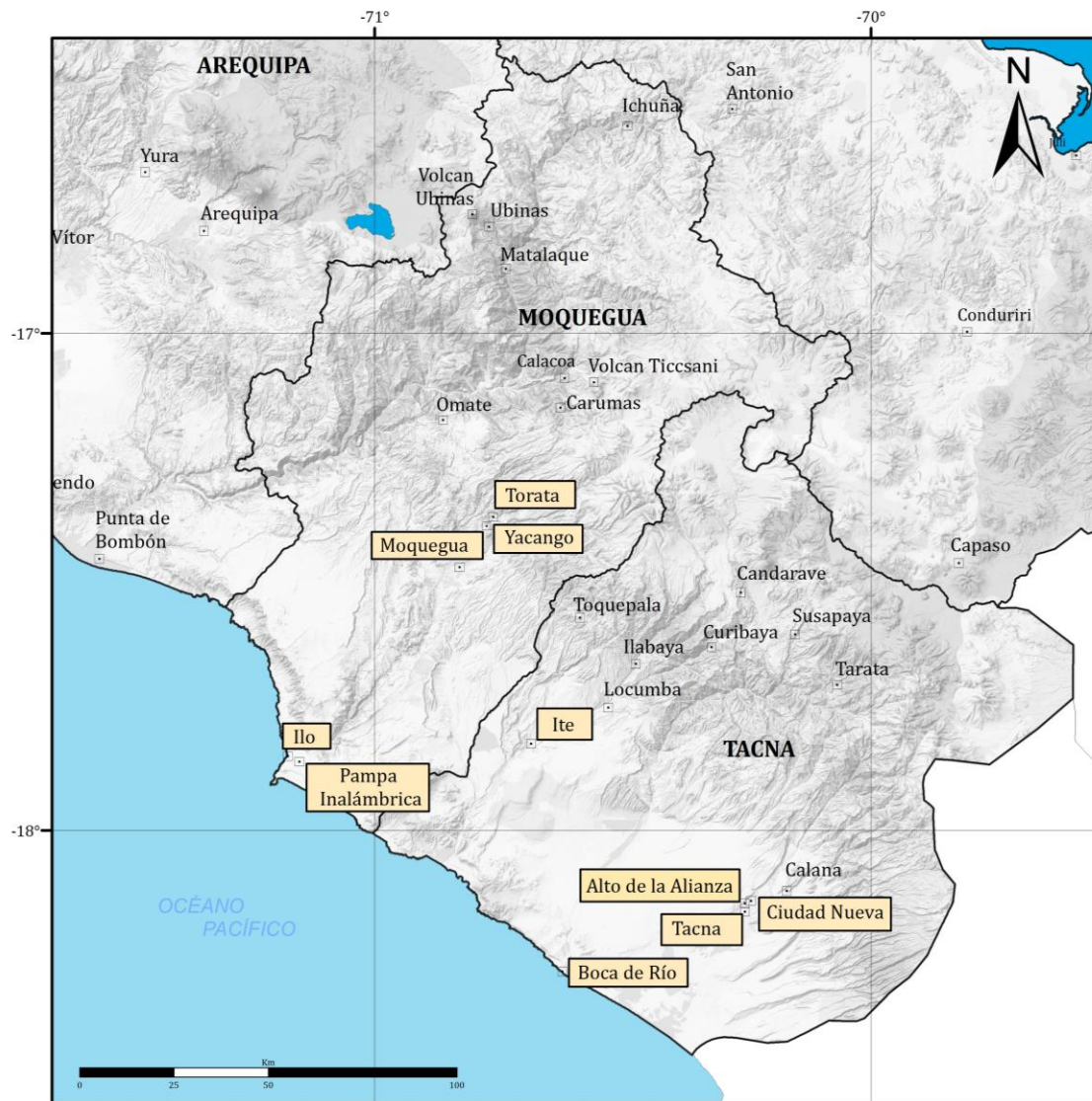


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades intervenidas durante el año 2017:

Los estudios de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo), permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran datos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras apropiadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las áreas urbanas de Torata y Yacango debe comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente 1):

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 del área urbana de Torata-Yacango, provincia Mariscal Nieto, región de Moquegua, a partir de la integración de los resultados obtenidos con diferentes métodos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos, ver Figura 2 y 3. Asimismo, es de interés del presente estudio que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del ordenamiento territorial y desarrollo sostenible de la ciudad.



Figura 2. Mapa de ubicación geográfica del área urbana de Torata.

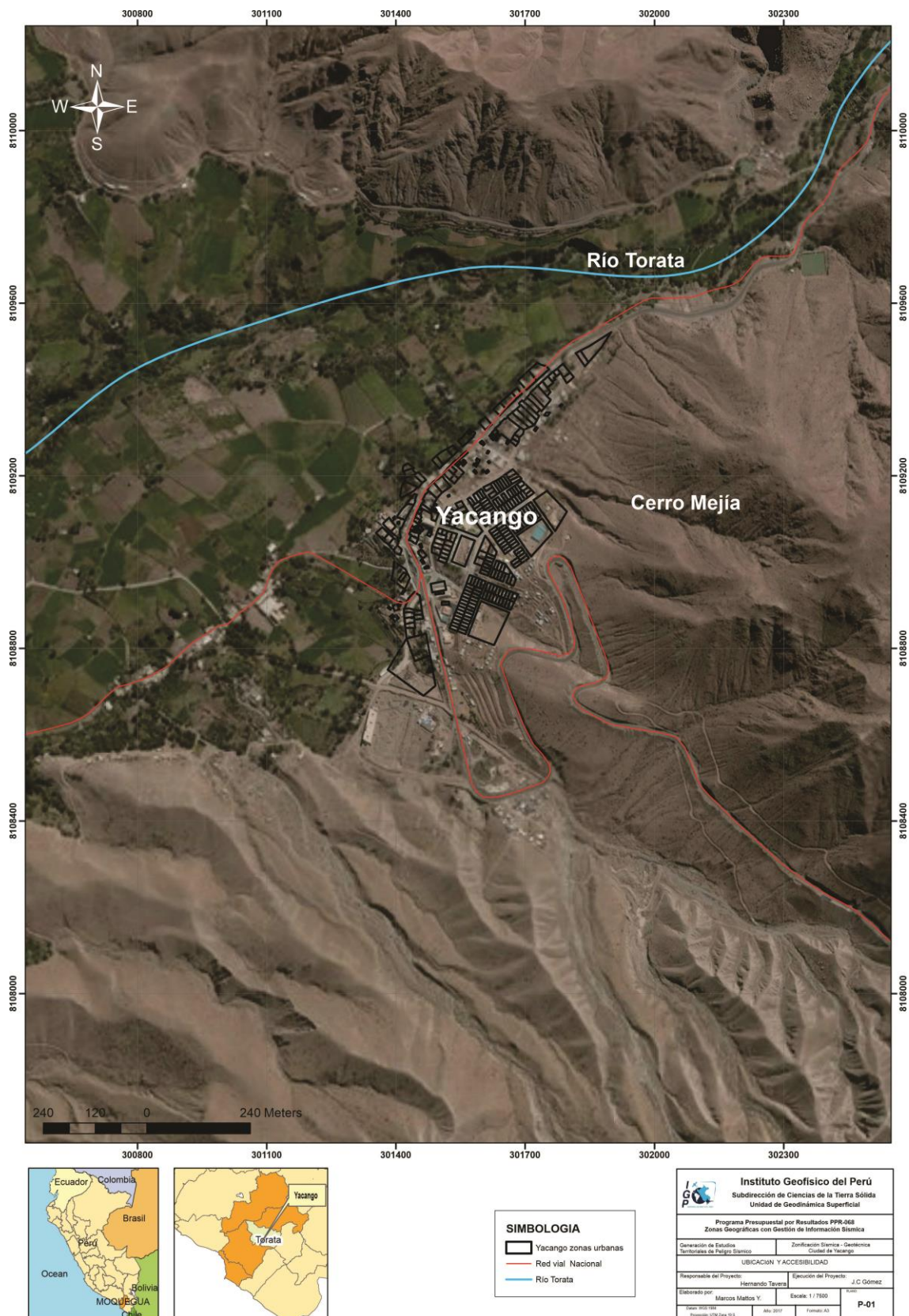


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica del área urbana de Yacango.

1.2. Historia

Torata como distrito fue creado el 12 de noviembre de 1823, siendo uno de los seis distritos que conforman la provincia de Mariscal Nieto en la región de Moquegua. Se ubica a 303880 E 8110786 N y una altitud de 2 140 m.s.n.m., presenta una extensión territorial de 1793.37 Km² ocupada por una población de 6591 habitantes (INEI, 2007).

Torata, fue ocupado inicialmente en el periodo inca (1476 a 1534 d.n.e) por asentamientos poblacionales denominados Estuquiña, en los sectores de Camata, Sabaya y Torata Alta, dedicados económicamente a la producción agrícola. Posterior al siglo XVI, el comercio pasa a ser la principal actividad económica del distrito, suscitado por el intercambio comercial y/o arriero de españoles y criollos con pobladores de La Paz, Oruro, Cochabamba y Potosí en Bolivia.

El abastecimiento de alimentos de **Torata**, convertido en un centro articulador comercial, provenía de sus tres sectores periféricos: Yacango, La Pascana e Ilubaya.

En la época republicana (a partir de 1828), se inicia el crecimiento disperso de los centros poblados de Coplay, Alegoma y Mollesaja, acentuando nuevamente la actividad agrícola. Luego de la reforma agraria, en la década de 1970, se inicia el minifundismo y consigo el interés por los estudios de factibilidad del uso de las aguas del proyecto Pasto Grande.

El inicio de las actividades de la mina Cuajone en 1976 y la posterior construcción de la carretera Binacional Perú-Bolivia (1990), ocasiona el crecimiento urbano de Torata en forma paralela y lineal a la citada vía con dirección a los sectores rurales (Torata 1, s.f.)

El distrito de **Torata** (Figura 4) se encuentra situada en un valle, además existe actividad minera que llega a contaminar los recursos naturales, el 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 9060 habitantes (INEI, 2002). Según la historia sísmica de Torata, en los años 1833, 1868 y 1948 (documentado por Silgado, 1978) y el 23 de junio del 2001 (8.2 Mw), fuente Instituto Geofísico del Perú,

se produjeron sismos de grandes magnitudes que sacudieron los suelos y como consecuencia daños estructurales.

Asimismo, la localidad de **Yacango** (Figura 5), está situada en el sur del Perú, en el departamento de Moquegua y pertenece al Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, se encuentra ubicada en las faldas del cerro Mejía, a una distancia aproximada de 22km al nor-este de la Ciudad de Moquegua, con coordenadas UTM (Universal transversal Mercator) geográficas: 301566 E, 8109095 N y una cota promedio de 2073 m.s.n.m. (Figura 5)



Figura 4: Plaza principal de la ciudad de Torata.



Figura 5: Plaza principal de la ciudad de Yacango.

1.3. Accesibilidad y clima

Para acceder a la zona de estudio, desde Lima se toma la Carretera Panamericana Sur, unos 1146 km hasta la ciudad de Moquegua, el recorrido dura 14 horas en auto aproximadamente. Una segunda opción es abordar un vuelo hasta Arequipa (una hora) y luego ir por tierra hacia Moquegua (3 horas en auto) a través de la mencionada vía. Posteriormente se debe enrumbar hacia Torata, ubicada a 24 Km de Moquegua. Se accede en 25 minutos en auto en dirección nor-este.

Para determinar las condiciones climáticas en Torata, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Información obtenida de la estación meteorológica "YACANGO - 000852", que se encuentra ubicada a 3.29 Km al sur-oeste de la ciudad en mención, en las coordenadas geográficas: Latitud 17 5' 47.8", Longitud 70 52' 3.1" y en la cota 2091 m.s.n.m., período 2015-2016, determinan que la ciudad de Torata presenta un clima templado durante todo el año, por otro lado, entre los meses de abril a diciembre no presentan precipitaciones pluviales, pero se tiene lluvias leves en los meses de enero, febrero, marzo.

Las temperaturas máximas promedio son de 25°C a 26 °C y mínimas promedio de 8°C a 9°C, respectivamente. Los datos pluviométricos indican que las máximas precipitaciones alcanzan en promedio 170.5 mm, mensuales, durante los meses de enero a marzo, ver Tabla 1.

Tabla 1: Registro de temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones pluviales acumuladas, durante el período 2015 – 2016(SENAMHI 2015-2016).

Variable	Año 2015											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	23.4	21.2	21.8	23.71	23.4	23.2	24.1	23.9	23.8	25.1	25.7	25.5
T° Min Promedio (°C)	12.1	12.1	11.1	12.1	10.3	10.3	8.2	10.7	12.0	8.80	9.78	10.5
Precipitación (mm)	41.9	70.3	170.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variable	Año 2016											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	26.3	24.8	26.0	25.7	25.6	24.7	25.3	26.0	25.1	24.9	25.1	24.9
T° Min Promedio (°C)	11.4	10.4	12.0	11.1	10.2	9.54	9.7	9.6	10.7	11.7	11.1	11.1
Precipitación (mm)	0	19.7	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0

El acceso desde la ciudad de Lima a Yacango, se realiza por la carretera Panamericana Sur, y carretera Panamericana sur 1S, vías asfaltadas en buen estado de conservación, hasta la ciudad de Moquegua, para luego recorrer aproximadamente 17 km en dirección nor-este, a través de la carretera interoceánica sur, hasta llegar a la zona de estudio.

Para determinar las condiciones climáticas en la ciudad de Yacango, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Información obtenida de la estación meteorológica "YACANGO - 000852", que se encuentra ubicada en la misma ciudad de Yacango, al sur - oeste de la ciudad de Yacango, en las coordenadas geográficas: Latitud 17 5' 47.8", Longitud 70 52' 3.1" y en la cota 2091 m.s.n.m., período 2015-2016, determinan que la ciudad de Yacango presenta un clima templado durante todo el año , por otro lado entre los meses de abril a diciembre no presentan precipitaciones pluviales, pero se tiene lluvias leves en los meses de enero, febrero, marzo.

Las temperaturas máximas promedio son de 25°C a 26 °C y mínimas promedio de 8°C a 9°C, respectivamente. Los datos pluviométricos indican que las máximas precipitaciones alcanzan en promedio 170.5 mm, mensuales, durante los meses de enero a marzo (Tabla 2).

Tabla 2: Registro de temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones pluviales acumuladas, durante el período 2015 – 2016.

Año 2015												
Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	23.4	21.2	21.8	23.71	23.4	23.2	24.1	23.9	23.8	25.1	25.7	25.5
T° Min Promedio (°C)	12.1	12.1	11.1	12.1	10.3	10.3	8.2	10.7	12.0	8.80	9.78	10.5
Precipitación (mm)	41.9	70.3	170.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Año 2016												
Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	26.3	24.8	26.0	25.7	25.6	24.7	25.3	26.0	25.1	24.9	25.1	24.9
T° Min Promedio (°C)	11.4	10.4	12.0	11.1	10.2	9.54	9.7	9.6	10.7	11.7	11.1	11.1
Precipitación (mm)	0	19.7	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0

1.4. Economía

La principal actividad económica de Torata y Yacango, es la agricultura, por dar ocupación a la mayor cantidad de la población económicamente activa (PEA), estas actividades consisten en la explotación de la tierra para cultivar sus productos tanto de autoconsumo y venta al público. La localidad presenta una PEA (Población Económicamente Activa) de 3485 pobladores, constituyendo el 52% de la población total de la localidad (6591 habitantes). Asimismo, percibe ingresos por concepto de canon y regalías mineras.

1.5. Estudios previos

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

- INGEMMET (1979), Geología del cuadrángulo de Moquegua 35-u-[Boletín A 15], En este boletín se describe que en la zona de estudio correspondiente al flanco andino, afloran rocas volcánicas sedimentarias del grupo Toquepala de edad Cretácea superior a terciario inferior.
- INGEMMET” (2002), Reporte preliminar de zonas críticas por peligro geológico Cuenca del río Tambo- Regiones Arequipa - Moquegua y Puno. En este informe se describe e incluye un inventario de peligros geológicos que afecta la cuenca del río Tambo (Moquegua, Puno y Arequipa) que afectan la infraestructura física de los poblados aledaños a su cauce, en el presente se menciona de forma general la ciudad de Torata, identificando como eventos geodinámicos flujos, caídas de rocas y erosión de laderas.

2. CONDICIONES LOCALES DE SITIO

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

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de Zonificación Sísmica - geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS), teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a, b; Bard y Sesame, 2004; Bernal, 2002), ver Figura 6.

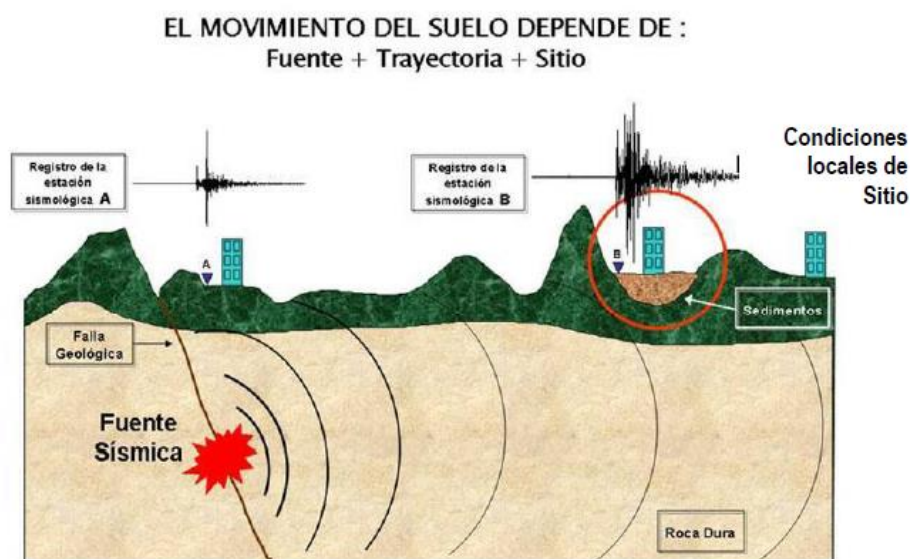


Figura 6: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

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 data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

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

2.1.- La Norma Técnica E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar lo establecido por 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 alternatively, 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 establece 5 perfiles (*Tabla 3*).

- **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 3: Clasificación de los perfiles de suelo según la norma E.030

Perfil	V_{S30} (m/s)	Descripción
S_0	> 1500	Roca dura
S_1	500 a 1500	Roca o suelo muy rígido
S_2	180 a 500	Suelo medianamente rígido
S_3	< 180	Suelo blando
S_4	Clasificación basada en el EMS	Condiciones Excepcionales

- **Perfil Tipo S_3 : 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_4 : 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: Comprende a suelos Tipo S1, cuyas velocidades de ondas de corte (V_s) varían entre 500 y 1500 m/s, correspondiendo a suelos rígidos a muy rígidos. Esta zona está conformada por estratos de grava coluvial que se encuentra a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino. Los periodos predominantes en esta zona son de 0.1 y 0.3 segundos.

ZONA II: Comprende a suelos Tipo S2, cuyas velocidades de ondas de corte (V_s) varían entre 180 y 500 m/s, correspondiendo a suelos medianamente rígidos. Esta zona está conformada por estratos superficiales finos y suelos arcillosos con espesores de hasta 10 metros, subyaciendo a estratos de grava. Los periodos predominantes en esta zona son de 0.3 y 0.5 segundos.

ZONA III: Comprende a suelos Tipo S3, cuyas velocidades de ondas de corte (V_s) son <180 m/s, correspondiendo a suelos blandos. Esta zona está conformada por estratos superficiales finos y arenas de gran espesor que se encuentran en un estado suelto, subyaciendo a estratos de material gravoso. Los periodos predominantes en esta zona son de 0.5 y 0.7 segundos.

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: Comprende a suelos Tipo S4, cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales. Esta zona está conformada por:

-Zona IVa: Depósitos eólicos, fluviales, marinos y/o suelos pantanosos.

-Zona IVb: Zonas de topografía irregular, susceptibles a generar derrumbe, flujos detríticos.

-Zona IVc: Depósitos de relleno sueltos, desmonte heterogéneos, rellenos sanitarios.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes

obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica de las áreas urbanas Torata-Yacango, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

Conclusiones

- La geomorfología de la ciudad de Torata está conformada por una terraza fluvio-aluvial, donde se asienta la mayor parte de la zona urbana, sobre el 60% de la zona de estudio.
- La geomorfología de Yacango está conformada por una extensa Terraza fluvio-aluvial que abarca el 30% de la zona de estudio y sobre la cual se asientan las zonas agrícolas de Yacango. La mayor parte del área urbana se establece al pie y en las faldas de una montaña denominada por los pobladores como cerro Mejía. Las montañas que rodean a Yacango, en especial la montaña denominada Cerro Baúl, ha sido erosionada por procesos de denudación que han creado unidades geomorfológicas como lo son: abanicos aluviales y lomas alargadas que rodean a las zonas agrícolas de Yacango, todos a las faldas del cerro Baúl. Finalmente, se tiene un lecho fluvial que ha sido formado por las aguas del río Torata con dirección este a oeste. Estas unidades geomorfológicas pertenecen a un valle que se ubica en el flanco andino del sur del Perú, a unos 15 km al nor-este de Moquegua.
- La geodinámica superficial de Torata está representada por movimientos en masa tipo: caída de rocas identificados en cerro Blanco, carretera que va hacia el sector de Labramane, en las laderas que se encuentran a 50 metros al sur de la compañía de bomberos, los flujos de detritos se desarrollan en las laderas del sector sur del denominado cerro Cruz del siglo, estos flujos se desplazan en dirección norte -sur desde la parte alta de las laderas hacia la carretera Binacional. Asimismo las laderas existen zonas susceptibles a movimientos en masa como: caída de rocas, flujo de detritos y deslizamientos de tierra. Debido a la composición litológica de los suelos de cimentación, que corresponden a suelos volcánico-sedimentarios de la formación Paralaque e Inogoya y podrían afectar las zonas urbanas de Torata ubicadas a 100 metros abajo.

- Los resultados obtenidos para el área urbana de Torata - Yacango han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de dos (2) zona sísmica correspondientes a suelos Tipo S1 y S4, que comprenden a suelos rígidos y excepcionales, ver Figura 7.

- En la ciudad de Yacango se han encontrado 4 tipos de suelos de los cuales se tiene, suelos del tipo (GM) conformados por limos, arenas y gravas mal graduadas con clastos angulosos a subangulosos no presentan plasticidad y se ubican en las zonas urbanas del cerro Mejía donde se establece la mayor población en los sectores de Carretera Yacango, Asociación de vivienda Mejía, y finalmente en el asentamiento humano Cerro Baúl. Suelos (GC-GM) Estos suelos corresponden a gravas arcillosas con contenido de limo y arena, que se han identificado en su mayoría en las zonas agrícolas de Yacango.

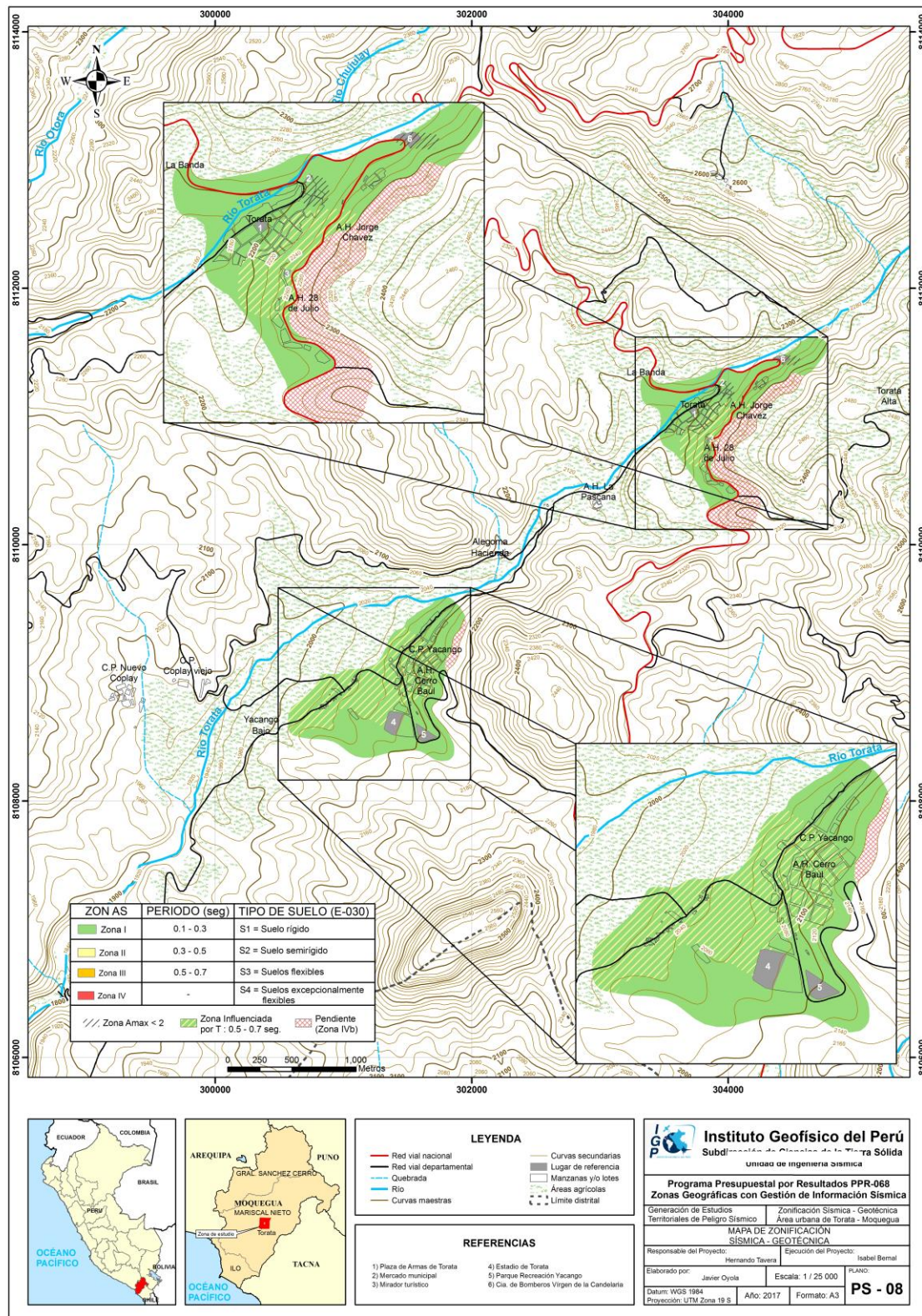


Figura 7: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para las áreas urbanas de Torata- Yacango.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE YACANGO

CONTENIDO

1. METODOLOGÍA

2. GEOMORFOLOGÍA

2.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

2.2. Pendientes

2.2.1. Clasificación del grado de pendientes

2.3. Unidades geomorfológicas

2.3.1. Montaña

2.3.2. Colina

2.3.3. Lomas

2.3.4. Abanico aluvial

2.3.5. Terraza fluvio-aluvial

2.3.6. Lecho fluvial

3. GEOLOGÍA

3.1. Geología regional

3.1.1.- Geología histórica

3.1.2.- Geología estructural

3.2. Geología local

3.2.1. Grupo Toquepala (KsP-to)

3.2.2. Depósitos cuaternarios

4. GEODINÁMICA

4.1. Procesos de geodinámica interna

4.2. Procesos de geodinámica externa

4.2.1. Flujos de detritos

4.2.2. Caída de rocas

5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

5.1. Exploraciones a cielo abierto (ASTM D 420)

5.1.1. Procedimiento

5.1.2. Descripción de calicatas

5.2. Exploraciones con posteadora manual o mecánica (Norma ASTM D1452)

5.2.1. Procedimiento

5.3. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

5.3.1. Procedimiento

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

5.4.1. Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del NSPT

5.5. Clasificación de suelos SUCS

5.6. Ensayos de corte directo (Norma, ASTM D-3080)

5.7. Capacidad de carga admisible

5.7.1. Carga última

5.7.2. Tipos de capacidad de carga admisible

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización geológica y geotécnica de los suelos de Yacango se ha seguido la siguiente metodología:

- **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales (WorlView-2 con resolución 0.5m., del servidor DigitalGlobe, año 2010) georreferenciadas usando los sistemas de información geográfica (SIG), a fin de delimitar la zona estudio. Asimismo, se realizó la recopilación de información geológica regional y local existente ubicada en boletines geológicos, informes técnicos, entre otros.
- **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:10,000. Asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos.
- **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos de acuerdo al siguiente detalle:
Elaboración de calicatas a una profundidad promedio de 3.00 m. En el área urbana de Torata se realizaron 5 calicatas distribuidas en el centro urbano y otras de expansión urbana.

Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), realizados para determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados. Se realizaron 7 DPLs.

Ejecución de auscultaciones haciendo uso de posteadora, distribuidas en puntos intermedios a la ubicación de las calicatas a fin de determinar el tipo de suelo. En el área de estudio se realizaron 5 posteos.

- **Laboratorio:** Procesamiento de las muestras de suelos a través de ensayos de laboratorio: granulometría (Clasificación SUCS), humedad, densidad y capacidad de carga admisible.
- **Gabinete II:** Análisis de los resultados obtenidos en campo: elaboración de fichas geotécnicas (calicatas, densidad, posteos, DPL, correlación DPL con el SPT) y elaboración de mapas temáticos y el respectivo informe técnico.

2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas de relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan. Este relieve es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como creadoras de grandes elevaciones y depresiones producidas fundamentalmente por movimientos en masa de componente vertical; mientras que, las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado. Estos últimos llamados procesos de geodinámica externa 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 relación a su origen, en este capítulo se describen las características físicas de las geoformas existentes en Yacango.

Previamente, en base al levantamiento fotogramétrico realizado y mediante herramientas computacionales SIG, se han elaborado los siguientes planos: Modelo Digital de Elevación (MDE) y Pendientes. Estos permiten de delimitar las características geomorfológicas del terreno (geoformas), y que fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo a través del cartografiado y delimitación de sus unidades geomorfológicas.

2.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los MDE son representaciones gráficas de la superficie del terreno, conformados por un número de puntos 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 (Felicísimo, 1994)

Para la elaboración del MDE de la ciudad de Yacango, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel obtenidas anteriormente y teniendo

como resultado la representación digital de la superficie del terreno de la localidad, que sobre un área de 6.57 km² aproximadamente (Figura 1).

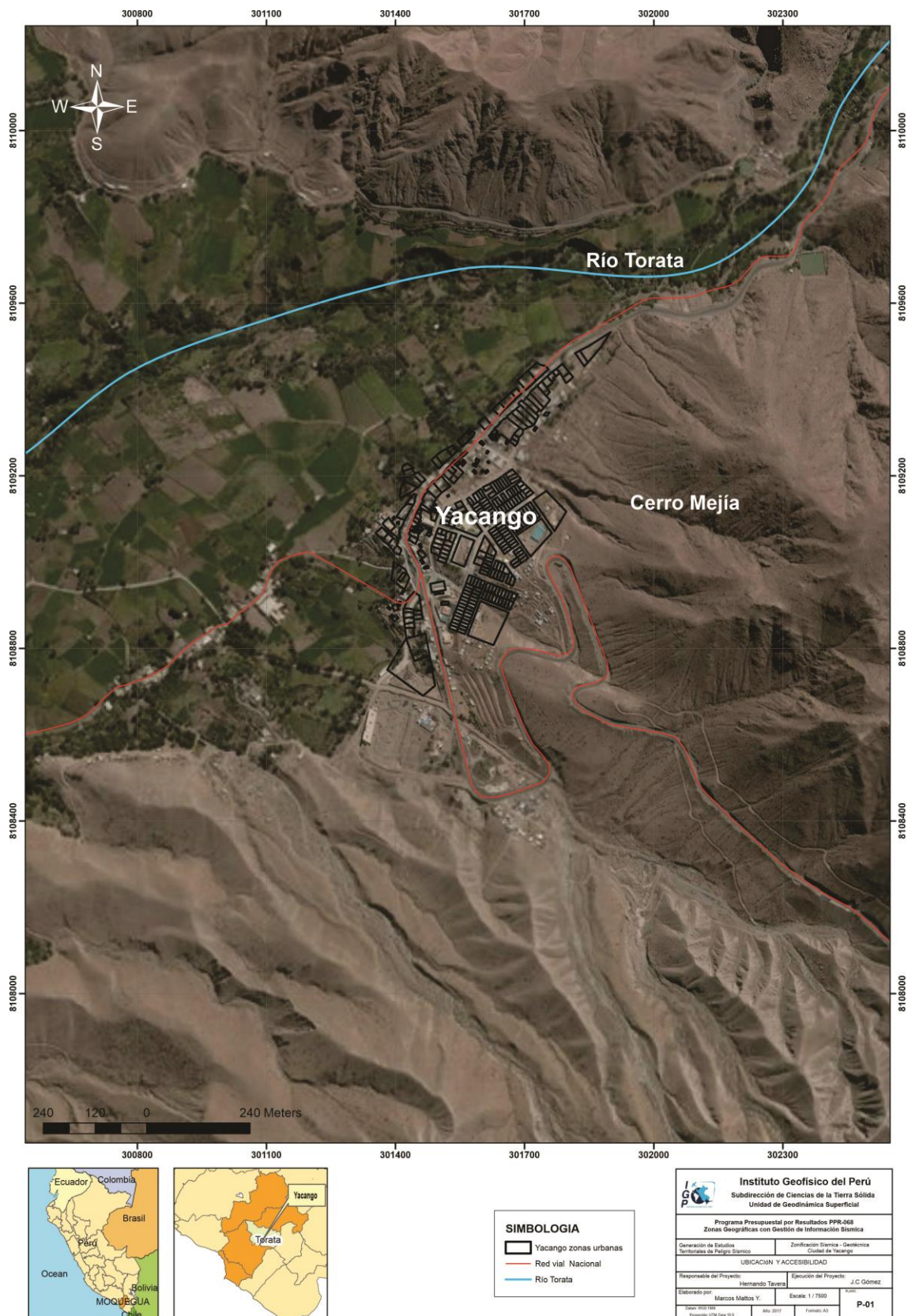


Figura 1: Mapa de modelo digital de elevación para el área urbana de Yacango y alrededores.

En base al MDT elaborado para el área urbana de Yacango se ha reconocido que el 90% de la zona urbana se asienta sobre las laderas de una Montaña, con cotas en el rango de 2100 y 2615 m.s.n.m. Las zonas agrícolas se asientan sobre una terraza Fluvio-aluvial con cotas entre 2000 y 2100 m.s.n.m. Sobre esta ultima zona, se encuentra el 10 % del área urbana.

2.2. Pendientes

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

El diseño del mapa de pendientes del área urbana de Yacango, fue desarrollado a partir del MDE elaborado anteriormente, haciendo uso de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc) para 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 la hipótesis de 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 mayor parte de la zona urbana de Yacango (90% aproximadamente), se encuentra asentada en las laderas de una montaña que presenta pendientes menores a 25° en promedio; mientras que las zonas agrícolas se asientan sobre una terraza fluvio-aluvial con inclinaciones menores a 15° Figura 2.

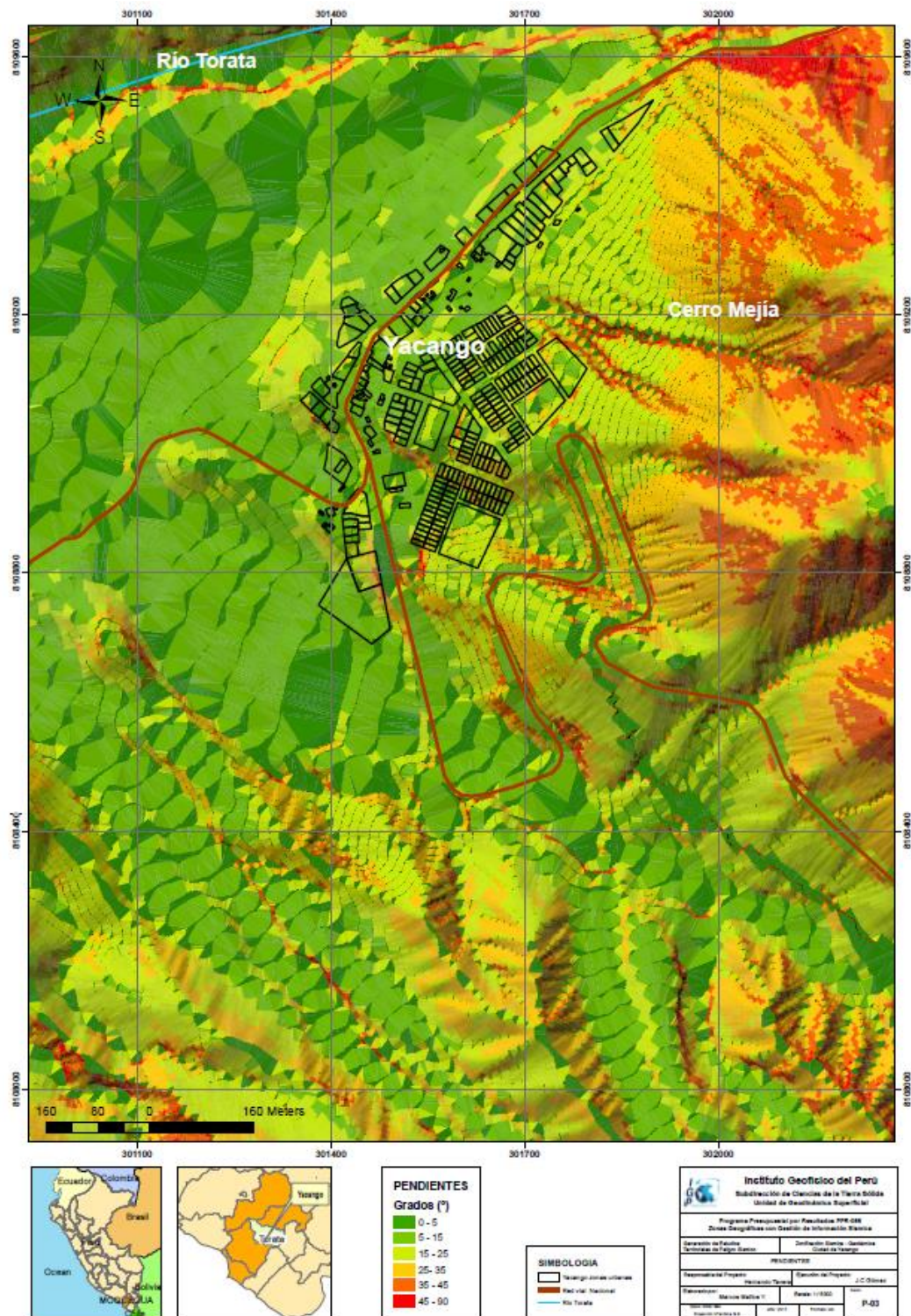


Figura 2: Mapa de pendientes del terreno para el área urbana de Yacango y alrededores.

2.3. Unidades geomorfológicas

Estas unidades con ciertas características físicas son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno (procesos internos) y exógenos (procesos externos), y que en conjunto forman relieves positivos y negativos (Figura 3).

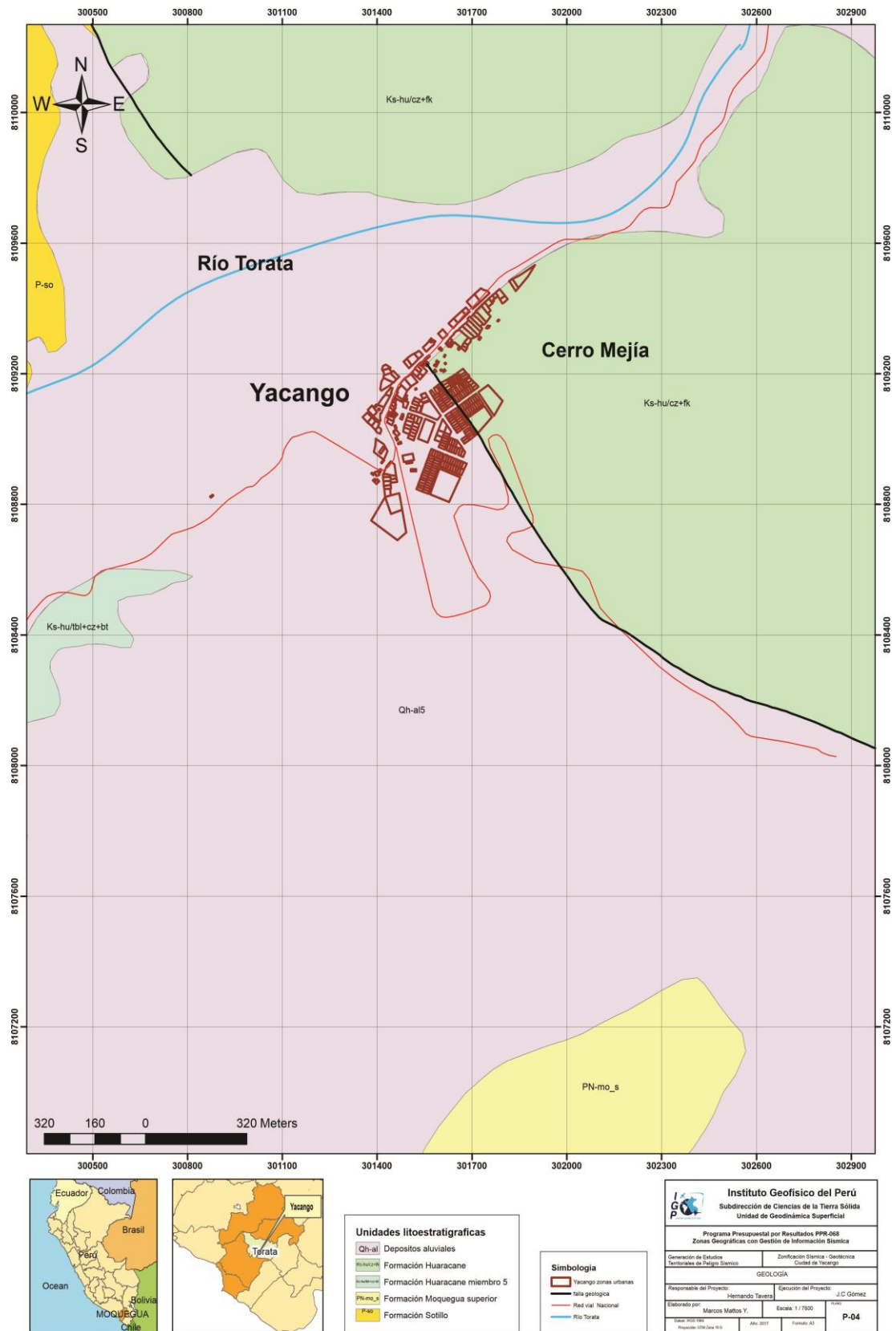


Figura 3: Mapa geomorfológico para el área urbana de Yacango y alrededores.

Características físicas: Las características físicas de la geoforma; es decir, su relieve, expresa una combinación de parámetros como: pendientes, alturas, geometrías y drenajes (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 tales como el agua, viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos como el intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación generando diferentes geoformas, clasificándose 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, en el área urbana de Yacango, se cartografiaron seis unidades geomorfológicas: Lecho fluvial, Terraza fluvio-aluvial, Abanico aluvial, Loma, Colina y Montaña (Tabla 2 y Figura 4).

Tabla 2: Geoformas en el área urbana de Torata en base a sus características físicas y origen.

GEOMORFOLOGIA DE LA CIUDAD DE YACANGO			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		ORIGEN	UNIDAD GEOMORFOLOGICA
Pendiente	< 5°	Denudacional	Lecho Fluvial
Geometría	Alargado		
Drenaje	Meandrico		
Pendiente	< 5°	Depositacional	Terraza fluvio-aluvial
Geometría	Irregular		
Drenaje	Irregular		
Pendiente	> 25°	Depositacional	Abanico aluvial
Geometría	conica		
Drenaje	Irregular		
Pendiente	< 35°	Denudacional	Loma
Altura	< 300 m		
Geometría	Alargado		
Drenaje	Dentritica		
Pendiente	< 20°	Denudacional	Colina
Altura	< 100		
Geometría	Redondeada		
Drenaje	Radial		
Pendiente	< 30°	Orogénico	Montaña
Altura	> 600		
Geometría	Irregular		
Drenaje	Dentritica		

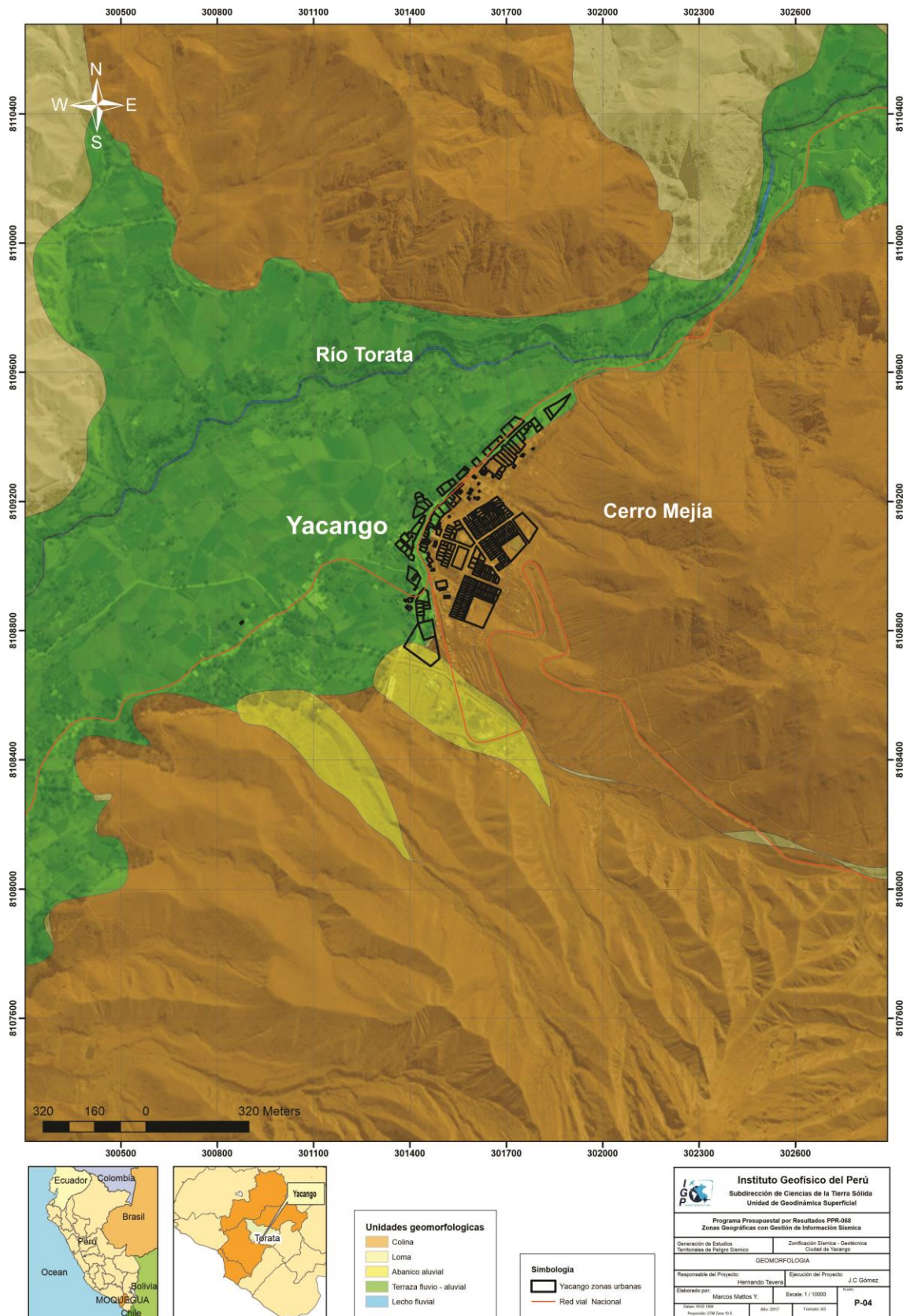


Figura 4: Mapa geomorfológico para el área urbana Yacango y alrededores.

2.3.1. Montaña

Una montaña es una elevación importante conformada por tierras, rocas, y lavas, que forman una elevación natural de gran altura y de grandes dimensiones (mayor de 700 m), cuya característica predominante es que posee formas de cono o pico.

Por lo general, las montañas se forman como consecuencia directa de movimientos tectónicos y el vulcanismo; mientras que, los ríos, las condiciones climatológicas y los glaciares inciden de manera importante en la erosión de las formaciones montañosas. Con mayor frecuencia, las montañas forman parte de cordilleras, no obstante, hay algunos casos alrededor del mundo, en los que éstas surgieron de manera aislada. Esta unidad geomorfológica de origen orogénico presenta una forma de cono erosionado. Por ejemplo, a 1.5 km al este del Cerro Baúl, existe una montaña donde se asienta la población de Yacango, denominada Cerro Mejía.

Es muy importante mencionar que el Cerro Baúl, que geomorfológicamente es una montaña, ha pasado por procesos de erosión, y meteorización producida por agentes meteorológicos a lo largo del tiempo, dando como resultado una montaña con una geoforma muy particular, tiene en su base lomas alargadas a causa de los procesos antes indicados. Esta ciudad está ubicada al este del Cerro Mejía y a 2 km de distancia de la Plaza principal de Yacango (Figura 5 y 6).

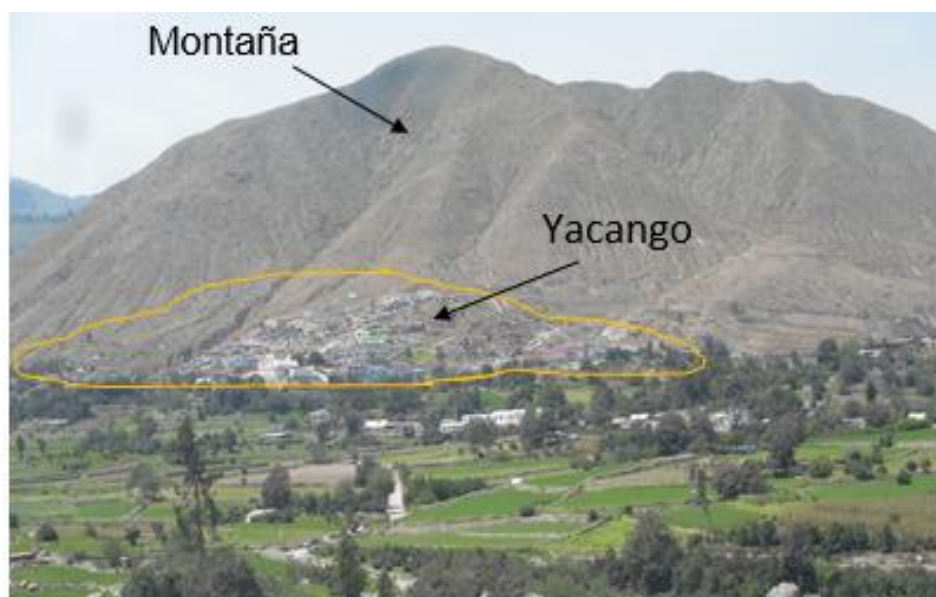


Figura 5: Área urbana de Yacango asentada al pie de la montaña denominada Cerro Mejía.



Figura 6: Montaña Cerro Baúl ubicada a 2 km al sur-oeste de Yacango y que rodea la zona de estudio.

2.3.2. Colina:

Esta unidad geomorfológica de origen denudacional presenta pendientes $< 35^\circ$, alturas < 300 m, forma redondeada y drenaje detrítico. Alrededor de las zonas agrícolas de Yacango existen varias colinas erosionadas y meteorizadas con un aspecto desértico con poca vegetación (Figura 7).



Figura 7: Colina ubicada en las cercanías de Yacango.

2.3.3. Lomas

Estas geoformas presentan una pendiente $< 20^\circ$, altura < 100 m, geometría alargada, drenaje radial y origen denudacional. Esta unidad abarca el 5.7 % del área de estudio. Y se ubican a 1,24 km al nor-oeste de Yacango, (Figura 8).



Figura 8: Lomas ubicadas al nor-oeste de Yacango que rodean a las zonas agrícolas de la zona del área de estudio.

2.3.4. Abanico aluvial

Un abanico aluvial o cono aluvial o cono de deyección (Colombo 1979), es un depósito de sedimentos. Compuestos por gravas, arenas, y sedimentos más finos (Patton et al, 1970), que se acumulan en la base más llana de un frente montañoso o en el interior de un área montañosa, allí donde el relieve se amplía o disminuye la pendiente de un torrente. Su superficie forma un cono que radia pendiente abajo.

En la ciudad de Yacango los procesos de erosión y meteorización y depositación, conjuntamente con los procesos gravitacionales, han creado estas geoformas que descienden desde la montaña cerro Baúl hacia la parte más llana como las zonas agrícolas de la ciudad de Yacango. Se hace mención que esta unidad abarca el 20 % del área de estudio (Figura 9).



Figura 9: Abanico aluvial ubicado a 0.58 km al sur-oeste de la Plaza principal de Yacango, al pie de la montaña cerro Baúl.

2.3.5. Terraza fluvio-aluvial

En la ciudad de Yacango esta unidad geomorfológica, de origen depositacional comprende el 15.4 % del área de estudio una pendiente menor a los 10° , así como una geometría y drenaje irregular que la constituye como una la terraza reciente. Actualmente, sobre esta unidad geomorfológica se asientan las zonas agrícolas de Yacango; mientras que, sobre las terrazas ubicadas a 1 km al sur-oeste de la Plaza de Yacango, se evidencia la presencia de rocas de más de 2 metros de diámetro que pudieron ser traídas por aluviones antiguos (Figura 10).



Figura 10: Terraza fluvio-aluvial con actividades agrícolas en Yacango. Se observan rocas mayores a los 2 metros de diámetro que se asientan en estos campos agrícolas, provenientes de aluviones pasados.

2.3.6. Lecho fluvial

Esta unidad geomorfológica de origen depositacional, presenta una pendiente $< 5^\circ$, así como una geometría y drenaje irregular. Esta unidad abarca el 1.1 % del área de estudio y se encuentra ubicada a lo largo del cauce del río Torata, en la localidad de Yacango, ver Figura 11.



Figura 11: Lecho fluvial del río Torata en inmediaciones de la localidad de Yacango

3. GEOLOGÍA

La geología es la ciencia que estudia la Tierra, los materiales que la componen, las estructuras y 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 (procesos 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 dejan espacios por donde 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 y depositada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas lo que determina también su dureza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice (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 del suelo, dando como resultado las geoformas que componen el relieve, los factores condicionantes como la litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes: sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caída de rocas).

Para entender el comportamiento del terreno, es necesario conocer los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación) y por ello, se estudian las rocas y los suelos que provienen de dichos procesos; además de analizando las propiedades asociadas al comportamiento mecánico.

La geología comprende varias disciplinas como la geología regional, histórica y estructural que explican el cómo, cuándo y que procesos actuaron en el emplazamiento de las rocas y materiales que constituyen los suelos sobre los que asienta la zona estudiada y sus características son las siguientes:

3.1. Geología regional

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Por ello, se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2012) a escala 1:50,000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Cretáceo Inferior (145 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

3.1.1. Geología histórica

La Región Moquegua, durante el Paleozoico fue escenario de transgresiones y regresiones marinas, de movimientos orogénicos. En la región no se han reconocido depósitos de triásico inferior y medio, no se han encontrado rocas de dicha edad, por lo que todo indicaría que fue una época de emersión general. Existen afloramientos del Triásico superior y el Jurásico inferior, representados por formaciones continentales volcánicas y semicontinentales. Durante los inicios del Jurásico superior se produce, en el sur del Perú, una transgresión marina, procedente del Pacífico y que abarca grandes extensiones de la región.

Al finalizar el terciario inferior ò comienzos del superior, se produjo el sistema de fallas de Incapuquio, y la gran depresión longitudinal. Las fallas de Incapuquio crearon en algunos lugares zonas de debilidad que hicieron posible el emplazamiento de los stocks de pórfido monzonítico y dacítico. Las formaciones de las chimeneas de brecha están relacionadas con la génesis de los depósitos de cobre diseminados en Toquepala, Cuajone y Quellaveco.

Después de depositarse la formación Moquegua, siguió un episodio volcánico de carácter explosivo y de posiblemente de origen fisural muy intenso y cuyos depósitos (volcánico huaylillas) cubrieron ampliamente el flanco andino, para luego continuar con un ciclo volcánico de carácter efusivo explosivo que tuvo lugar en el término del Terciario, debido al cual se tiene la faja montañosa de conos volcánicos con rumbo NO–SE se encuentran en la parte alta de las regiones de Tacna, Moquegua, Arequipa.

Durante el Terciario Superior y el Cuaternario, en la región de Moquegua, al igual que en el resto del bloque andino, se produjo un proceso de orogénesis hasta

alcanzar sus altitudes actuales. Como consecuencia del levantamiento andino, los ríos abandonaron fuertemente a sus cauces formando valles profundos y encañonados. Actualmente, el tectonismo se manifiesta en forma de movimientos sísmicos y ocurren con mucha frecuencia a lo largo de los andes.

3.1.2. Geología estructural

Las características estructurales de esta región son complejas, pero se puede diferenciar unidades morfoestructurales y litológicas con diferentes grados de deformación producto, de por lo menos, cinco eventos distróficos y cuyos efectos están sobreimpuestos, por ejemplo los plegamientos están presentes en las secuencias volcánicas – sedimentarias del Grupo Toquepala. La región está dividida en dos zonas estructurales, una occidental representada por la cuenca Moquegua en donde se depositaron decenas de metros de sedimentos limoarcillosos, areniscas y conglomerados (formaciones Sotillo - Moquegua) como producto del levantamiento y degradación del frente montañoso oriental. Estos procesos están directamente relacionados al sistema Incapuquio y la segunda zona oriental maciza está conformada por secuencias volcánicas e intrusivas afectada por juegos de fallas con orientación paralela NO-SE como Micalaco, Capillune y Quellaveco.

Plegamientos

La ciudad de Yacango, está directamente influenciada por el sistema de fallas de Incapuquio, con rumbo de NO 40° - 60°, siendo reconocida su traza desde Chile, donde tiene por nombre Sistema de Fallas Domeyco con una longitud de más de 200 km y que recorre Tacna, Moquegua, Arequipa. Este sistema tiene un ancho mayor a los 1000 metros. La existencia de una falla que cruza la ciudad de Yacango con dirección SE-NO, aun todavía no ha sido estudiada ni cartografiada, es por eso que se le conoce como una falla inferida.

3.2. Geología local

Consistió en el reconocimiento de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Yacango a escala 1:10,000, y sobre un área de 9 km² y las cuales se describen a continuación (Figura 12):

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	SÍMBOLO	LITOLOGÍA
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENO	DEPÓSITOS FLUVIALES	Qh-fl	GRAVAS, ARENAS, LIMOS, ARCILLAS
			DEPÓSITOS ALUVIALES	Qh-al	GRAVAS, ARENAS Y LIMOS
		PLEISTOCENO			
	NEÓGENO	PLIOCENO			
		MIOCENO			
	PALEÓGENO	EOCENO-OLIGOCENO	FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR	PN-no_s	CONGLOMERADOS POLIMICTICOS, ARENISCAS GRUESAS, EN LOS NIVELES SUPERIORES TOBAS LÍTICAS
			FORMACIÓN SOTILLO	P-so	ARENISCAS Y LIMOLITAS ROJAS
MESOZOICA	CRETÁCIO	SUPERIOR			
			Formación Huaracane miembro 5	Ks-hu/tbl+cz+bt	FLUJOS PIROCLÁSTICOS DE TOBA-LAPILLI DE CUARZO BIOTITA GRIS ROSADAS
			Formación Huaracane miembro 4	Ks-hu/cz+fk	LAVAS PIROCLÁSTICAS SOLDADAS DE CUARZO-FELDESPATO, MACIZOS PORFIRÍTICOS, GRIS ROJIZO, COMPOSICIÓN RIOLITAS
	JURÁSICO	SUPERIOR			

Figura 11: Columna cronolitoestratigráfica de la zona de estudio.

3.2.1. Grupo Toquepala (KsP-to)

Este grupo está representado por cuatro formaciones conformadas por rocas volcánicas con intercalaciones de sedimentos clásticos que se describen a continuación:

Formación Huracane (Ks-hu)

Dividida en 7 unidades Volcanoclasticas y reconocida anteriormente como Formación Toquepala (Bellido y Landa 1965). En las laderas de la montaña, denominada cerro Mejía en la ciudad de Yacango, afloran ampliamente rocas de la Formación Huaracane Miembro 04 - 250 m. (Ks-hu/cz+fk) conformada por lavas piroclasticas soldadas de cuarzo-feldespato, macizos porfiríticos, gris rojizo, composición riolitas. La Formación Huaracane Miembro 5 (Ks-hu/tbl+cz+bt), litológicamente conformada por flujos piroclasticos de toba-lapilli (Figura 13).



Figura 13: Lavas piroclásticas constituidas por cuarzo y feldespatos con presencia de cenizas.

Formación Moquegua Superior (PN-mo_s)

En la carretera Interoceánica sur que va hacia las ciudades de Torata y Yacango, a 2 km al sur-oeste de Yacango, se encuentra el remanente más espectacular de la Formación Moquegua constituida por el cerro Baúl. Esta conformada por bancos horizontales de conglomerados de elementos pequeños, subredondeados a angulosos, de 0.5 a 0.3 cm de sección. En una matriz areno tufácea de grano grueso, los bancos de conglomerados tienen en promedio 0.80 metros a 1 metro de espesor y se componen casi íntegramente de rocas del Grupo Toquepala (Figura 14).

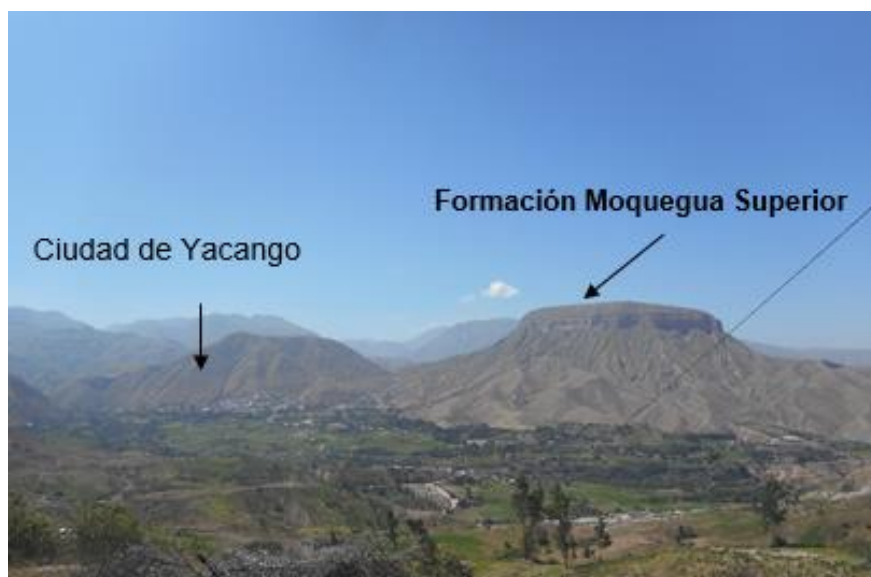


Figura 14: Vista panorámica del Cerro Baúl, litológicamente compuesto por capas de la Formación Moquegua.

Formación sotillo (P-so)

Litológicamente esta conformada por areniscas y arcosas volcanoclasticas, grises con tonalidades rojizas, que se encuentran disconforme sobre volcanitas jurásicas e intrusivos Cretácicos. Presentan estratificación paralela subhorizontal predominando las lodolitas en los niveles superiores así como capas de yeso, las que se incrementan en su tercio superior. La transición con la Formación Moquegua está señalada por un banco de 15 a 20 cm. de yeso, estas facies se ubican al sur oeste de Moquegua, afloran ampliamente a 1 km al nor-oeste de la ciudad de Yacango.

3.2.2. Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo al substrato rocoso conformado por rocas intrusivas, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente de origen aluvial, eólico y fluvial.

Las características de estos materiales se describen a continuación:

Depósitos aluviales (Qh-al)

Compuestos de gravas, arenas y limos en canales activos, polimícticos con clastos subredondeados a subangulares, con soporte de matriz areno limoso asociados a flujos de barro y conos aluviales. Afloran ampliamente en las inmediaciones del Cerro Baúl y zonas agrícolas de Yacango (Figura 15).



Figura 15: Depósitos aluviales, gravas angulosas de 1" a 3" de diámetro en una matriz limosa beige, semicompacta, sin humedad, en la parte superior clastos heterogéneos, en la parte inferior clastos > 1" de diámetro, ubicados en la base del denominado Cerro Baúl.

Depósitos fluviales

Compuestos por limos arenas y arcillas, traídos por la dinámica del río Torata cubriendo depósitos cubren las zonas agrícolas junto en la localidad de Yacango, ver Figura 16.



Figura 16: Limos, arenas, arcillas en las riberas del río Torata presentes en el camino a la ciudad de Yacango.

4. GEODINÁMICA

Comprende todos aquellos eventos geodinámicos producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que dan como producto eventos que modifican el actual relieve.

Es importante recalcar que, analizar factores como la litología permite explicar el origen de los materiales que constituyen las geoformas (colinas, lomas, entre otras) y en las cuales se generan procesos como meteorización y erosión que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

4.1. Procesos de geodinámica interna

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

4.2. Procesos de geodinámica externa

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

Asimismo, estos procesos tienen como factores condicionantes a la geomorfología (formas de relieve), litología (tipos de rocas y/o suelos), y estructuras geológicas (pliegues y disposición de estratos) que interactúan con los factores detonantes como sísmicos (sismicidad de la zona), climatológicos (incremento de las

precipitaciones) y antrópicos (urbanismo, uso del suelo y construcción de vías de comunicación).

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

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

La acción por separado o en conjunto de los factores que dan origen a los procesos externos, favorecen a la ocurrencia de los eventos geodinámicos (Figura 17), los cuales se dividen, según su origen en: fluvio-aluvial e hidro-gravitacional, descritos a continuación.

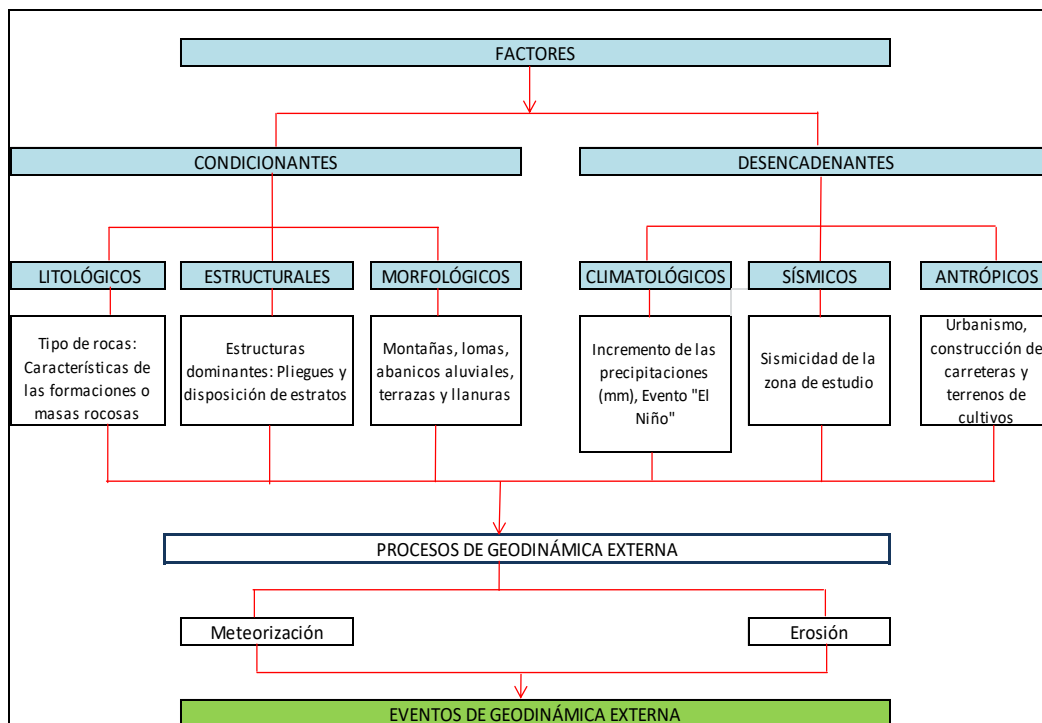


Figura 17: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

- **Fluvio-aluvial:** Los procesos de erosión (carcaveo, incisión y desgaste laminar) son originados por las precipitaciones que se presentan en la cuenca fluvial, genera la escorrentía superficial que provoca el arrastre progresiva de los materiales a posiciones de menor energía potencial (menor pendiente). La carga de sedimentos transportados por la quebrada o río incrementan la acción erosiva y son capaces de producir remoción la de los materiales, (Brusi, 2013): Flujos de detritos e inundación.

Los eventos geodinámicos originados por procesos pluviales y que podrían afectar a la zona de estudio son:

-**Flujos de detritos (huaicos):** Movimiento de materiales sin cohesión (materiales sueltos) que se comportan como fluidos a causa del agua (provoca la pérdida total de resistencia de estos materiales) y se desplazan sin presentar superficies de rotura definidas, en algunos casos depositan sus materiales en forma de conos de deyección, ver Figura 18.

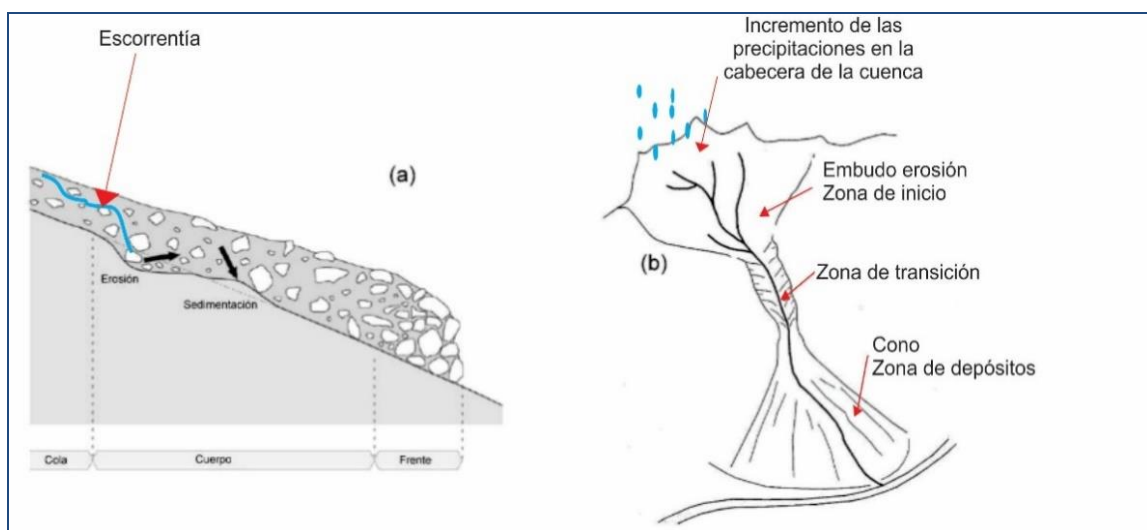


Figura 18: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la deposición del material), modificado del GITS (Grupo de investigación de transportes de sedimentos).

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

elementos: el tipo de movimiento (caída, volcamiento y deslizamiento) y el material sean rocas y suelos divididos en detritos y tierras.

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%) de una zona se le denominan lluvias extraordinarias o tormenta extrema. Estas al desarrollarse generan crecidas causando inundaciones de las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico.

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

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

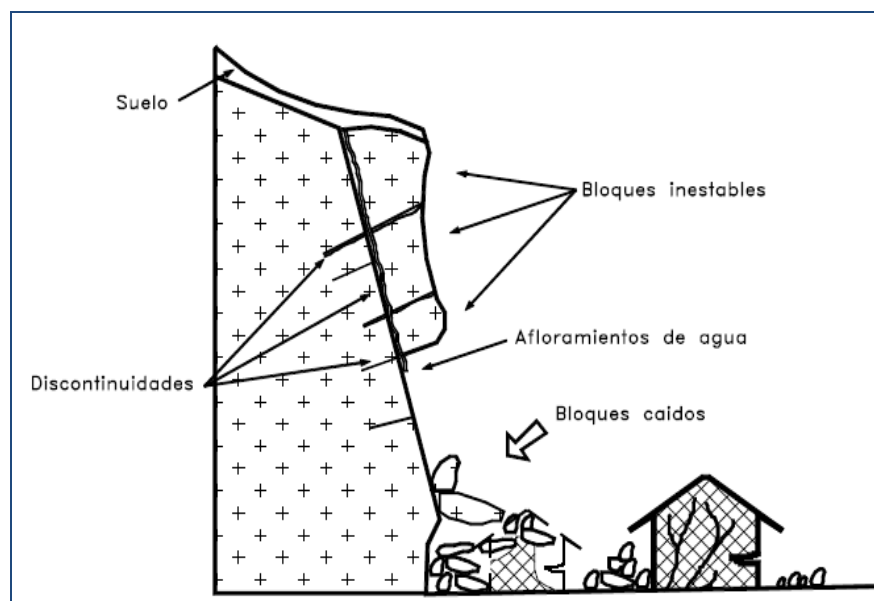


Figura 19: Proceso de caída de rocas. Fuente: Suárez (1998)

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

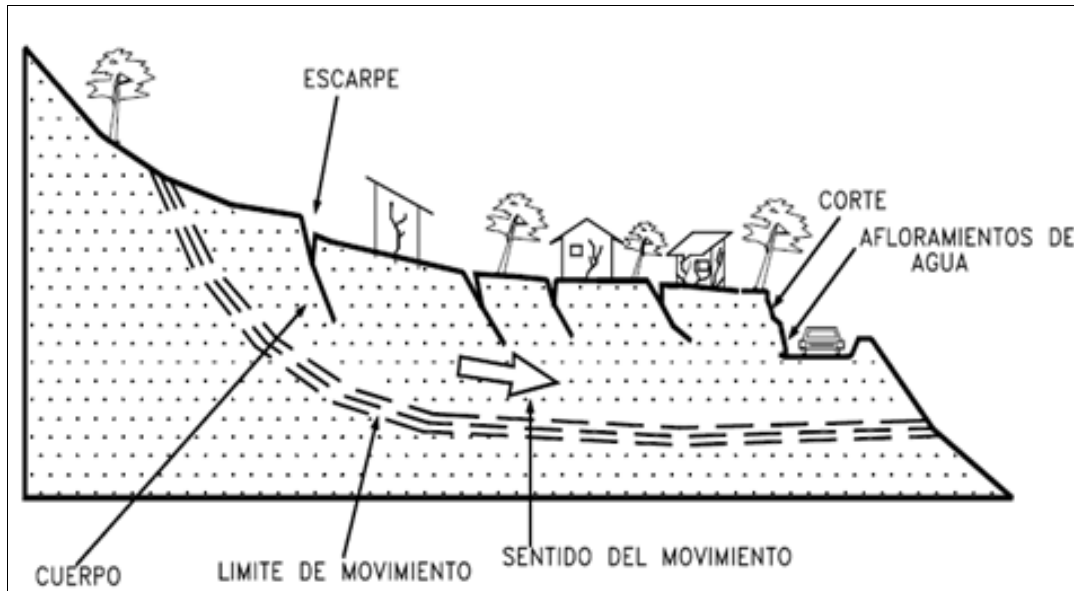


Figura 20: Deslizamiento en laderas.

Se pueden clasificar en:

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

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

En Yacango, existen 2 tipos de eventos geodinámicos (Figura 21), según el proceso y factores que intervienen, se han clasificado de la siguiente manera:

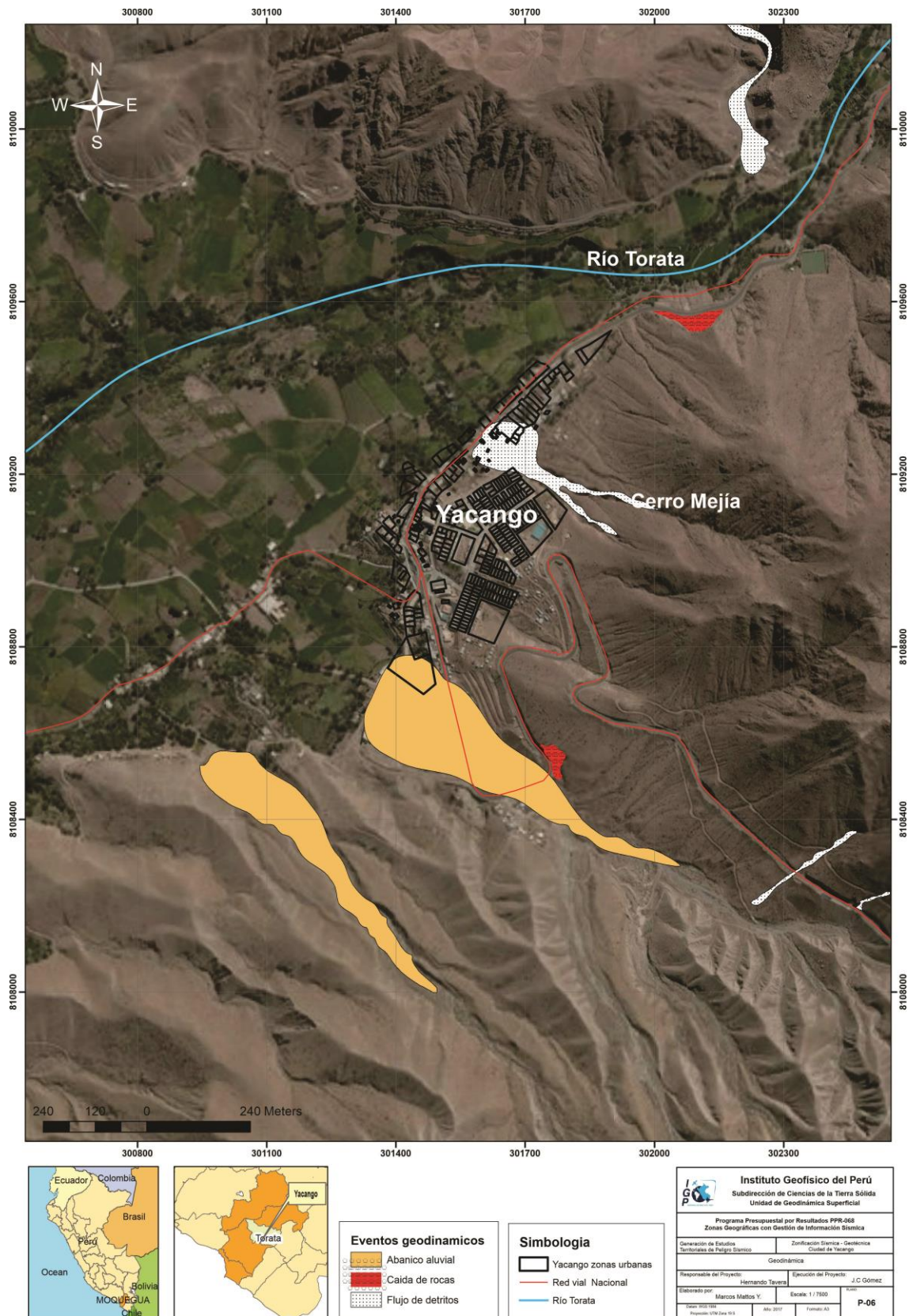


Figura 21: Mapa Geodinámico del área urbana de Yacango y alrededores.

4.2.1 Flujos de detritos

Son eventos rápidos saturados y no plásticos que ocurren principalmente confinados a un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce de canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender por el canal hasta depositarse en forma de abanicos.

En la zona de estudio, los flujos de detritos han formado abanicos aluviales que se ubican en las laderas del cerro baúl, conformados por gravas, arenas y limos que descienden desde las laderas más altas del cerro Baúl, hasta las zonas más bajas como las áreas agrícolas. Estos flujos de detritos se encuentran inactivos, pero podrían activarse en épocas de precipitación. El 2015 una de las quebradas se activó y afectó a la asociación Alto Maravillas ubicada en las faldas del cerro Baúl (Figura 22).



Figura 22: Flujo de detritos (Poligono amarillo), ubicados en las laderas del cerro Baúl.

4.2.2 Caída de rocas

En este tipo de evento, los clastos o fragmentos de rocas preexistentes se desprenden de una ladera como resultado de procesos de erosión y meteorización, ya sea de origen natural o antrópico (construcción de vías de acceso, que desestabilizan las laderas de las lomas). En la zona de estudio, se identificaron caídas de rocas en las laderas de las lomas y montañas que rodean la zona urbana de Yacango (Figura 23).

Estos eventos no afectan directamente a la población, pues no existen viviendas en sus cercanías.



Figura 23: Caída de rocas (polígono amarillo) en el cerro Mejía en el área urbana de Yacango que afecta la carretera Binacional.

5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los suelos son materiales inconsolidados conformados por minerales, materia orgánica, agua y aire entre sus poros, que se generan a partir de la alteración de la roca madre por agentes atmosféricos, erosionándola y formando una cobertura de variado espesor de sedimentos, que posteriormente han sido 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) para determinar las características granulométricas y los límites plásticos, 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 (Figura 24).

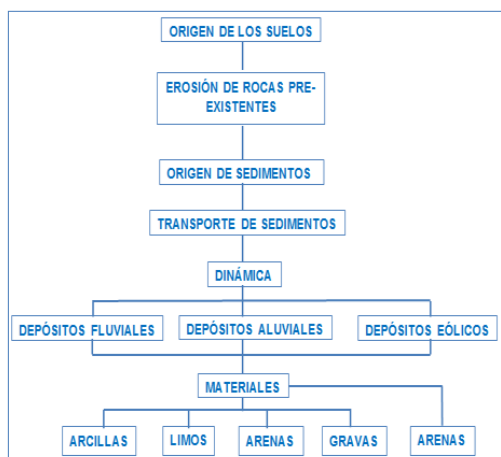


Figura 24: Diagrama del origen de los suelos.

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas, así como, el comportamiento en condiciones estáticas de los suelos y rocas, evaluadas mediante la aplicación de técnicas de exploración, entre las cuales se tienen: calicatas, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio. El objetivo es determinar las propiedades físicas de los suelos de cimentación.

En Yacango se realizó el estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), ver Figura 25.

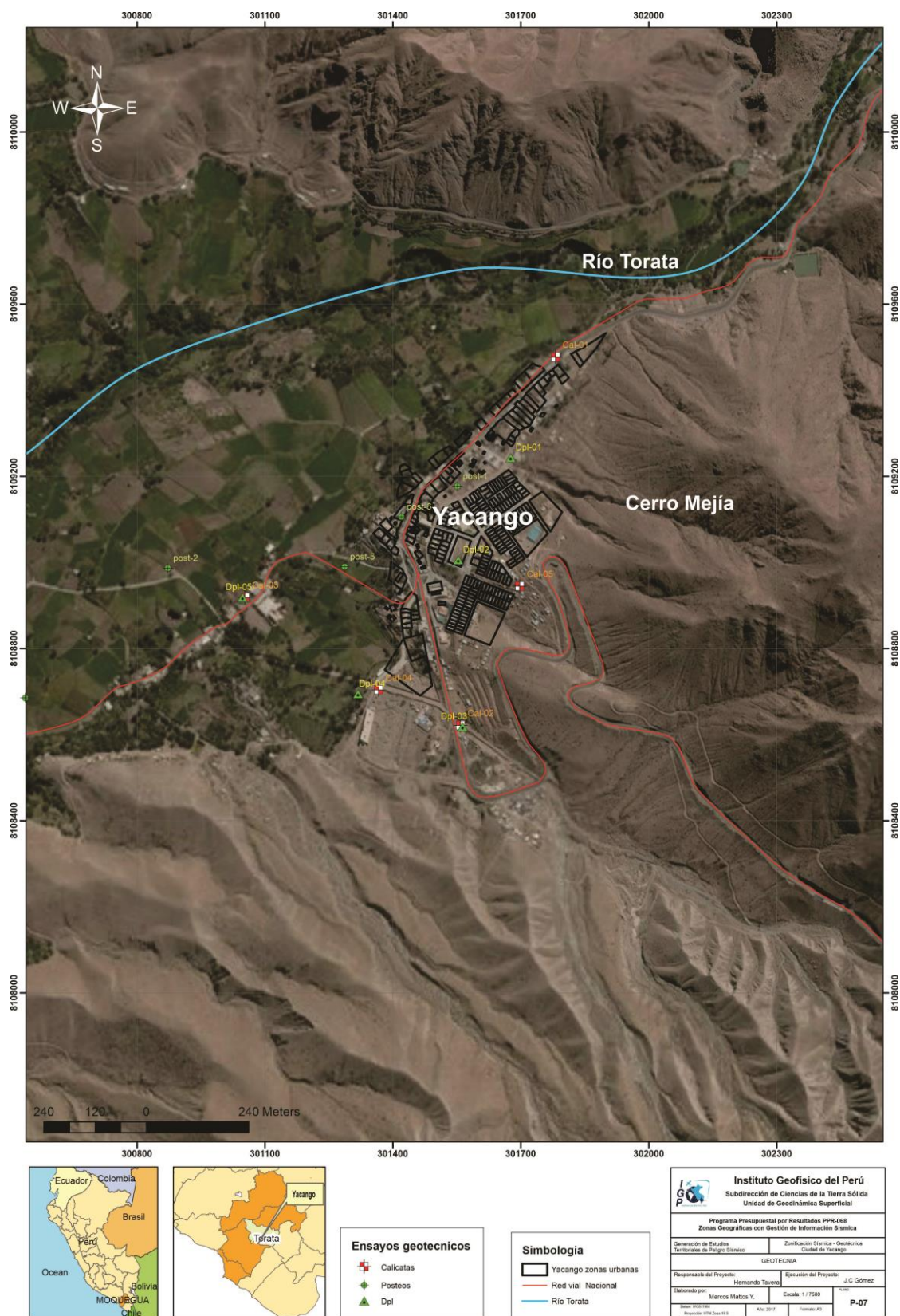


Figura 25: Mapa de ubicación de ensayos Geotécnicos el área urbana de Yacango y alrededores.

Asimismo, de las calicatas se extrajeron 5 muestras que fueron analizadas en el laboratorio y realizar ensayos de mecánica de suelos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad de carga admisible.

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 a cierta profundidad (aproximadamente 3.00 m.), a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras para la realización de ensayos y análisis. Estas calicatas son realizadas con maquinaria (retroexcavadora) o de forma manual.

5.1.1. Procedimiento

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

- Reconocimiento de la zona de estudio: Las exploraciones se distribuyen de forma uniforme en el área urbana de Yacango, considerando las características del terreno y accesibilidad.
- Excavaciones: Estas tuvieron las siguientes dimensiones: 1.5 x 1.5 m. y aproximadamente 3.00 m.
- Muestreo: 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.

5.1.2. Descripción de calicatas

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo (ver Anexos) y las coordenadas de la ubicación de cada calicata se muestra en Tabla 3.

Tabla 3: Ubicación de calicatas (N.P=No presenta nivel freático).

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
CAL - 01	301781	8109477	2076	2.00	NP
CAL - 02	301558	8108621	2067	2.40	NP
CAL - 03	301053	8108918	2045	2.80	NP
CAL - 04	301366	8108703	2079	2.90	NP
CAL - 05	301697	8108944	2153	2.80	NP

En general, las profundidades promedio sobrepasaron los 2.40 m, no habiéndose encontrado niveles freáticos a lo largo de la columna. La presencia de gravas y el sustrato rocoso dificultó las excavaciones a partir de los 2 metros de profundidad, encontraron en los primeros metros de capas de arenas finas y limos (Figura 26).



Figura 26: Calicata de 2 m, de profundidad en el sector Centro recreacional en Yacango.

5.2. Exploraciones con posteadora (Norma ASTM D1452)

Se define como posteadora a un barrenador manual en forma de "T" que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta profundidades de 5 a 6 m. Las muestras extraídas se obtienen trituradas y completamente alteradas; sin embargo, sirven para reconocer los tipos de suelo y contenido de humedad que presentan. La posteadora presenta restricciones en suelos con presencia de gravas y gravillas (las cucharas sacan muestras se entrampan con este tipo de suelos).

5.2.1. Procedimiento

Con la posteadora se penetra el subsuelo, desde la superficie, de tal manera que se gira manualmente el equipo ejerciendo presión sobre el suelo, a medida que va incrementando la profundidad, se van conectando y añadiendo las varillas de 1 metro de extensión. Para la obtención de las muestras se cuenta con las cucharas acopladas en el extremo.

Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existía información geotécnica. Las coordenadas de los puntos de medida se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Coordenadas UTM de ubicación de Posteos (N.P.= No presenta)

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPOS DE SUELOS (SUCS)	NIVEL FREÁTICO (m)
POST-01	301551	8109176	2092	0.50	ML	NP
POST-02	300872	8108986	2028	0.70	SM	NP
POST-03	300538	8108684	2008	1.00	SM	NP
POST-04	300076	8108291	2028	1.00	CH	NP
POST-05	301287	8108989	2054	0.50	GC	NP
POST-06	301420	8109105	2085	0.30	GM	NP

Los suelos en el área urbana de Yacango están conformados principalmente por estratos superficiales de arenas finas, limos, arcillas inorgánicas de alta plasticidad, mezcladas con gravas; por esta razón el equipo no ha penetrado a mayor profundidad, que 1 metro. Los detalles del reconocimiento de suelo se adjuntan fichas de posteos que se presentan en el Anexo (Figura 27).



Figura 27: Posteo en el sector bajo el Chojal en Yacango.

5.3. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

Se realizan con un equipo de campo de registro continuo (se contabiliza el número de golpes para penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo) y permite estimar la resistencia del material (suelo) en kg/cm^2 al hincado del cono dinámico. La ventaja es que este equipo es muy práctico y se puede transportar fácilmente.

El método consiste en introducir al suelo una varilla de acero con punta cónica de 60° , mediante la aplicación de golpes con un martillo de 10 kg, que se deja caer desde una altura de 0.50 m. Como medida de la resistencia a la penetración se registra el número "N" (número de golpes en 10 cm de penetración), información que luego se correlaciona con algunas propiedades relativas del suelo como con sus parámetros de resistencia al corte, capacidad portante, densidad relativa, etc. Luego, usando fórmulas empíricas, donde se introduce el "N" se obtiene el ángulo de fricción interna de los distintos materiales.

Se hace mención que, este ensayo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo arenoso, no recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

5.3.1. Procedimiento

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Ubicación de los puntos de ensayos: Se distribuyeron generalmente al costado y en puntos intermedios a algunas de las calicatas, a fin de obtener mayor información sobre resistencia del suelo en el área estudiada.

Ensamble de equipo: Consiste en conectar los accesorios del equipo, considerando la punta cónica al final de la varilla de penetración, esta 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 a norma técnica).

En la Tabla 5, se indica la ubicación de los 6 ensayos DPL realizados en el área urbana de Yacango (Figura 28). La profundidad alcanzada a pesar de los estratos contienen gravas, es de 1.10 m. Posteriormente, estos valores se corrigen y se correlacionaron para obtener el N y el SPT, para calcular algunos parámetros geotécnicos como: ángulo de fricción y cohesión, para generalmente calcular la capacidad de carga admisible.

Tabla 5: Ubicación de ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL).

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.n.s.m)	PROFUNDIDAD (m)	NÚMERO DE GOLPES	ϕ
DPL-01	301676	8109243	2094	0.76	40	38.5
DPL-02	301553	8109005	2104	0.20	35	37.3
DPL-03	301563	8108618	2097	0.50	45	39.7
DPL-04	301318	8108698	2067	1.10	40	38.5
DPL-05	301047	8108918	2040	0.93	37	37.7
DPL-06	374396	8487333	1997	0.77	45	39.7



Figura 28: Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL-03).

Los ensayos de DPL han alcanzado una profundidad máxima de 1.10 m y mínima de 0.20 m, ya que los suelos están conformados por gravas que presentan ángulos de fricción entre 38.5° y 39.7° en promedio, característico de suelos granulares de compacidad alta. Los datos obtenidos de los ensayos se presentan en fichas de DPL, las mismas que se adjuntan en los Anexos.

5.4. 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 del ensayo DPL (NDPL) fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar (NSPT) y así obtener el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente la capacidad de carga admisible.

La correlación entre el número de golpes del ensayo DPL y SPT, se realizó en base a las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), y para ello se utilizó una fórmula empírica:

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

Dónde:

N₁= Número de golpes equivalente en SPT

N₂= Número de golpes obtenidos en DPL

W₁= Peso del martillo del DPL

W₂= Peso del martillo SPT

H₁= Altura de caída de DPL

H₂= Altura de caída del SPT

A₁= Área de la punta cónica del DPL

A₂= Área de la punta cónica del SPT

e₁= Espesor de la hincia del DPL

e₂= Espesor de la hincia del SPT

Una vez calculado los valores de golpes con el SPT (NSPT), se realizaron las correcciones por: nivel freático, eficiencia, longitud y diámetro; para así obtener un nuevo valor de número de golpes por ensayo SPT (N'SPT). Este último parámetro permite estimar el ángulo de fricción interna de los suelos.

5.4.1 Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del NSPT

Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen diversas fórmulas empíricas propuestas por diversos autores como Dunham, Osaki (1959), Muromachi (1974), Peck (1974), Das (1995), y Katanaka y Uchida (1996). Para el caso de Yacango, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), debido a que, es la más usada internacionalmente y sus resultados son conservadores ver Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Cálculo del ángulo de fricción interna, usando valores de NSPT

ENSAYO	N _{SPT} CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT})	N _{SPT} CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT})
DPL-04	19.35	35.9		
DPL-05	8.95	28.4		
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO	1.00 – 1.20 m		1.30 – 1.50 m	

Tabla 7: Compacidad relativa y ángulo de fricción interna e los suelos en base al NSPT (Crespo, 2004)

COMPACIDAD RELATIVA DE SUELOS GRANULARES			CONSISTENCIA EN SUELOS COHESIVOS		
VALOR DE N _{SPT}	COMPACIDAD RELATIVA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ	VALOR DE N _{SPT}	CONSISTENCIA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ
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 resultados obtenidos, los suelos en el área urbana de Yacango, en su mayoría son granulares (limo-gravas), aunque la profundidad de los ensayos permiten llegar a profundidades menores a 1.10 m debido a que en los suelos

superficiales se encontraban gravas que no permitían ingresar a mayores profundidades. El valor del ángulo de fricción interna, los suelos presentan compacidad media.

Finalmente, en los anexos se adjunta las fichas resumen de cada uno de los ensayos, tal como se muestra en la Figura 29.

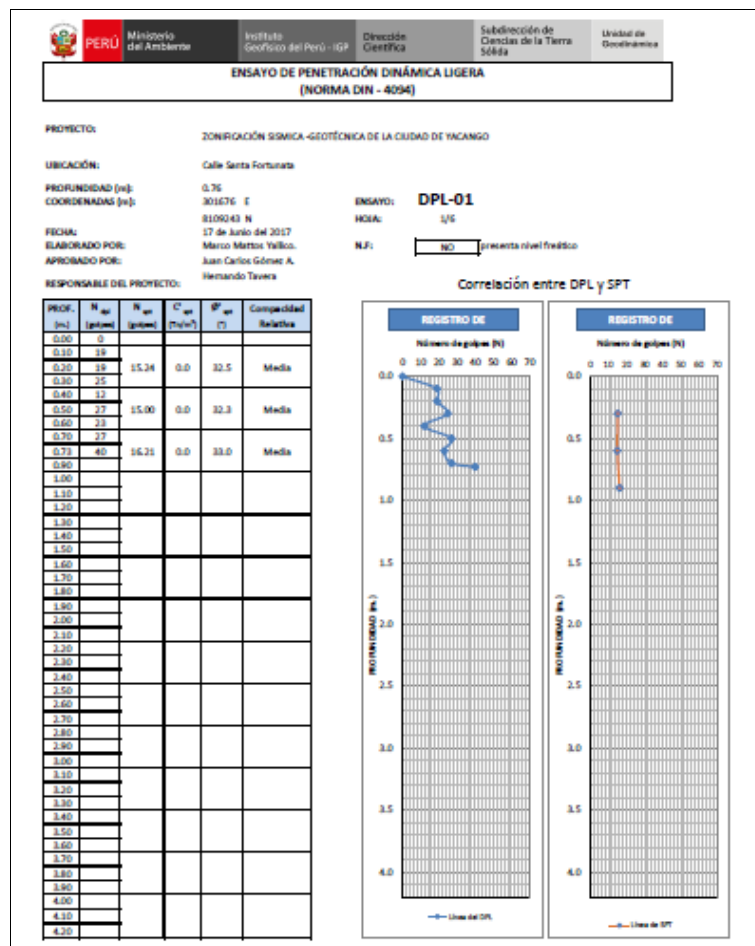


Figura 29: Diagrama de correlación entre el número de golpes del DPL y el número de golpes del SPT, y cálculo del ángulo de fricción interna corregido.

5.5. Suelos Clasificación SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos, DPL y la inspección visual del terreno en el área urbana de Yacango, se ha identificado 02 tipo de suelos que corresponden a tipo GM presentes en las zonas urbanas que se establecen en el Cerro Mejía, y suelos tipo GC en las zonas agrícolas (Figura 30).

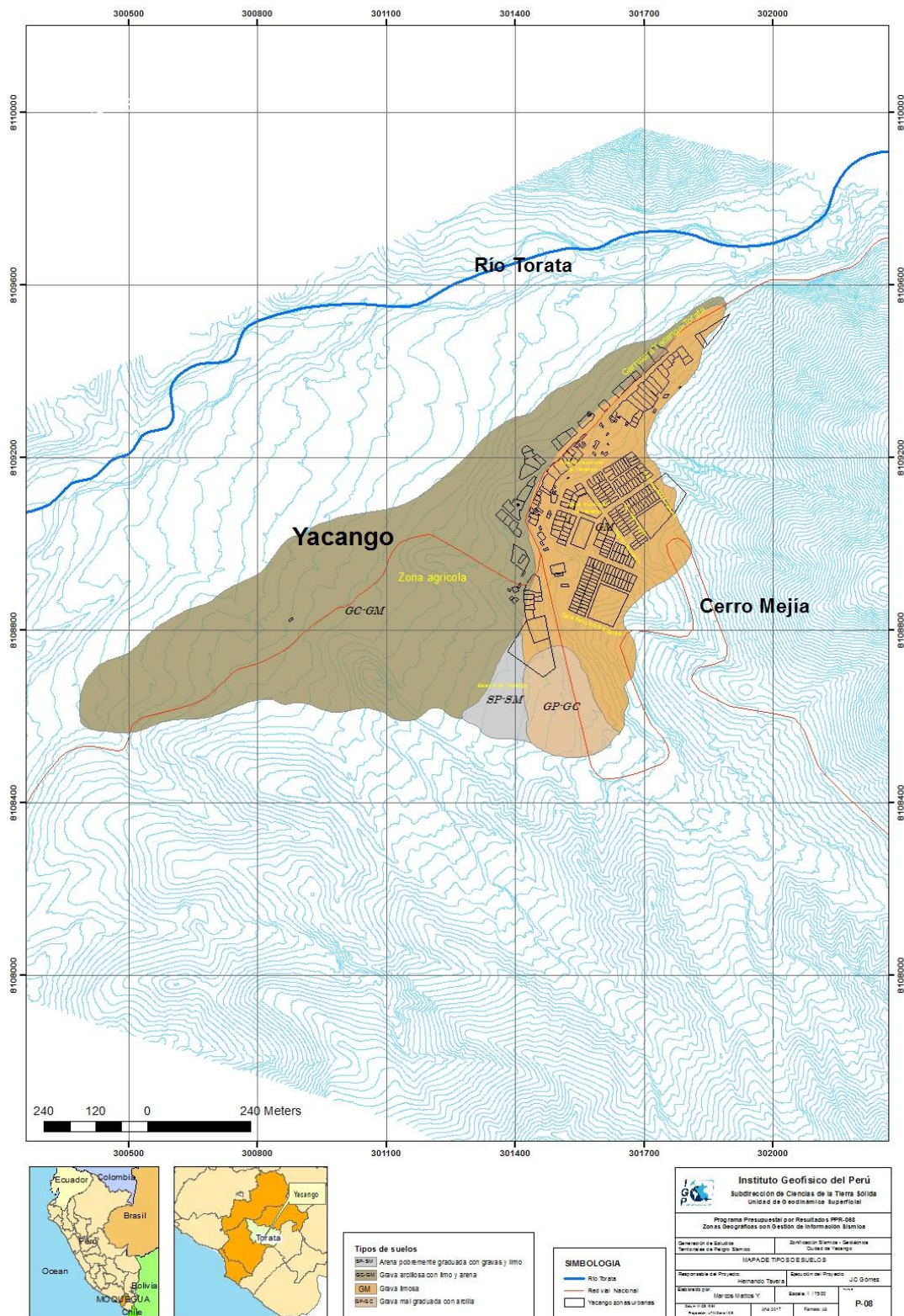


Figura 30: Mapa de tipos de suelos en el área urbana de Yacango y alrededores.

- **Suelos GM:** Estos suelos conformados por limos, arenas y gravas mal graduadas con clastos angulosos a subangulosos que varían en tamaño pudiéndose renocer estos entre 0.50 metro. Estos suelos se han sido identificados en los ensayos geotécnicos de las calicatas Cal-01, Cal-02, Cal-05. El contenido de humedad es menor al 5% y constituyen suelos con grado de compactación media, no presentan plasticidad y se ubican en las zonas urbanas del Cerro Mejía donde se establece la mayor población, así como en los sectores de Carretera Yacango, Asociación de vivienda Mejía, y finalmente, en el Asentamiento humano Cerro Baúl (Tabla 8).
- **Suelos tipo SP-SM:** Están conformados por arenas pobremente graduadas con gravas y limos con clastos angulosos a subangulosos. Son suelos medianamente compactos con contenido de humedad menor al 5%. Estos suelos, se han identificado en la calicata número CAL-04, que se ubican en el sector del Estadio de Yacango.
- **Suelos tipo GP-GC:** Estos suelos están conformados por gravas mal graduadas con arcillas y se ubican en las zonas de expansión urbana, a 200 metros al sur-oeste de la plaza principal. El contenido de humedad es menor 7% y lo constituyen suelos con grado de compactación media identificados en los ensayos de DPL -03 y Cal-02.
- **Suelos tipo GC_GM:** Estos suelos corresponden a gravas arcillosas con contenido de limo y arena, presentes en su mayoría en las zonas agrícolas de Yacango. Presentan un índice de plasticidad de 2,2 y un contenido de humedad de 10%. Estos suelos se han identificado con los ensayos geotécnicos de posteo: post-02, post-03, post-04 y Cal-03.

Tabla 8: Clasificación de Suelos de las cinco (05) calicatas elaboradas en el área urbana de Yacango, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
CAL - 01	2.00	N.P.	37.1	38.0	24.84	N.P.	N.P.	N.P.	11	SP-SM	Arena mal graduada con limo
CAL- 02	2.40	N.P.	50.9	33.1	16.1	30.6	30.00	6.6	6.4	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla
CAL- 03	2.80	N.P.	32.4	31.4	36.23	22.2	20.00	2.2	10.1	ML	Limo de baja plasticidad
CAL- 04	2.90	N.P.	41.3	40.1	18.63	N.P.	N.P.	N.P.	5.1	SP-GM	Arena mal graduada con gravas y limo
CAL- 05	3.00	N.P.	30.80	49.60	19.60	34.80	30.40	4.40	7.12	SM-SC	Arena limosa y arena arcillosa

5.6. Ensayos de corte directo (Norma, ASTM D-3080)

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

Para el área del estudio, los valores de los ensayos de corte directo se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Valores obtenidos del ensayo de corte directo.

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m^2)	Densidad natural (Tn/m^3)
CAL-01	28.15	0.07	1.80
CAL-02	26.12	0.08	1.90
CAL-03	27.00	0.07	1.93
CAL-04	28.14	0.07	1.84
CAL-05	26.17	0.08	1.94

De los resultados obtenidos, se evidencia que, los suelos en el área de Yacango, en la mayoría no presentan cohesión y los valores del ángulo de fricción interna son menores a 30° , característico de suelos granulares compuestos por arenas y gravas.

5.7. Capacidad de carga admisible ($q_{ad} = \frac{q_u}{F_s}$)

Se define como el esfuerzo máximo que puede ser aplicado a la masa de suelo de tal forma que se cumplan los requerimientos básicos establecidos por la relación

entre la carga última y un factor de seguridad cuyo valor es de 3, esto de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones E.050.

5.7.1. Carga última (q_u)

Es la presión última por unidad de área de la cimentación soportada por el suelo en exceso de la presión causada por el suelo alrededor al nivel de la cimentación. Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo y en base al N_{spt} (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usaran para determinar la capacidad de carga última, haciendo uso de las fórmulas de corte general (suelos granulares densos y cohesivos de consistencia dura a rígida) y local (suelos granulares sueltos y cohesivos de consistencia media a semidura) de Terzaghi (1943). A continuación se presentan las siguientes expresiones (Tabla 10):

Fórmula para falla por corte general:

$$q_u = cN_cS_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma S_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local:

Donde:

C: cohesión

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

N_c , N_q , N_γ : Factores de carga,

Tabla 10: Tabla de factores de cohesión, carga y volumétricos. Modificado por Terzaghi, (1943).

para falla general				para falla de corte local			
TERZAGHI (según Kumbhojkar, 1993)				Modificado por TERZAGHI			
Ángulo ϕ	N_c	N_q	N_γ	Ángulo ϕ	N_c	N_q	N_γ
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 admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m, así como para una profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad de carga admisible para los 3 tipos de suelos identificados se presentan en la Figura 31 y las Tablas 11 y 12.

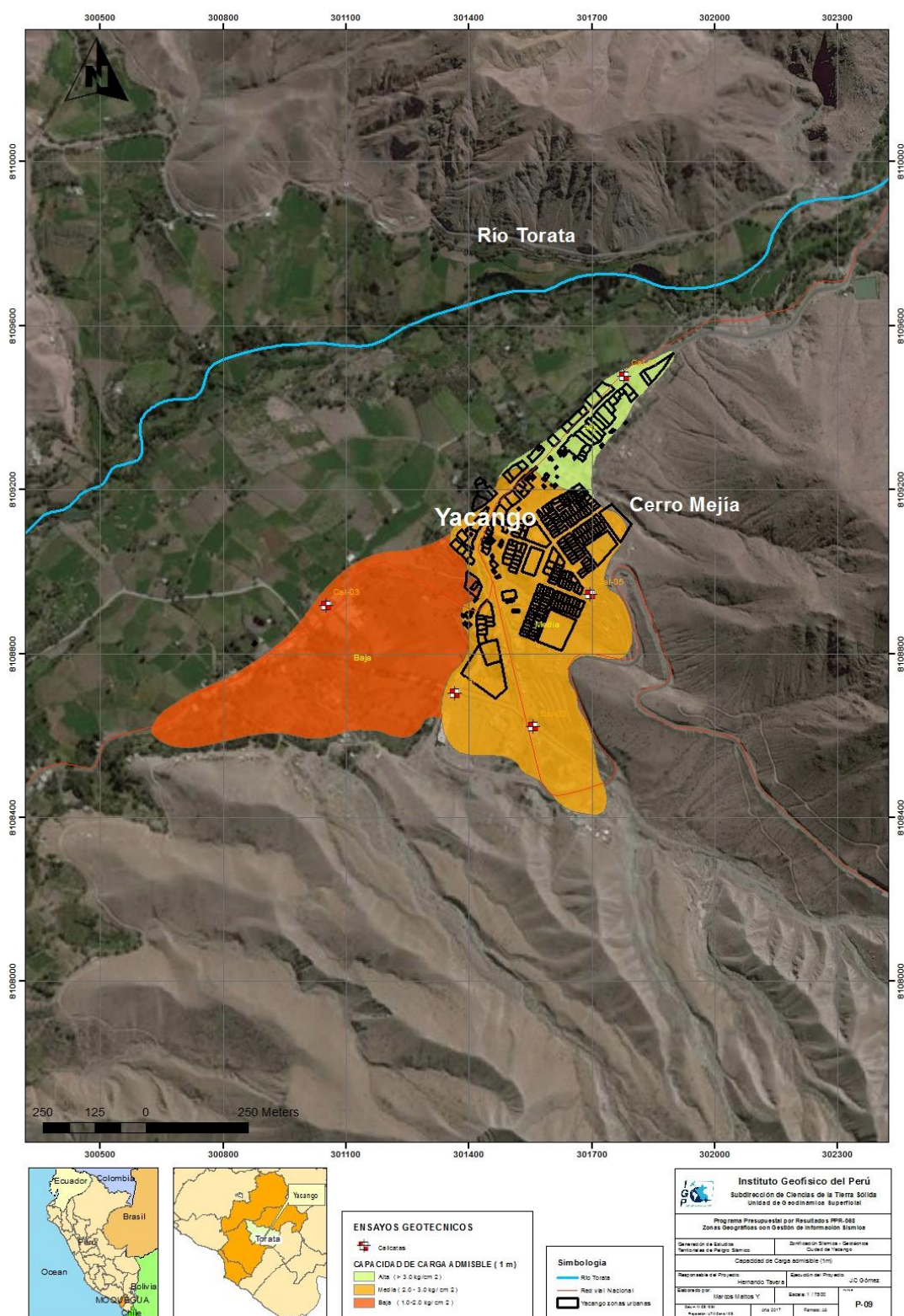


Figura 31: Mapa de Capacidad de Carga admisible para el área urbana de Yacango y alrededores.

Tabla 11: Capacidad de carga admisible para el área urbana de Yacango.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Capacidad de carga última (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
CAL-01	10.17	3.39		
CAL-02	6.91	2.30		
CAL-03	4.51	1.50		
CAL-04	19.37	3.00		
CAL-05	3.35	1.12		
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 12: Capacidad de carga admisible en base a los ensayos de DPL el área urbana de Yacango.

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

5.7.2. Tipos de capacidad de carga admisible

En el área urbana Yacango se han identificado los siguientes tipos de capacidad de carga admisible:

A) Capacidad de carga admisible baja

Comprende rangos de capacidad de carga entre 1.0 – 2.0 kg/cm², para suelos conformados por arcillas, arenas, limos y gravas mal graduadas (GC), con grado de compactación bajo. Abarca menos del 10% del área de estudio y se encuentran en las zonas agrícolas situadas en el lado oeste del Cerro Mejía.

B) Capacidad de carga admisible media

Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 2.00 - 3.00 kg/cm², para suelos conformados por limos, arenas mal graduadas color beige con clastos angulosos a subangulosos, (GM) y cuyo grado de compactación es medio. Estos tipos de suelos son de origen aluvial y abarcan el 60% del área de estudio estando distribuidos en el sector del Asentamiento Humano Cerro Baúl.

C) Capacidad de carga admisible alta

Comprende rangos de capacidad de carga admisible > 3.00 kg/cm², para suelos compuestos por gravas limosas bien graduadas (GW) con arcillas, cuyo grado de compactación es de medio a alto. Este tipo de suelos presentan clastos redondeados a subredondeados de diferentes tamaños (<10 cm y > 50cm) que conforman una capa bien compacta de gravas angulosas de rocas preexistentes. Este tipo de suelos se encuentran distribuidos en el sector de la Av. Yacango y en extremo este del área urbana de Yacango.

6. CONCLUSIONES

- La geomorfología de Yacango está conformada por una extensa Terraza fluvio-aluvial que abarca el 30% de la zona de estudio y sobre la cual se asientan las zonas agrícolas de Yacango, la mayor parte del área urbana se establece al pie y en las faldas de una montaña denominada por los pobladores como cerro Mejía. Las montañas que rodean a Yacango, en especial la montaña denominada cerro Baúl, ha sido erosionada por procesos de denudación que han creado unidades geomorfológicas como abanicos aluviales y lomas alargadas que rodean a la zonas agrícolas de Yacango.
- El sustrato rocoso en el área de estudio está conformado por rocas volcánicas del grupo Toquepala, cuyos afloramientos se encuentran bien definidos en la ciudad de Yacango. En las zonas agrícolas de Yacango los depósitos-fluvio aluviales se han extendido formando una Terraza en el valle de Yacango.
- La geodinámica superficial de Yacango está representada caída de rocas al pie de la carretera Yacango - Torata, al sur de la Plaza principal de Yacango y también al extremo al nor-este de Yacango.
- En la ciudad de Yacango se han identificado 4 tipos de suelos: suelos del tipo GM conformados por limos, arenas y gravas mal graduadas con clastos angulosos a subangulosos que no presentan plasticidad, se encuentran en las zonas urbanas del cerro Mejía donde se establece la mayor población, sectores de Carretera Yacango, Asociación de Vivienda Mejía, y Cerro Baúl. Suelos (GC-GM) conformado suelos corresponden a gravas arcillosas con contenido de limo y arena, presentes en mayoría en las zonas agrícolas de Yacango.
- La capacidad de carga admisible es muy baja $< 1.00 \text{ kg/cm}^2$.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL ÁREA DE TORATA

CONTENIDO

1. METODOLOGÍA

2. GEOMORFOLOGÍA

2.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

2.2. Pendientes

2.2.1. Clasificación del grado de pendientes

2.3. Unidades geomorfológicas

2.3.1. Montañas

2.3.2. Lomas

2.3.3. Terraza fluvio-aluvial

2.3.4. Abanico aluvial

2.3.5. Lecho fluvial

3. GEOLOGÍA

3.1. Geología regional

3.1.1. Geología histórica

3.1.2. Geología estructural

3.2. Geología local

3.2.1. Grupo Toquepala (KsP-to)

3.2.2. Depósitos cuaternarios fluvio-Aluviales (Qh-fl-al)

4. GEODINÁMICA

4.1. Procesos de geodinámica interna

4.2. Procesos de geodinámica externa

5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

5.1. Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM D 420)

5.2. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452)

5.3. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

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

5.4.1 Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del NSPT

5.5. Suelos Clasificación SUCS

5.5. Clasificación de suelos SUCS

5.6. Ensayos de corte directo (Norma, ASTM D-3080)

5.7. Capacidad de carga admisible

5.7.1. Carga última (q_u)

5.7.2. Tipos de capacidad de carga admisible

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización geológica y geotécnica de los suelos del área urbana de Yacango se ha seguido la siguiente metodología:

- **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales (WorlView-2 con resolución 0.5m., del servidor DigitalGlobe, año 2010) georreferenciadas mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). Asimismo, se procedió con la recopilación de información geológica regional y local existente en la bibliografía (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
- **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:10,000. Asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos.

- **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos de acuerdo al siguiente detalle:

Elaboración de calicatas con una profundidad promedio de 3.00 m. En Torata se realizaron 5 calicatas distribuidas en el centro urbano y zonas de expansión urbana.

Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), realizados para determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados: se realizaron 7 DPL.

Ejecución de auscultaciones haciendo uso de una posteadoras, distribuidos en puntos intermedios a la ubicación de las calicatas más próximas. En el área de estudio se realizaron 5 posteos.

- **Laboratorio:** Procesamiento en el laboratorio de las muestras de suelos para conocer granulometría, (Clasificación SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad de carga admisible).

- **Gabinete II:** Análisis de los resultados obtenidos en campo: fichas geotécnicas (calicatas, densidad, posteos, DPL, correlación DPL con el SPT), análisis granulométrico, mapas temáticos y elaboración del informe técnico.

2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas de relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan, siendo es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como creadoras de grandes elevaciones y depresiones producidas fundamentalmente por movimientos en masa de componente vertical; mientras que, las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa que se agrupan en la cadena de la meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutierrez, 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 capítulo se describen las características físicas de las geoformas existentes en el área urbana de Torata, en relación a su origen.

Previamente, en base al levantamiento fotogramétrico y mediante el uso de herramientas computacionales SIG, se han elaborado los planos: Modelo Digital de Elevación (MDE) y Pendientes, con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno (geoformas) y cuyos resultados éstas fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo, a través del cartografiado y delimitación de las unidades geomorfológicas del área urbana.

2.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los MDE son representaciones gráficas de la superficie del terreno, conformados por un número de puntos 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 (Felicísimo, 1994).

Para la elaboración del MDE para el área urbana de Torata, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel obtenidas anteriormente,

teniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno de la localidad sobre un área de 6.57 km² aproximadamente (Figura 1).

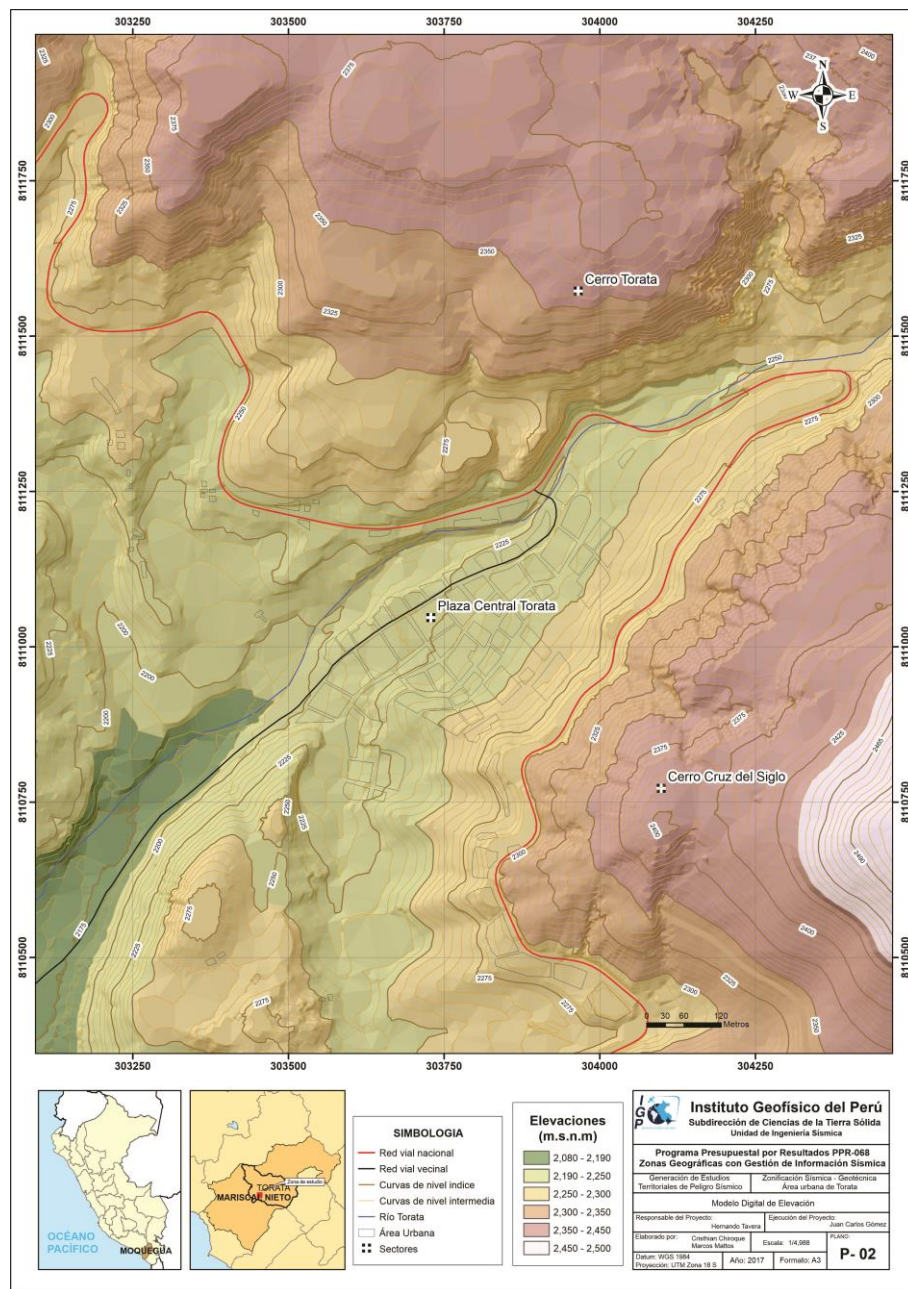


Figura 1: Mapa de modelo digital de elevación para el área urbana de Torata y alrededores.

En base al MDE elaborado para el área urbana de Torata, se evidencia que el 70% del área urbana se asienta sobre una terraza fluvio-aluvial con elevaciones entre 2190 y 2250 m.s.n.m, y el otro 30% se asienta de manera dispersas en las montañas que rodean Torata con elevaciones entre los 2,250 y 2350 m.s.n.m. En el área urbana de Torata las mayores elevaciones se encuentran en las montañas que la rodean

encontrándose estas entre los 2350 y 2500 m.s.n.m, cabe señalar que las montañas de Torata conforman y son parte del flanco andino del sur del Perú.

2.2. Pendientes

Este parámetro influye en la formación de los suelos y condiciona el proceso erosivo, puesto que, mientras más pronunciada sea la pendiente, la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999) (Figura 2).

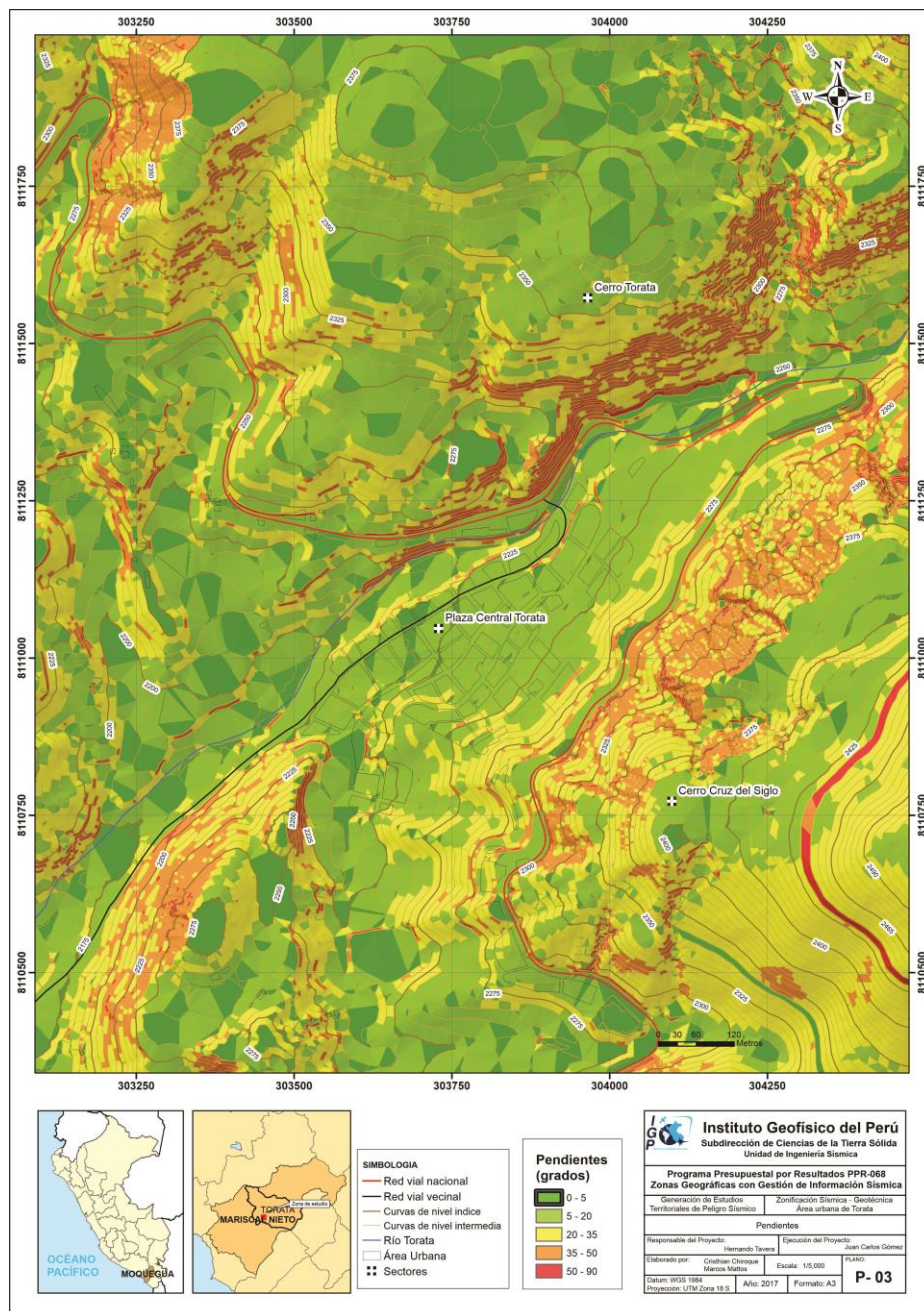


Figura 2: Mapa de pendientes del terreno para el área urbana de Torata y alrededores.

El diseño del mapa de pendientes para el área urbana de Torata, fue desarrollado a partir del MDE elaborado anteriormente, y para ello se utilizara de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc) para 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 la hipótesis de 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 mayor parte del área urbana de Torata (70% aproximadamente), se encuentra asentada sobre una terraza fluvio-aluvial que presenta pendientes menores a 20°; mientras que, las laderas ubicadas a 290 metros al sur este de la Plaza de Torata, al pie de la carretera Binacional presentan inclinaciones entre 20° y 35° grados, aunque las más pronunciadas presentan pendientes de 50° grados; siendo estas zonas susceptibles a movimientos en masa como caída de rocas, flujo de detritos y deslizamientos.

2.3. Unidades geomorfológicas

Estas unidades son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno (procesos internos) y exógenos (procesos externos) para formar relieves positivos y negativos (Figura 3).

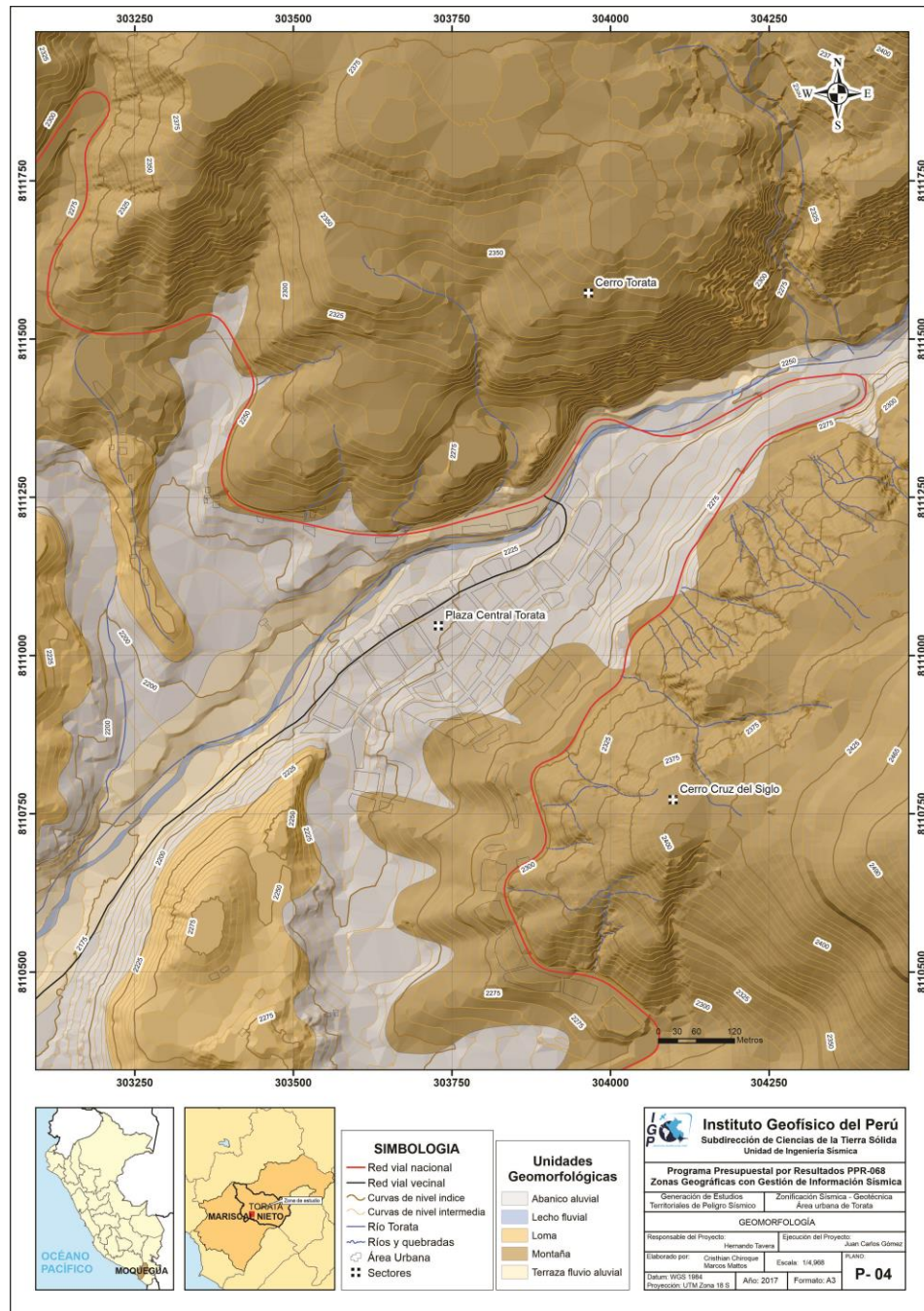


Figura 3: Mapa geomorfológico para el área urbana de Torata y alrededores.

Características físicas: Las características físicas de la geoforma; es decir, su 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, viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos como: intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación generando diferentes geoformas, que pueden ser

clasificados, de acuerdo a su origen, en depositacional y denudacional (erosional). Otros procesos internos como el magmatismo, tectonismo, generan geoformas de origen estructural.

En base a las características físicas de las geoformas y su origen, en el área urbana de y alrededores Torata, se cartografiaron siete unidades geomorfológicas: Lecho fluvial, Llanura de inundación, Terraza Fluvio-aluvial, Loma, Colina, Montaña, ver Tabla 2.

Tabla 2: Determinación de las geoformas en Torata en base a su origen y características físicas.

GEOMORFOLOGÍA DE LA CIUDAD DE TORATA				
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		PROCESOS		UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Pendiente	<5°	Origen	Depositacional	Lecho Fluvial
Altura	0-100			
Geometría	Alargada			
Drenaje	Dendritico			
Pendiente	5°-20°	Origen	Depositacional	Terraza fluvio-aluvial
Altura	<100			
Geometría	Alargada			
Drenaje	Paralelo			
Pendiente	20°-35°	Origen	Depositacional	Abanico aluvial
Altura	<100			
Geometría	Abanico			
Drenaje	Radial			
Pendiente	20°-35°	Origen	Denudacional	Loma
Altura	<100			
Geometría	Alargada			
Drenaje	Dendritico			
Pendiente	>50°	Origen	Tectónico-Estructural	Montañas
Altura	>500			
Geometría	Alargada			
Drenaje	Dendritico			

2.3.1. Montañas

Las montañas son elevaciones originadas por fuerzas endógenas (orogénesis) y modeladas y divididas por fuerzas exógenas. Las montañas que rodean Torata, geomorfológicamente se encuentran en el Flanco-Andino con pendientes > 30°, y alturas > 700 m, respecto a su base; además de y una geometría irregular y drenaje dendrítico. Esta unidad abarca aproximadamente el 41% del área de estudio (Figura 4).

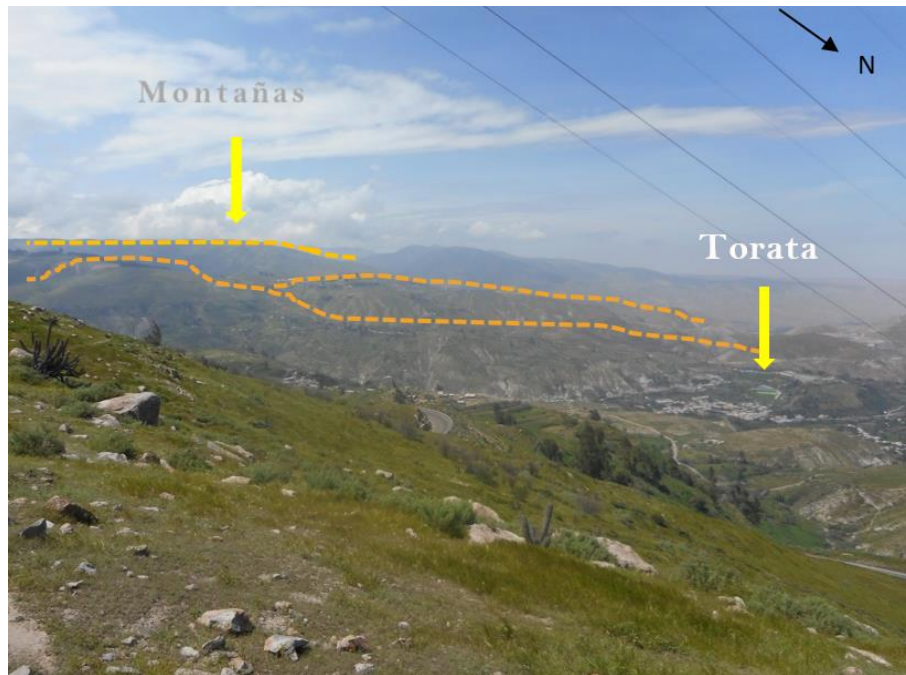


Figura 4: Montañas que rodean Torata (vista panorámica).

2.3.2. Lomas

Estas geoformas presentan pendientes menores a 35° , alturas menores a 300 m, geometría alargada, drenaje dendrítico y un origen denudacional. 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 70% de la zona de estudio, ver Figura 5.



Figura 5: Lomas (líneas anaranjadas) ubicadas a 400 metros al sur-oeste de la plaza de Torata.

2.3.3. Terraza fluvio-aluvial

Esta unidad geomorfológica de origen depositacional en la ciudad de Torata comprende el 40 % del área de estudio. Por otro lado, en las inmediaciones de Torata se ha distinguido la presencia de una terraza fluvio-aluvial en base a la pendiente. La terraza más reciente posee una pendiente menor a 10° , así como una geometría y drenaje irregular. Actualmente, sobre esta unidad se asienta el área urbana de Torata y en su extremo parte sur-oeste se establecieron las zonas agrícolas (Figura 6).



Figura 6: Terraza aluvial (línea-celeste) donde se asienta la población de Torata.

2.3.4. Abanico aluvial

Esta unidad geomorfológica de origen depositacional, presenta una pendiente $< 35^\circ$, así como una geometría en forma de abanico y drenaje radial. Los abanicos se originan siempre al final de una pendiente montañosa. Esta unidad abarca el 3 % del área de estudio (Figura 7).



Figura 7: Abanico aluvial ubicado en la margen derecha del río Torata (línea azul).

2.3.5. Lecho fluvial

Esta unidad geomorfológica de origen depositacional presenta una pendiente < 5°, así como una geometría y drenaje irregular. Esta unidad abarca el 1.1 % del área de estudio y se encuentra ubicada a lo largo del cauce del río Torata, cuyas aguas discurren a través de la ciudad y se movilizan con dirección este-oeste, ver Figura 8.



Figura 8: Lecho fluvial del río Torata, el río avanza con dirección E-O.

3. GEOLOGÍA

La geología es la ciencia que estudia la Tierra, los materiales que la componen, las estructuras y 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 (procesos 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 dejan espacios por donde 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 y depositada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas lo que determina también su dureza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice (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 del suelo, dando como resultado las geoformas que componen el relieve, los factores condicionantes como la litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes: sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caída de rocas).

Para entender el comportamiento del terreno, es necesario conocer los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación). Se estudian las rocas y los suelos que provienen de las mismas, analizando las propiedades asociadas al comportamiento mecánico.

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

3.1. Geología regional

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Para el área urbana de Torata, se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2012) a escala 1:50,000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Cretáceo Inferior (145 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

3.1.1. Geología histórica

Durante el Paleozoico la Región Moquegua fue escenario de transgresiones y regresiones marinas, y también de movimientos orogénicos. Sin embargo, en la región no se han reconocido depósitos de triásico inferior y medio, no se han encontrado rocas de dicha edad, por lo que todo indicaría que fue una época de emersión general. Existen afloramientos del Triásico superior y el Jurásico inferior, y están representados por formaciones continentales volcánicas, y semicontinentales. Durante los inicios del Jurásico superior se produce en el sur del Perú una transgresión marina procedente del Pacífico y que abarca grandes extensiones de la región.

Al finalizar el terciario inferior o comienzos del superior se produjo el sistema de fallas de Incapuquio, y la gran depresión longitudinal. Las fallas de Incapuquio crearon en algunos lugares zonas de debilidad que hicieron posible el emplazamiento de los stocks de pórfido monzonítico y dacítico, y las formaciones de las chimeneas de brecha y éstas en relacionadas a la génesis de los depósitos de cobre diseminados en Toquepala, Cuajone y Quellaveco.

Después de depositarse la formación Moquegua, siguió un episodio volcánico muy intenso de carácter explosivo y posiblemente de origen fisural, cuyos depósitos (volcánico huaylillas) cubrieron ampliamente el flanco andino. Después, siguió continuo un ciclo volcánico de carácter efusivo explosivo que tuvo lugar en el término del Terciario, debido a esto se tiene la faja montañosa de conos volcánicos de rumbo NO–SE que actualmente se encuentran en la parte alta de las regiones de Tacna, Moquegua, Arequipa.

Durante el Terciario Superior y el Cuaternario, en el área de Moquegua al igual que en el resto del bloque andino, se produjo un proceso de orogénesis hasta alcanzar sus altitudes actuales. Como consecuencia del levantamiento andino, los ríos abandonaron fuertemente a sus cauces formando valles profundos y encañonados. El tectonismo actual se manifiesta en forma de movimientos sísmicos que ocurren con mucha frecuencia a lo largo de los andes.

3.1.2. Geología estructural

En los alrededores de la zona de estudio los rasgos estructurales son muy complejos. La región de Moquegua está dividida en dos zonas estructurales, una occidental, que vendría a ser la cuenca de Moquegua donde se depositaron sedimentos clásticos de las formaciones Sotillo y Moquegua como producto del levantamiento y degradación del frente montañoso oriental. Sobre estas formaciones se asienta la ciudad de Torata. La segunda corresponde a una zona oriental maciza conformada por secuencias volcánicas e intrusivas afectadas por un conjunto de fallas con orientación paralela NO-SE. que corresponderían al sistema de fallas de Incapuquio.

Fallas

El área urbana de Torata, esta directamente influenciado por el sistema de fallas de Incapuquio. Este sistema tiene un rumbo de Norte 40° - 60° Oeste, es de carácter regional, y su traza es reconocida desde Chile, donde tiene por nombre “Sistema de Fallas Domeyco” con una longitud de más de 200 km y que recorre Tacna, Moquegua, Arequipa. La existencia de una posible falla que cruza el área urbana de Torata con dirección SE-NO, corta los depósitos cuaternarios, y aunque aun esta cartografiada y estudiada (Figura 9).

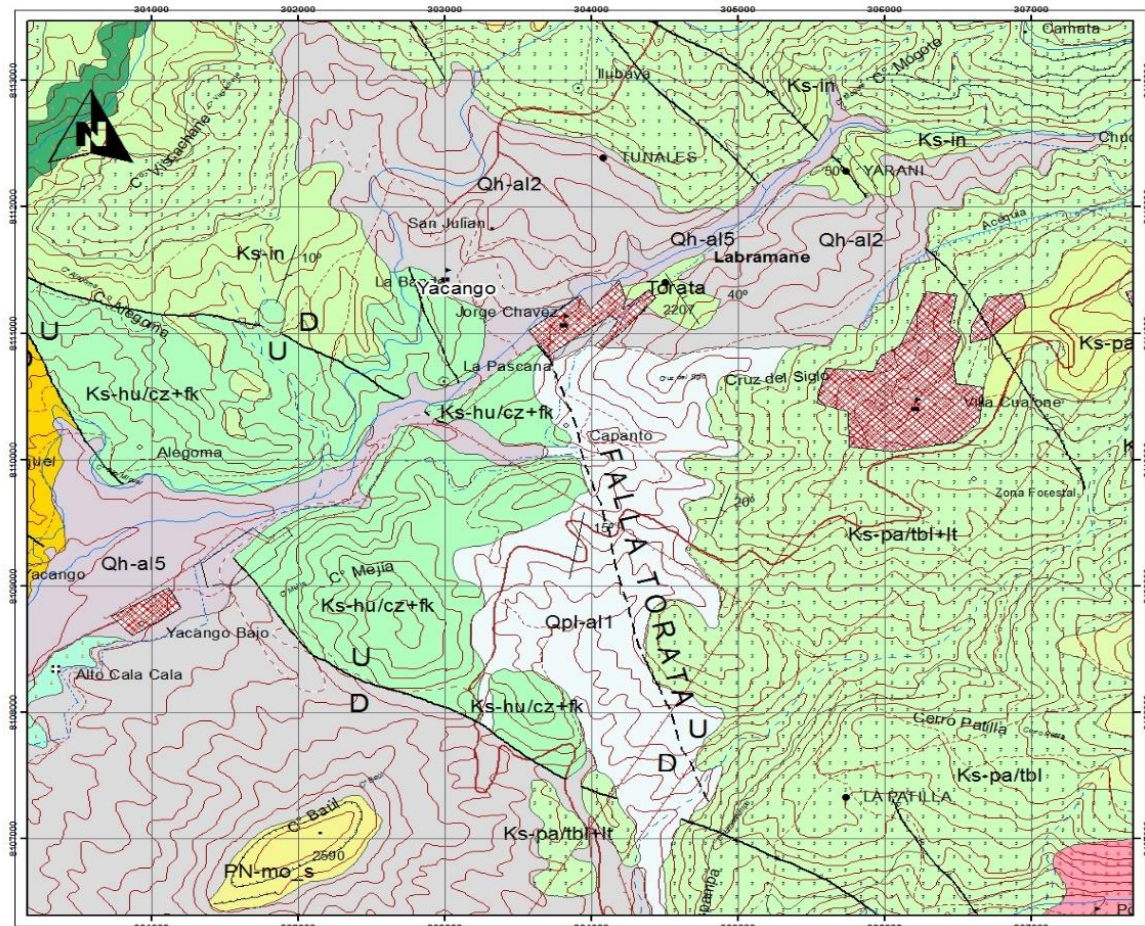


Figura 9: Fallas geológicas identificadas en las inmediaciones de la ciudad de Torata (INGEMMET, 1979).

3.2. Geología local

En la zona de estudio se hizo el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en el área urbana de Torata y alrededores a escala 1:5,000, sobre un área de 224 hectáreas aproximadamente. La geología local que rodea el área de Torata está conformada por rocas volcanoclasticas del Grupo Toquepala, y también por depósitos Cuaternarios fluvio-aluviales (Figura 10). A continuación se descubren estas unidades:



Figura 10: Mapa Geológico para el área urbana de Torata.

3.2.1. Grupo Toquepala (KsP-to)

Este grupo está representado por cuatro Formaciones conformadas por rocas volcánicas con intercalaciones de sedimentos clásticos cuyas características son:

Formación Huracane (Ks-hu)

Dividida en 7 unidades volcanoclasticas y reconocida anteriormente como Formación Toquepala (Bellido y Landa, 1965). En los límites del área de estudio aflora ampliamente rocas del Miembro 04 - 250 m. (Ks-hu/cz+fk), conformada por lavas piroclasticas soldadas de cuarzo-feldespato, macizos porfiríticos, gris rojizo, composición riolitas. Conforman estructuras macizas y farallones prominentes, ver Figura 11.



Figura 11: Rocas de la Formación Huaracane. Se puede observar una roca volcanoclástica fracturada con presencia de xenolitos de 2" de diámetro aproximadamente de color oscuro y también presenta cristales de vidrio volcánico (obsidiana). Se ubica a 765 m, al sur-oeste de la plaza principal de Torata.

Formación Inogoya (Ks-in)

Aflora a unos 776 metros al nor-este de la plaza principal de Torata, al pie de la carretera Binacional. Conformada por una secuencia de conglomerados y areniscas gruesas de color gris verdoso a pardo claro. La secuencia sobreyace con discordancia a la Formación Huaracane e infrayace con igual relación a la Formación Paralaque (Figura 12).



Figura 12: Areniscas y conglomerados con gravas angulosas meteorizadas, en una matriz areno limosa, de la formación Inogoya

Formación Paralaque (Ks-pa/tb+li)

Conformada por tobas altamente soldadas porfiriticas y de textura eutaxítica. Conformado por minerales esenciales plagioclasas y cuarzo y como accesorios, biotita, fragmentos líticos vidrio y opacos de color gris rojizo (Figura 13).



Figura 13: Afloramientos de tobas grises y lavas piroclásticas soldadas, de colores grises con presencia de cuarzo y feldespatos, (líneas amarillas) que afloran a 275 metros al sur-este de la Plaza principal de Torata, en el sector denominado (Cerro Cruz del Siglo).

3.2.2. Depósitos cuaternarios fluvio-Aluviales (Qh-fl-al)

Suprayaciendo al substrato rocoso conformado por rocas intrusivas, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente de origen aluvial, eólico y fluvial.

En la zona de estudio se evidencio la existencia de depósitos cuaternarios conformados por gravas, arenas y limos, cantos rodados, bloques angulosos subangulosos; también se pudo reconocer en campo materiales arcillosos de color rojizo, pero en una baja proporción (Figuras 14 y 15).



Figura 14: Depósitos fluviales, estos materiales están conformados por gravas redondeadas y limos y arenas que han sido transportados por la dinámica y evolución del curso y cauce actual del río Torata (línea amarilla).



Figura 15: Depósitos aluviales, clastos subangulosos heterogéneos, de 1" a 3" de diámetro, en una matriz limosa, intercaladas en estratos de (0.10 metros) de arcilla rojiza, en la parte inferior se aprecia gravillas en una matriz areno-limosa. Ubicada en la carretera Binacional, cerca de la quebrada Tres arcos.

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. Asimismo, analizar factores como la litología permite explicar el origen de los materiales que constituyen las geoformas (colinas, lomas, entre otras) y en las cuales se generan procesos como meteorización y erosión que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

4.1. Procesos de geodinámica interna

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

4.2. Procesos de geodinámica externa

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

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 los sísmicos (sismicidad de la zona), climatológicos (incremento de las precipitaciones) y antrópicos (urbanismo, uso del suelo y construcción de vías de comunicación).

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

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

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

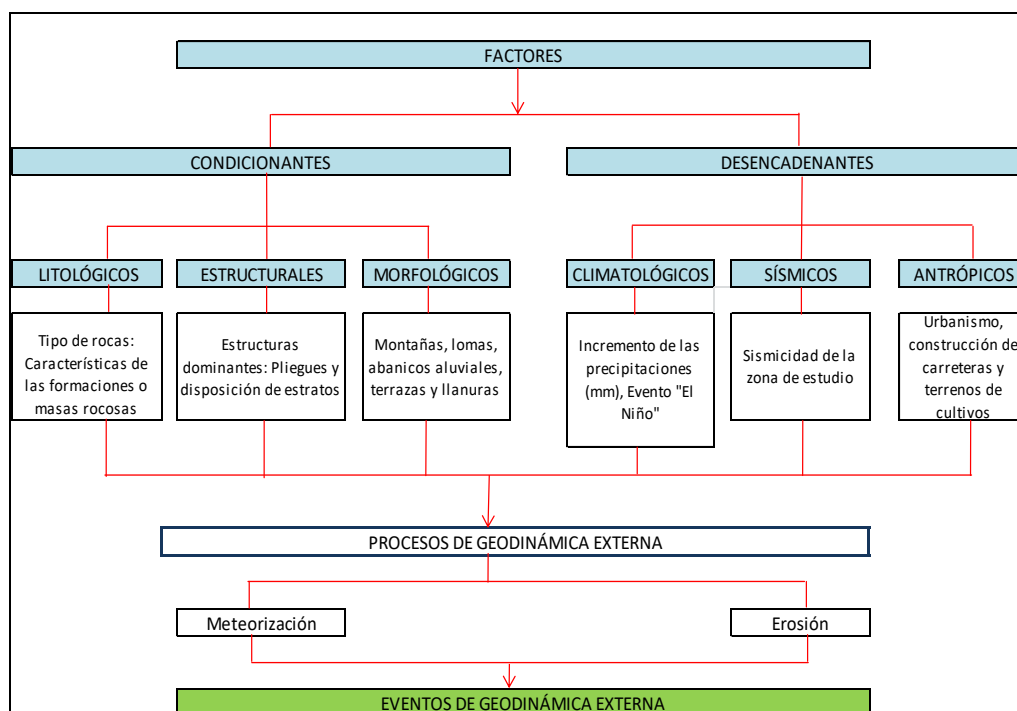


Figura 16: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

- **Fluvio-aluvial:** Los 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 esto provoca el arrastre progresivo de los materiales a posiciones de menor energía potencial (menor pendiente). La carga de sedimentos transportados por la quebrada o río incrementa 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 son:

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

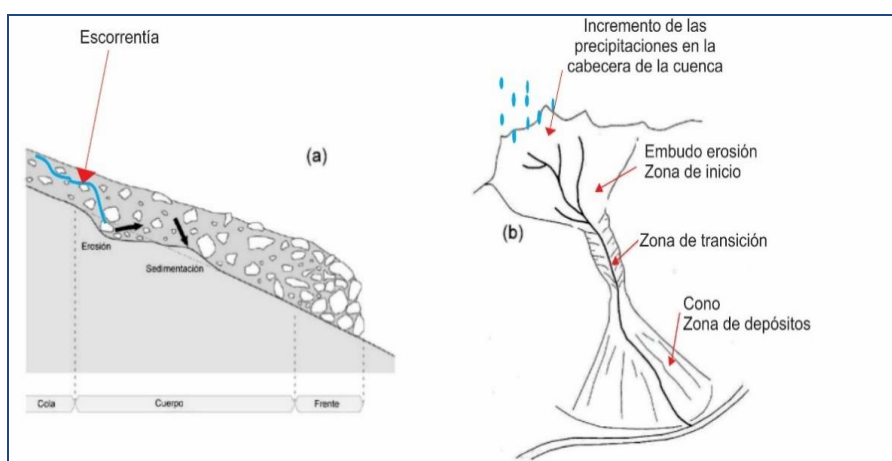


Figura 17: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la depositación del material), modificado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

-Hidro-gravitacional: En este mecanismo interviene el agua y la gravedad. Se presentan en los fondos de los valles y en las partes bajas de las vertientes. En estos se encuentran los movimientos en masa (MM) que son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de rocas, detritos o tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Para la descripción de los MM, se ha tomado en cuenta la clasificación de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), la cual se basa en dos elementos:

el tipo de movimiento (caída, volcamiento y deslizamiento) y el material sean rocas y suelos (divididos en detritos y tierras).

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%) de una zona se le denominan lluvias extraordinarias o tormentas extremas. Estas al desarrollarse generan crecidas causando inundaciones con las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico.

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

- *Caída de rocas*: Es resultado del debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral, produciendo un deterioro en la estructura del talud por la acción de la meteorización. En este caso se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, que caen por gravedad (Figura 18).

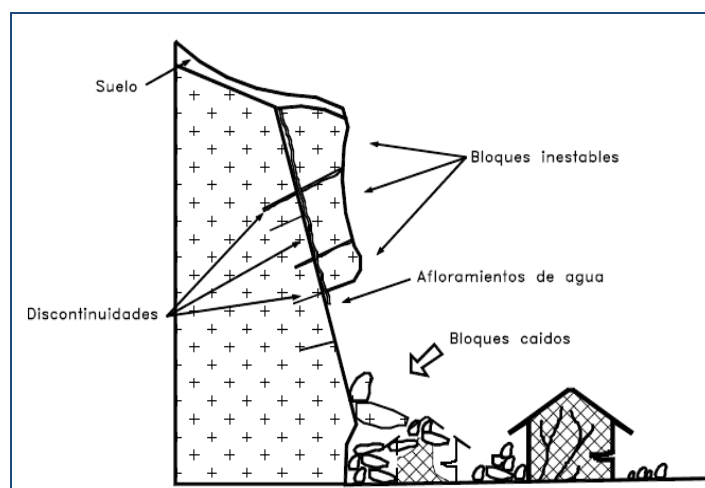


Figura 18: Proceso de caída de rocas (Suárez, 1998).

En área urbana de Torata, se han cartografiado dos tipos de eventos geodinámicos (Figura 19), los cuales se clasifican de la siguiente manera:



Figura 19: Mapa de Geodinámica del área urbana de Torata.

- **Flujos de detritos:** En este tipo de evento, los materiales de las rocas de la Formación Paralaque e Inogoya han sido afectados por los distintos procesos de erosión y meteorización, ya sean de origen natural o antrópico. Permanecen en las cárcavas de las laderas del cerro Cruz del Siglo materiales acumulados de distintos tamaños que obstruirían la carretera en caso de un sismo que los desestabilizaría,

también la escorrentía sería un factor desencadenante por incremento de las precipitaciones que formarían flujos de detritos. En estas laderas el paisaje es desértico, árido sin la presencia de vegetación lo cual incrementaría el peligro ante este evento geodinámico (Figura 20).



Figura 20: Flujo de detritos (polígonos amarillos) también infiltraciones de agua, (flecha roja). En inmediaciones del Cerro cruz del siglo, al pie de la carretera Binacional a 250 m, al sur este de la Plaza principal.

- **Caída de rocas:** En este tipo de evento, los clastos o gravas de la Formación Innogoya son afectados por los distintos procesos de erosión y meteorización, ya sean de origen natural o antrópico (corte de taludes), ocasionando el desprendimiento de estos materiales. La Zona de caída de rocas tipo toba, esta ubicada en la carretera Binacional, en la margen derecha del río Torata, las rocas se encuentra fracturadas y posiblemente con un sismo, se produciría la caída de rocas obstruyendo esta vía (Figura 21).



Figura 21: Caída de rocas (polígonos amarillos). En el sector Cerro Blanco, Torata. Al lado deslizamiento ubicado al pie de la carretera binacional (polígono azul).

- **Caída de rocas:** 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; Sepúlveda, 2000). Algunos autores definen como la mayor o menor predisposición a que un proceso geodinámico suceda u ocurra sobre un determinado espacio geográfico y tiempo, lo cual depende de factores con la litología, tectonismo, agentes geológicos y actividad humana (taludes de corte). La identificación y delimitación de los eventos geodinámicos, ha permitido reconocer zonas probables que podrían ser afectadas por los mismos (inundación y caídas), Figura 22 y 23.

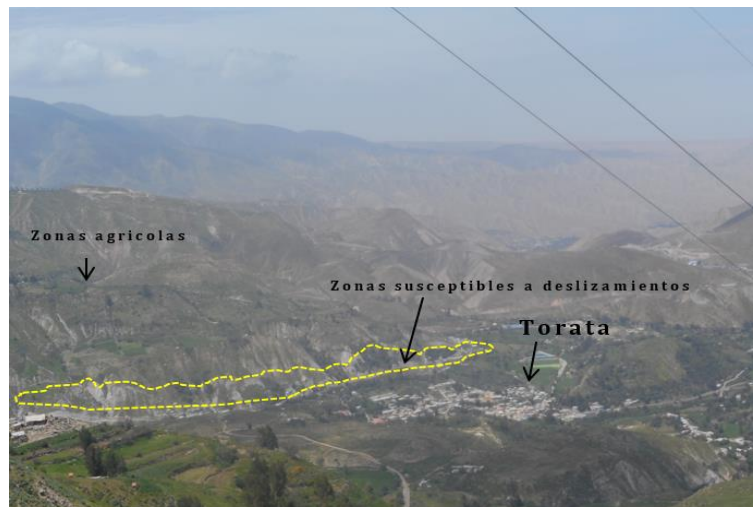


Figura 22: Vista panorámica de Torata, muestran taludes susceptibles a deslizarse, (líneas amarillas) al pie de la carretera del Cerro cruz del siglo, se infiere que podría ser el resultado de las infiltraciones de agua subterránea, o infiltración del agua de las zonas agrícolas.



Figura 23: Infiltraciones de agua a 250 m, al sur-oeste de la plaza principal de Torata, en el sector denominado (Cerro cruz del siglo).

5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los suelos son materiales inconsolidados conformados por minerales, materia orgánica, agua y aire entre sus poros, que se generan a partir de la alteración de la roca madre por agentes atmosféricos, erosionándola y formando una cobertura de variado espesor de sedimentos, que posteriormente han sido 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) para determinar las características granulométricas y los límites plásticos, 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 líneas abajo se indica el origen de los suelos (Figura 24).

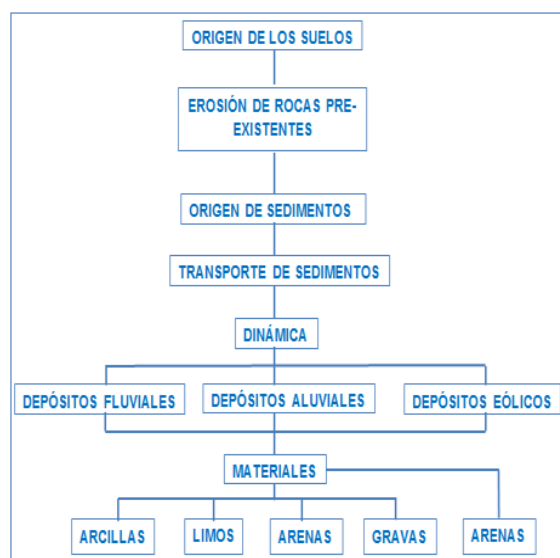


Figura 24: Diagrama del origen de los suelos.

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas, así como, el comportamiento en condiciones estáticas de los suelos y rocas, mediante la aplicación de técnicas de exploración, entre las cuales se tienen: calicatas, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio; a fin de determinar las propiedades físicas de los suelos de cimentación.

En área urbana de Torata se realizó el estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), ver Figura 25.



Figura 25: Mapa de ubicación de ensayos geotécnicos.

Asimismo, de las calicatas se extrajeron cinco a fin de realizar ensayos de mecánica de suelos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad de carga admisible.

5.1. Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM D 420)

Es un método de exploración directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación del suelo a cierta profundidad (aproximadamente 3.00 m.), a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras para la realización de ensayos y análisis. Estas calicatas son realizadas con maquinaria (retroexcavadora) o de forma manual.

5.1.1. Procedimiento

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

- Reconocimiento de la zona de estudio: Las exploraciones se realizaron de tal manera que se distribuyan de forma uniforme el área urbana de Torata, en base al análisis visual de las características del terreno, accesibilidad y lugares apropiados donde ubicarlas.
- Excavaciones: Estas tuvieron las siguientes dimensiones: 1.5 x 1.5 m. y aproximadamente 3.00 m. de profundidad en promedio.
- Muestreo: 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.

5.1.2. Descripción de calicatas

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo, para ello se han elaborado 08 fichas de descripción de calicatas, las mismas que se adjuntan en los anexos. Las excavaciones fueron realizadas en las siguientes coordenadas UTM, ver Tabla 3.

Tabla 3: Ubicación de calicatas. (N.P. = No presenta nivel freático).

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
CAL - 01	303602	8111153	2198	1.40	NP
CAL - 02	303800	8111120	2205	2.10	NP
CAL - 03	304169	8111291	2193	1.60	NP
CAL - 04	303740	8110859	2241	2.00	NP
CAL - 05	303770	8110923	2206	1.50	NP

En el área urbana de Torata, no se pudo usar maquinaria para excavar los suelos, debido a muchos lugares presentaban cercos altos que impedían el ingreso de la maquinaria, todos los ensayos se realizaron de forma manual. El personal que trabajo haciendo la excavación de las calicatas tuvo dificultad de llegar a profundidades mayores a los 2.10 metros, porque el suelo presentaba compactación alta (Figura 26).



Figura 26: Calicata CAL-01 ubicada en el sector denominado La Banda, en Torata.

5.2. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452)

Se define posteadora como un barrenador manual en forma de "T" que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 5 a 6 m, a fin de obtener muestras de suelo. Las muestras extraídas se obtienen trituradas y completamente alteradas; sin embargo, sirven para reconocer el tipo de suelo y contenido de humedad que presenta.

5.2.1. Procedimiento

Con la posteadora se penetra el subsuelo desde la superficie de tal manera que, se gira manualmente el equipo ejerciendo presión sobre el suelo, a medida que va incrementando la profundidad, se van conectando y añadiendo las varillas de 1 metro de extensión para la obtención de muestras con las cucharas acopladas en el extremo.

Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, lugares donde no existía información geotécnica, a fin de obtener mejor caracterización de los suelos el área urbana Torata. A continuación, se muestra los resultados obtenidos (Tabla 4).

Tabla 4: Coordenadas UTM de ubicación de Posteos(N.P.= No presenta)

PUNTO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
Posteo 1	303730	8111028	2183	0.48	N.P
Posteo 2	303953	8111063	2234	0.60	N.P
Posteo 3	303559	8110603	2210	0.60	N:P
Posteo 4	303002	8110331	2161	0.40	N.P
Posteo 5	303313	8110017	2164	1	N.P

En general, los suelos de la ciudad de Torata están conformados principalmente por estratos superficiales cementados bien compactados de gravas, por esta razón el equipo no ha penetrado a mayor profundidad, alcanzando un máximo de 0.70 m, los detalles del reconocimiento de suelo se encuentran en las fichas de posteos que se adjuntan en los anexos (Figura 27).



Figura 27: Ensayo con posteadora manual en la Plaza principal de Torata.

5.3. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

Es un equipo de campo de registro continuo (se contabiliza el número de golpes para penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo), permite estimar la resistencia del material (suelo) en kg/cm^2 al hincado del cono dinámico. La ventaja del instrumento es que es un equipo muy práctico y se puede transportar fácilmente.

Consiste en introducir al suelo una varilla de acero en la que se encuentra una punta cónica de 60° , mediante la aplicación de golpes con un martillo de 10 kg, que se deja caer desde una altura de 0.50 m. Como medida de la resistencia a la penetración se registra el número "N" (número de golpes en 10 cm de penetración), información que luego se correlaciona con algunas propiedades relativas del suelo, en particular, con sus parámetros de resistencia al corte, capacidad portante, densidad relativa, etc. A través de fórmulas empíricas donde se introduce el "N" y se obtiene el ángulo de fricción interna de los distintos materiales.

Este ensayo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo arenoso, no recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

5.3.1. Procedimiento

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Ubicación de ensayos: Se distribuyeron generalmente al costado y en puntos intermedios a algunas de las calicatas, a fin de obtener mayor información de la resistencia del suelo en el área estudiada.

Ensamble de equipo: Consiste en conectar los accesorios del equipo, la punta cónica va al final de la varilla de penetración, esta se une a la guía que contiene el yunque, posteriormente se ajusta las uniones y finalmente, 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; se sigue este procedimiento hasta que el suelo ofrezca resistencia (no exceder los 45 golpes de acuerdo a norma técnica).

En la Tabla 5, se indica la ubicación de los 7 ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) realizados en las inmediaciones de Torata (Figura 28). La profundidad mínima alcanzada es de 0.45 m, debido a que los estratos contienen gravas de distintos tamaños que varían, entre ½ milímetro las más pequeñas e incluso algunas mayores a los 10 cm. Posteriormente, estos valores se corrigen y correlacionaron, para obtener el N y el SPT a fin de calcular algunos parámetros geotécnicos como los ángulos de fricción y cohesión para los termines la capacidad de carga admisible.

Tabla 5: Ubicación de ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL).

7	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
DPL-01	0303792	8111128	2191	1.28	N.P.
DPL-02	0303605	8111170	2181	0.59	N.P.
DPL-03	0303728	8110870	2215	2.5	N.P.
DPL-04	0303687	8110835	2200	3.50	N:P
DPL-05	0303717	8110442	2222	1.54	N.P.
DPL-06	0303163	8109511	2271	0.45	N.P.
DPL-07	0303032	8111122	2235	0.80	N.P.



Figura 28: Ensayo de penetración dinámica ligera en el parque de niños de Torata, ubicado a 100 metros al este de la plaza principal de Torata. (DPL-01).

Los ensayos de DPL alcanzaron una profundidades máximas de 3.50 m (DPL-4) y mínima de 0.45 m, ya que los suelos están conformados por gravas que presentan ángulos de fricción entre 38.5° y 40.5° en promedio, característico de suelos granulares de compacidad alta. Los datos obtenidos de los ensayos se presentan en fichas de DPL, las mismas que se adjunta en los Anexos.

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

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), está el que utiliza una fórmula empírica que relaciona los parámetros de los equipos DPL y SPT, tales como: peso del martillo, altura de caída del martillo, área de la punta cónica, el espesor de la hincia y los números de golpes obtenidos con el DPL, a continuación, se detalla dicha relación:

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

Dónde:

N1= Número de golpes equivalente en SPT

N2= Número de golpes obtenidos en DPL

W1= Peso del martillo del DPL

W2= Peso del martillo SPT

H1= Altura de caída de DPL

H2= Altura de caída del SPT

A1= Área de la punta cónica del DPL

A2= Área de la punta cónica del SPT

e1= Espesor de la hincia del DPL

e2= Espesor de la hincia del SPT

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

5.4.1 Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del NSPT

Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen diversas fórmulas empíricas propuestas por autores como Dunham, Osaki (1959), Muromachi (1974), Peck (1974), Das (1995) y Katanaka - Uchida (1996). Para el caso de la ciudad de Torata, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), debido a que, es la más usada internacionalmente y sus resultados son conservadores (ver Tabla 6 y 7).

Tabla 6: Cálculo del ángulo de fricción interna usando valores de NSPT

ENSAYO	N _{SPT} CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT})	N _{SPT} CORREGIDO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT})
DPL-01	12.82	31.10	-	-
DPL-02	-	-	-	-
DPL-03	8.47	28.0	13.79	31.6
DPL-04	3.63	23.5	4.11	24.1
DPL-05	9.44	28.7	15.73	32.7
DPL-06	-	-	-	-
DPL-07	-	-	-	-
PROFUNDIDAD DEL ENSAYO	1.00 – 1.20 m		1.30 – 1.50 m	

Tabla 7: Compacidad relativa y ángulo de fricción interna de los suelos en base al NSPT (Crespo, 2004).

COMPACIDAD RELATIVA DE SUELOS GRANULARES			CONSISTENCIA EN SUELOS COHESIVOS		
VALOR DE N _{SPT}	COMPACIDAD RELATIVA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ	VALOR DE N _{SPT}	CONSISTENCIA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ
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 la Tabla anterior, los suelos del área urbana de Torata, en su mayoría son granulares (arenas y gravas). Siendo el el valor del ángulo de fricción interna correspondiente a profundidades comprendidas entre 1.00 y 1.20 m, corresponde a suelos de compactidad a media. Mientras que, a profundidades de 1.30 y 1.50 m, la compactidad del suelo varía a media (de 36° a 30.1°) debido a la presencia de capas carbonatadas (caliches) superficiales bien compactas hasta 1.00 m.

Finalmente, se adjunta en los anexos del presente informe, las fichas resumen de cada uno de los ensayos realizados en campo y sus respectivos valores de ángulos de fricción interna (Figura 29).

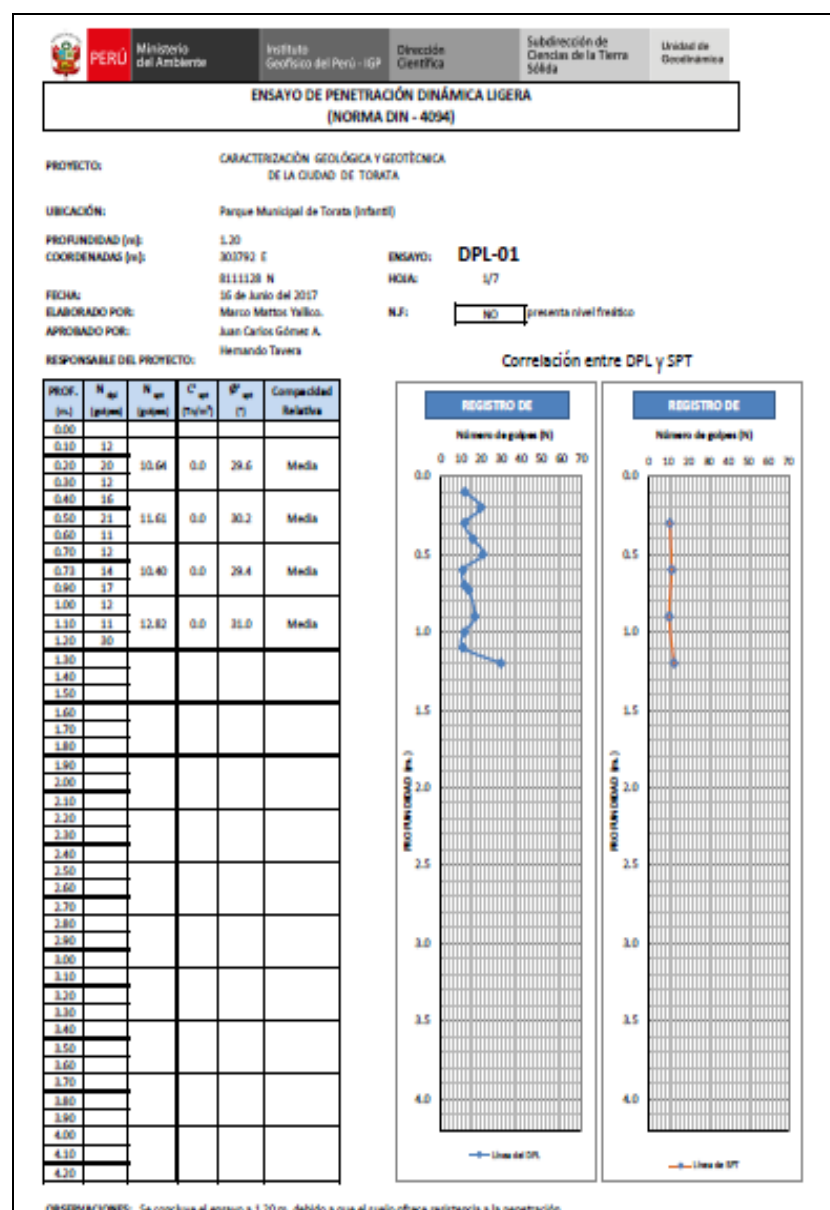


Figura 29: Diagrama de correlación entre el número de golpes DPL y el número de golpes SPT; y cálculo del ángulo de fricción interna corregido.

5.5. Clasificación SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos, DPL y la inspección visual del terreno del área urbana Torata; así como los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad, se ha identificado 03 tipos de suelo, los mismos que han sido agrupados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ver Figura 30 y Tabla 8.

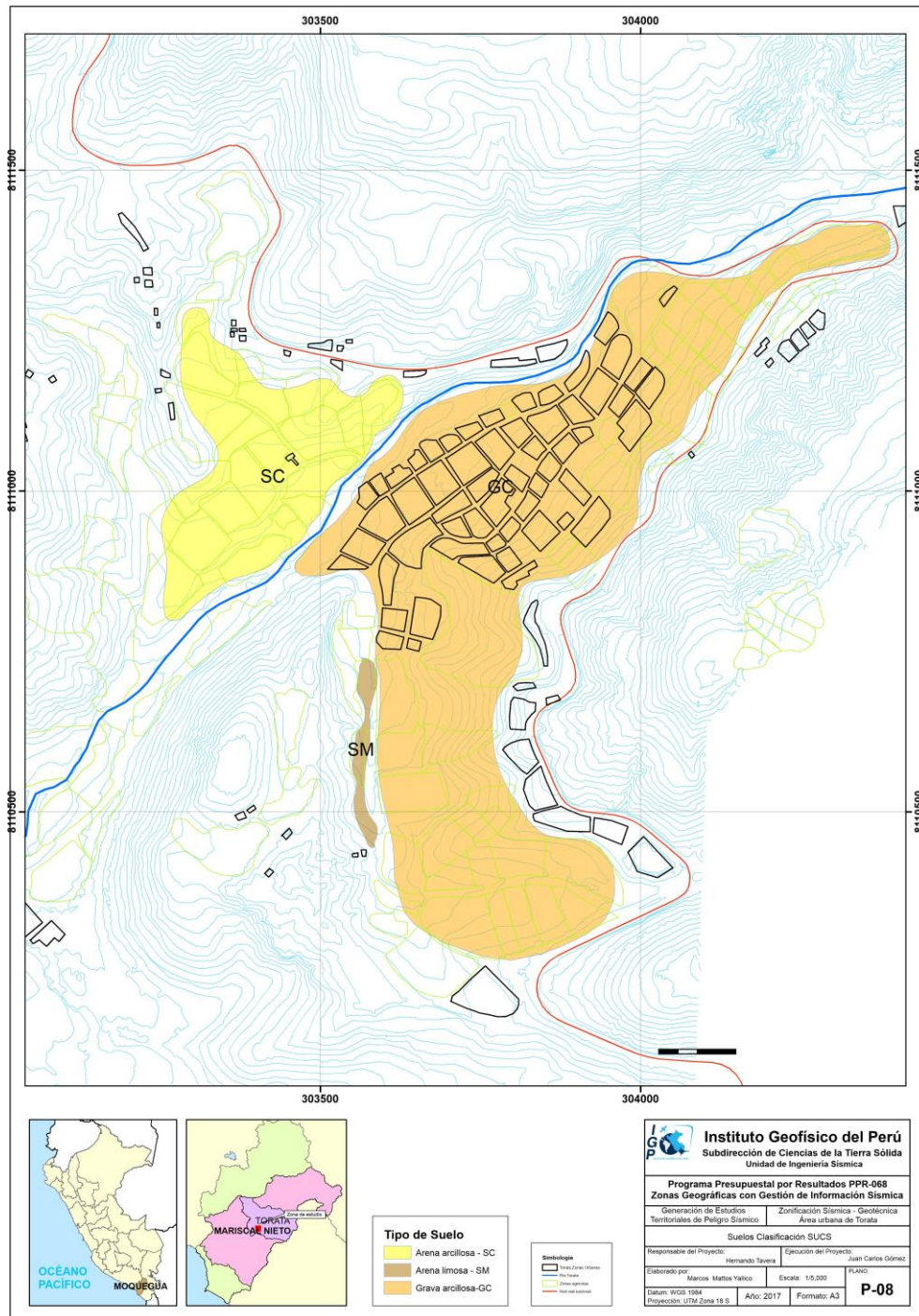


Figura 30: Clasificación de Suelos en el área urbana de Torata.

Tabla 8: Clasificación de Suelos para las cinco (05) calicatas elaboradas en el área urbana de Torata, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (P.=Npresenta).

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
CAL-01	1.40	N.P.	22.90	43.80	33.40	53.50	32.70	20.80	14.10	SC	Arena arcillosa con grava
CAL-02	2.10	N.P.	56.2	37.4	6.43	N.P.	N.P.	N.P.	5.4	GP	Grava mal graduada
CAL-03	1.60	N.P.	18.2	81.1	0.67	45.5	25.5	20	7.3	GC	Grava arcillosa, con arena
CAL-04	2.00	N.P.	24.2	55.1	20.65	N.P.	N.P.	N.P.	5.19	SM	Arena limosa
CAL-05	1.50	N.P.	40.0	39.9	20.12	50.3	28.50	21.80	5.12	GP-GC	Grava con arena y arcilla

5.5. Clasificación de suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y DPL realizados en el área urbana de Torata; así como los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad realizados han permitido identificar 05 tipos de suelos y cuyas características son:

- **Suelos tipo GC:** Están conformados por mezclas mal graduadas de arcilla y arena con contenido de gravas y gravillas angulosas a subangulosas. El contenido de humedad es menor a 5%, constituyen suelos con grado de compactación media a alta, presentan plasticidad. Estos suelos representan el 60 % del área de estudio y se han identificado en las calicatas, CAL-02, CAL-03, CAL-04, CAL-05, que se ubican en los sectores: Parque de niños de Torata, La Rayan, Asociación 28 de Julio y Calle Alfonso Ugarte.
- **Suelos tipo SC:** Este tipo de suelo está conformado por arenas y arcillas mal graduadas, contienen gravas y gravillas angulosas a subangulosas, constituyen suelos con grado de compactación media, y han sido identificados en la calicata CaL-01, ubicada en el sector La Banda.
- **Suelos tipo SM:** Estos suelos están conformados por mezclas de arena, limo de grano fino y grava, presentan grado de compactación media. El contenido de humedad es menor al 5% y presentan una coloración beige. Este tipo de suelos se reconocieron en el sector de la calle Torata, a 163 metros al norte del estadio de Torata. Es importante mencionar que este tipo de suelo, se ha identificado con los ensayos de posteo realizados en la zona de estudio.

5.6. Ensayos de corte directo (Norma, ASTM D-3080)

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a 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 en los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares). Para conocer esta resistencia al corte en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más usado una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con dos placas de piedra porosa 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 del ensayo de corte para las 5 muestras obtenidas en el campo se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9: Valores obtenidos del ensayo de corte directo

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m^2)	Densidad natural (Tn/m^3)
CAL-01	22.7	1.5	1.45
CAL-02	30.0	1.5	1.70
CAL-03	27.0	1.2	1.50
CAL-04	25.0	1.5	1.20
CAL-05	26.3	0.14	1.70

De los resultados obtenidos anteriormente se evidencia que, la mayoría de los suelos no presentan cohesión y los valores del ángulo de fricción interna son menores a 39.70° , valor característico de suelos granulares como arenas y gravas.

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

5.7. Capacidad de carga admisible ($q_{ad} = \frac{q_u}{F_s}$)

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

5.7.1. Carga última (q_u)

Es la presión última por unidad de área de la cimentación soportada por el suelo, en exceso de la presión causada por el suelo alrededor al nivel de la 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 usaron para determinar la capacidad de carga última, haciendo uso de las fórmulas de corte general (suelos granulares densos y cohesivos de consistencia dura a rígida) y local (suelos granulares sueltos y cohesivos de consistencia media a semidura) de Terzaghi (1943). A continuación, en la Tabla 10 se representan los resultados obtenidos.

Tabla 11: Tabla de factores de cohesión, carga y volumétricos. Modificado por Terzaghi. (Braja Das, 2007).

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

Fórmula para falla por corte general:

$$q_u = cN_c S_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local:

Donde:

C: cohesión

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

Nc, Nq, N γ : Factores de carga,

Luego, en base a los resultados de la carga última (q_u) se calculó la capacidad admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m; así como para una profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad de carga admisible para los 03 tipos de suelos analizados se presentan en las Tablas 12,13 y 14 (Figura 31).

Tabla 12: Capacidad de carga admisible de nueve (09) muestras de suelo extraídas en Torata.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Capacidad de carga última (Kg/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
CN - 01	2.16	0.72	2.69	0.90
CN - 02	1.98	0.66	2.78	0.93
CN - 03	2.28	0.76	3.19	1.06
CN - 04	1.66	0.55	2.17	0.72
CN - 05	1.84	0.61	2.58	0.86
CN - 06	1.80	0.60	2.51	0.84
CN - 07	2.36	0.79	3.30	1.10
CN - 08	2.93	0.98	4.66	1.55
CN - 09	2.25	0.75	1.88	0.63
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 13: Capacidad de carga admisible en base a los ensayos de DPL para Torata.

ENSAYO	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
DPL – 1	2.34	0.78	5.33	1.78
DPL – 2	2.62	0.87	2.44	0.81
DPL – 3	3.7	1.23	3.7	1.23
DPL – 4	1.74	0.58	-	-
DPL – 5	-	-	-	-
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 14: Rangos de capacidad de carga admisible.

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

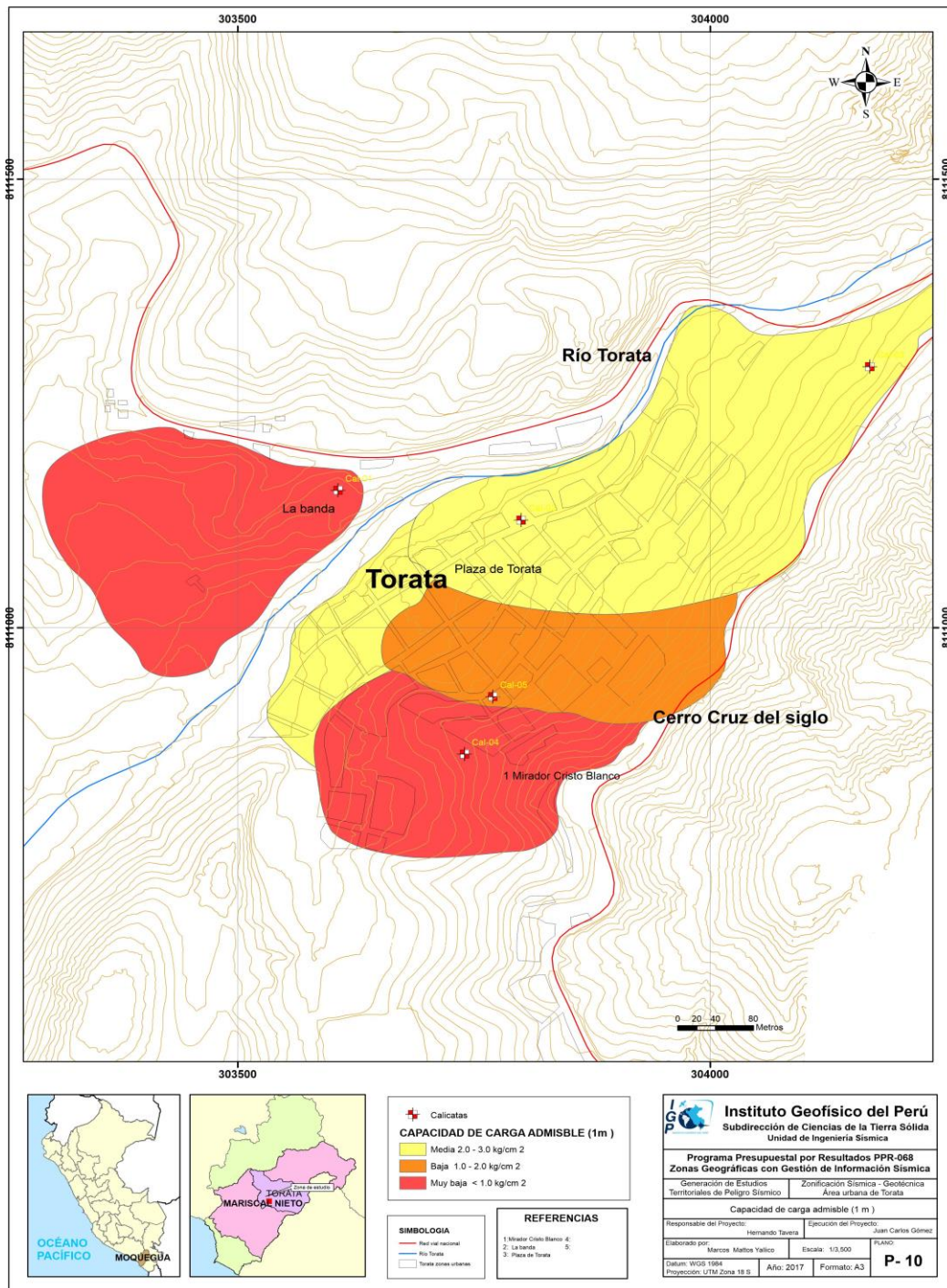


Figura 31: Mapa de carga admisible para el área urbana de Torata y alrededores.

De los resultados obtenidos anteriormente y el uso de los valores de la Tabla 14, se ha determinado que en la zona urbana de Torata los suelos presentan capacidad de carga admisible, muy baja, baja y media.

5.7.2. Tipos de capacidad de carga admisible

En el área urbana de Torata se han identificado los siguientes tipos de capacidad de carga admisible:

A) Capacidad de carga admisible muy baja

Comprende rangos de capacidad de carga $< 1.00 \text{ kg/cm}^2$, correspondientes a suelos conformados por arenas, arcillosas mal graduadas (SC), cuyo grado de compactación es bajo. Abarcan menos del 10% del área de estudio y se encuentran en dos zonas ubicadas al norte de Torata: en el sector la Banda que además presentan infiltraciones de agua subterránea provenientes de la cima de la montaña; en el extremo sur, en las laderas del cerro Cruz del Siglo, en la Asociación 28 de Julio Torata.

B) Capacidad de carga admisible baja

Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre $1.00 - 2.00 \text{ kg/cm}^2$, correspondiente a gravas arcillosas mal graduadas, con arena y limo (GC), cuyo grado de compactación es medio. En el sector, Alfonzo Ugarte, donde se hizo la calicata, no se encontró nivel freático; sin embargo, a 5 metros al sur de esta, se observó la presencia de zanjas concentración con afloramientos de agua subterránea. La zanja de 6 metros de profundidad, indicaría la posibilidad de una fuente de agua subterránea. Estos suelos abarcan el 15% del área de estudio y se encuentran distribuidos en los sectores de Alfonzo Ugarte, Calle Capitán Becerra y Calle Bolívar.

C) Capacidad de carga admisible media

Estos suelos comprenden rangos de capacidad de carga admisible entre 2.0 a 3.0 kg/cm^2 , correspondiente a gravas arcillosas bien graduadas con clastos angulosos a subagulosos con contenido de arena, y limo. Sobre estos suelos se encuentra el 50% del área urbana de Torata. El origen de estos suelos es fluvio-aluvial y tienen buena compactación de media a alta. Estos suelos están distribuidos en los sectores Parque de Niños de Torata, Plaza principal de Torata, Calle Mariscal Cáceres, Calle Coronel

Manuel la Torre, Calle Bolívar, Calle Torata y zonas agrícolas en el sector nor-este de Torata.

6. CONCLUSIONES

- La geomorfología del área urbana de Torata está conformada por una terraza fluvio-aluvial, que abarca el 60% de la zona de estudio de Torata se asienta en este tipo de suelos.
- El sustrato rocoso está conformada por rocas intrusivas del Grupo Toquepala, cuyos afloramientos se encuentran bien definidos en el Cerro Cruz del Siglo. Los depósitos del Cuaternario están conformados en mayor porcentaje por materiales fluvio-aluviales traídos por la dinámica del río Torata y abarcan el 60% de la zona de estudio.
- La geodinámica superficial de Torata está representada por movimientos en masa tipo: caída de rocas identificados en cerro Blanco, carretera que va hacia el sector de Labramane, en las laderas que se encuentran a 50 metros al sur de la compañía de bomberos. Los flujos de detritos se desarrollan en las laderas del sector sur del denominado cerro Cruz del siglo, estos flujos se desplazan en dirección norte-sur, desde la parte alta de las laderas hacia la carretera Binacional.
- En Torata se han identificado dos sectores con capacidad de carga admisible muy baja $< 1.00 \text{ kg/cm}^2$, conformadas por arenas arcillosas mal graduadas (SC) en el sector La Banda y en el sector, Asociación 28 de Julio suelos (GC), con presencia de infiltraciones de agua subterránea.
- El área urbana donde se asienta la mayor parte de la población está conformados por suelos (GC) con capacidad de carga admisible media, $2.0 - 3.0 \text{ Kg/cm}^2$. Finalmente, en el sector, Alfonso Ugarte se tienen suelos con capacidad de carga admisible baja $1.0 - 2.0 \text{ Kg/cm}^2$ conformada por suelos de gravas arcillosas (GC).

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE LAS ÁREAS URBANA DE TORATA-YANANGO

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
- 2.2. Registro de arreglos lineales (MASW)
- 2.3. Registro de la resistividad del suelo (ERT)

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS GEOFÍSICOS

- 3.1. Frecuencias Predominantes
- 3.2. Perfiles de velocidad de ondas de corte Vs
- 3.3. Periodos Dominantes
- 3.4. Resistividad geoelectrica

4. RESULTADOS

- 4.1. Mapa de Zonificación Sísmica

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para el área urbana de Torata 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 suelo y estimar su amplificación sísmica.

Para la aplicación de esta técnica se obtiene registros de vibración ambiental y se procede a construir las razones espectrales H/V que consiste en obtener el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical (Nakamura, 1989). El objetivo es de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones máximas relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (Figura 1).

Las características de los suelos son definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

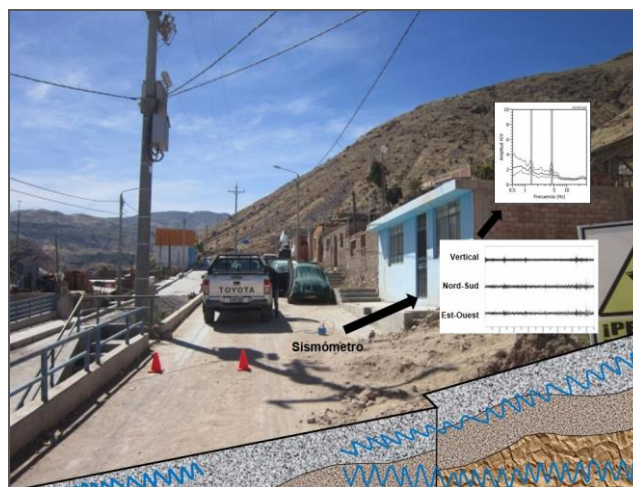


Figura 1: Registro de vibración ambiental generado por la actividad humana.

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

- Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de forma aleatoria diversos tramos de señal 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 dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promediaron estos 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).

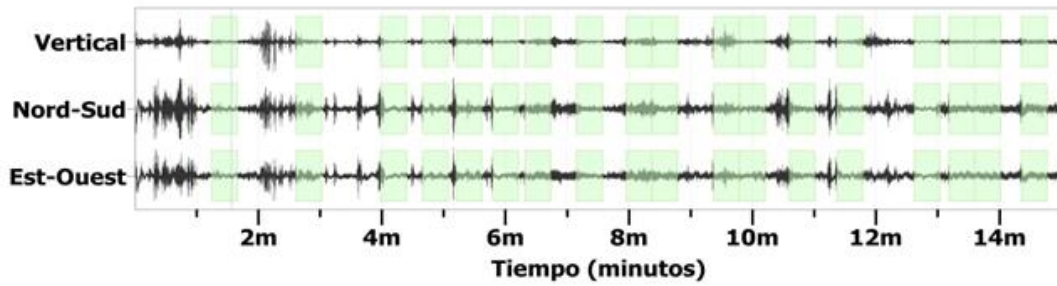
En la Figura 2, se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el total de la información obtenida en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O); seguidamente la curva H/V, en la cual la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

- **Interpretación:** Para la interpretación de los resultados obtenidos se dispone de mapas geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Asimismo, 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).

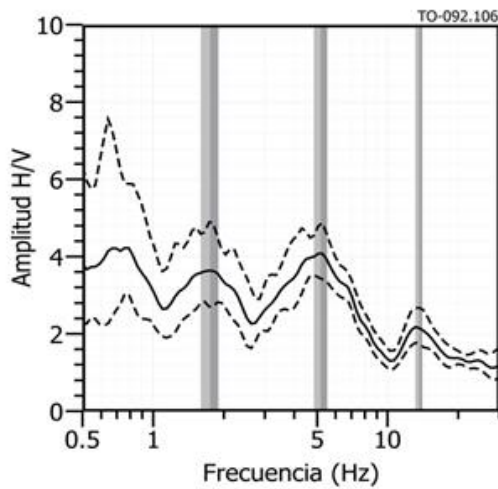
Zonificación Sísmica - Geotécnica
CIUDAD DE TORATA - MOQUEGUA
Frecuencias predominantes del Suelo

TO-092

Señal registrada y ventanas seleccionadas para el procesamiento



Curva H/V



Recolección de Datos



Interpretación de resultados

Dudoso	Pico(s) H/V	f0	f1	f2
Ningún pico	(Hz) ☒	1.8	5.2	13.6
Observaciones				
Var. azimuthal	Homogénea	Amplitud max. Entre y°		

Figura 2: Ejemplo de la ficha H/V para el punto TO-092 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)

La técnica 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), generadas por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como se muestra en la Figura 3.

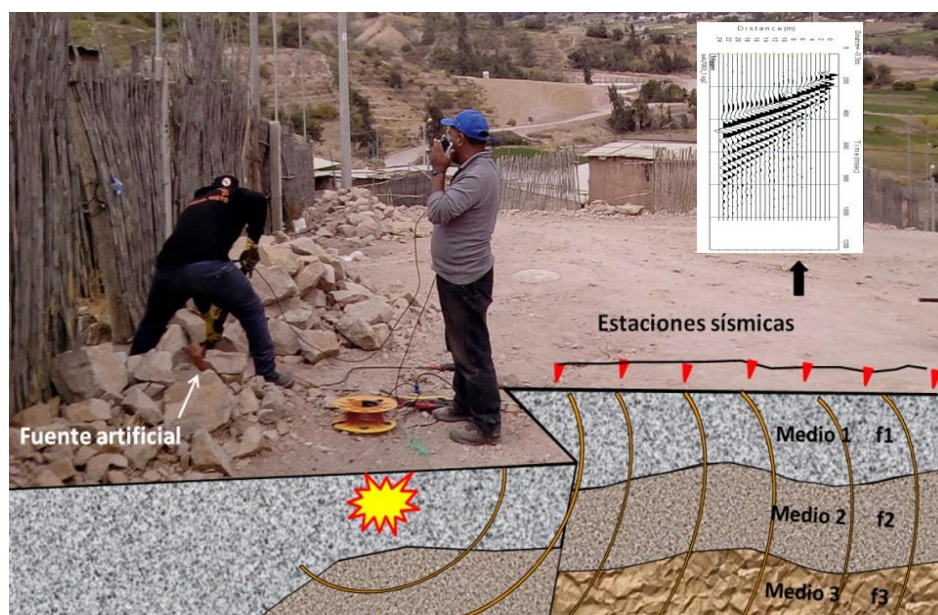


Figura 3: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

La longitud de la línea sísmica (D), depende de la profundidad máxima de investigación (Z_{max}). Usualmente D es más grande que Z_{max} (Park, 20015); es decir: $D=nZ_{max}$, donde ($1 \leq n \leq 3$). Para fines geotécnicos la profundidad máxima de investigación suele estar en el rango de 10-30 m, pero puede variar según el tipo de suelo, la longitud del arreglo sísmico y del tipo de fuente activa utilizada (Park, 2007).

- Procesamiento: Consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) en los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), 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, ellos son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles V_s en una dimensión (1D) y para ello se considera

como parámetros de entrada la profundidad (30 m) y el número de capas (15 capas). Finalmente, los perfiles Vs 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 de la técnica de MASW. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y en la derecha, el perfil de velocidad de ondas de corte Vs (línea verde); además el promedio final de los perfiles obtenidos post inversión (círculos de color verde representa la inversión de la curva de dispersión del dominio de frecuencia en 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 para una profundidad de 30 metros.

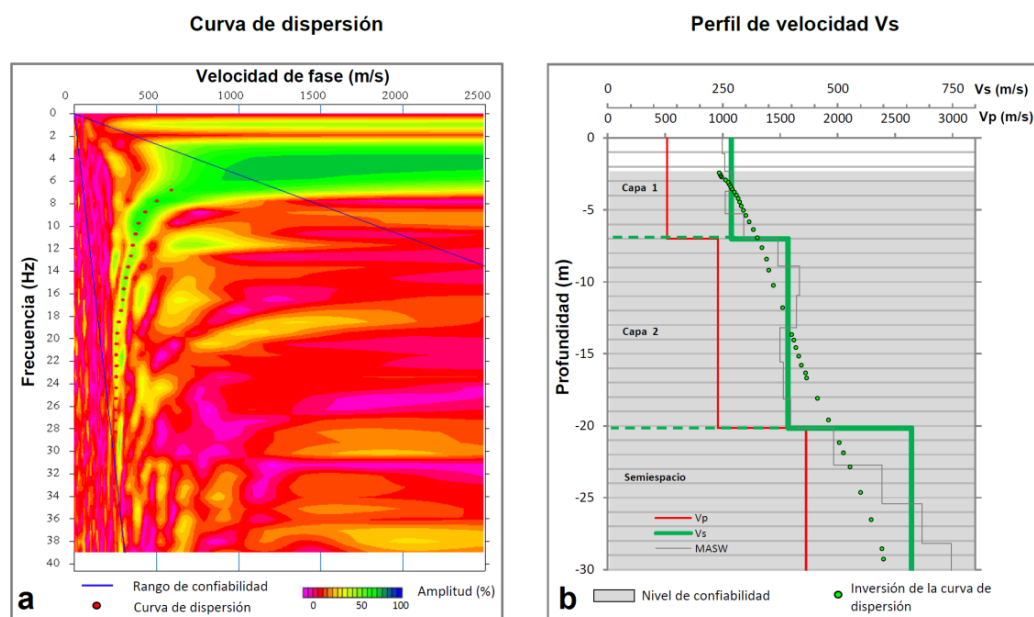


Figura 4: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir de la técnica de MASW.

- Interpretación: Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este estudio, se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030. En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, a fin de considerar dos clasificaciones adicionales. Asimismo, esta nueva clasificación del perfil del suelo, es representado con colores para una mejor comprensión (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 ₃	Suelo blando		
2	180 m/s a 350 m/s	S ₂	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 ₁	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 ₀	Roca dura		

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología de la zona de estudio su contenido de humedad o nivel freático, 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 distribución de los valores de la resistividad del subsuelo para definir o delimitar los diferentes estratos con mayor o menor contenido de agua, sales disueltas presentes en las fracturas de las rocas y en la porosidad del suelo.

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

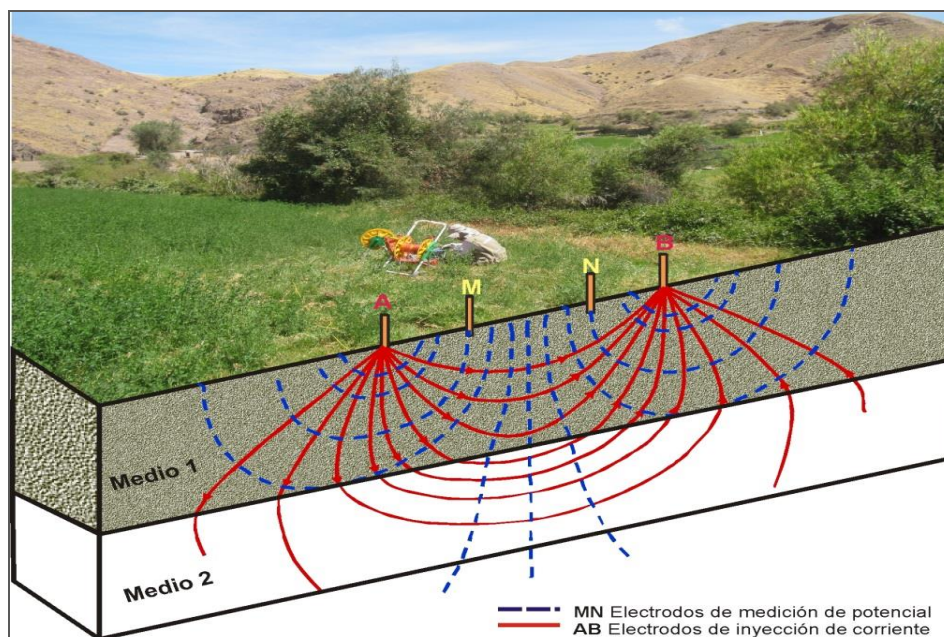


Figura 5: Principio del método de resistividad eléctrica (LE04-MQ).

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

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

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

- **Interpretación:** 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, 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 suelos estarán bajo condiciones de ausencia de agua; sin embargo, si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en sus valores de resistividad.
- **Alto Resistivo (color anaranjado):** Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. y consideran 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. y 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. y según Loke (2001), corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Dentro de este grupo se encuentran 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 considera suelos con presencia de agua, material orgánico y 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 (Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación de perfiles de suelo, a partir de la norma E.030.

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

Dada la estrecha relación existente entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas del subsuelo. En tal sentido, se puede decir que al producirse incrementos de fluidos en el terreno, sus efectos se verán reflejados en la disminución de los valores de resistividad.

2. ADQUISICIÓN DE DATOS

En este estudio se ha realizado la aplicación de métodos sísmicos y geofísicos, para conocer el comportamiento dinámico de los suelos en áreas de Torata - Yacango. Los datos recolectados en campo permitirán aplicar la técnica de razones espectrales (H/V) a datos de vibración ambiental, velocidades de ondas y espesores capas mediante arreglos sísmicos lineales (MASW) y obtener los valores de resistividad del suelo a partir de métodos eléctricos.

2.1. Registros de vibración ambiental

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

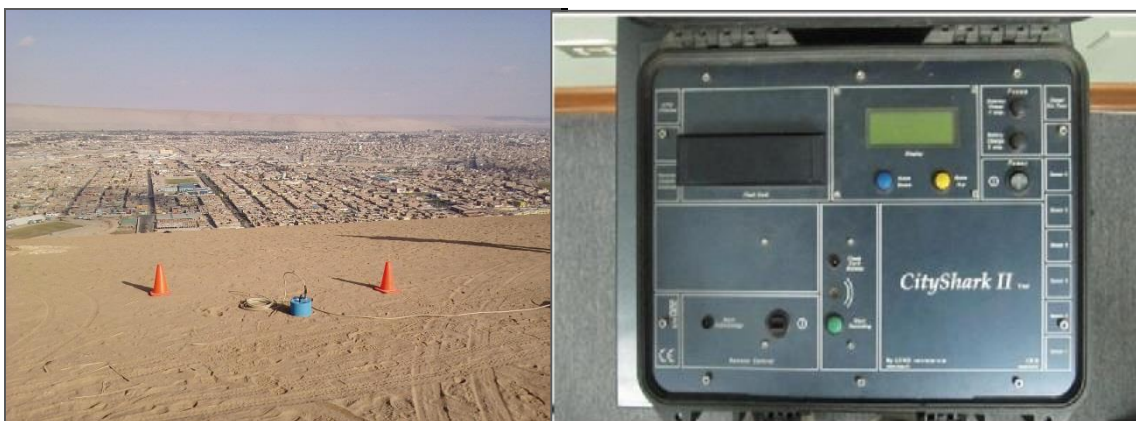


Figura 6: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en el área urbana de Torata: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark II.

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de las áreas urbanas de Torata y Yacango, a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica, geomorfológica y geotécnica de la zona de estudio. Cada uno de los puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, tienen una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis. En el área urbana de Torata - Yacango, se consideró 123 registros de vibración ambiental obtenidos de maneras puntuales y distribuidos según la Figura 7.

En la Figura 8, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto TO-041 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en TO-018, 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.

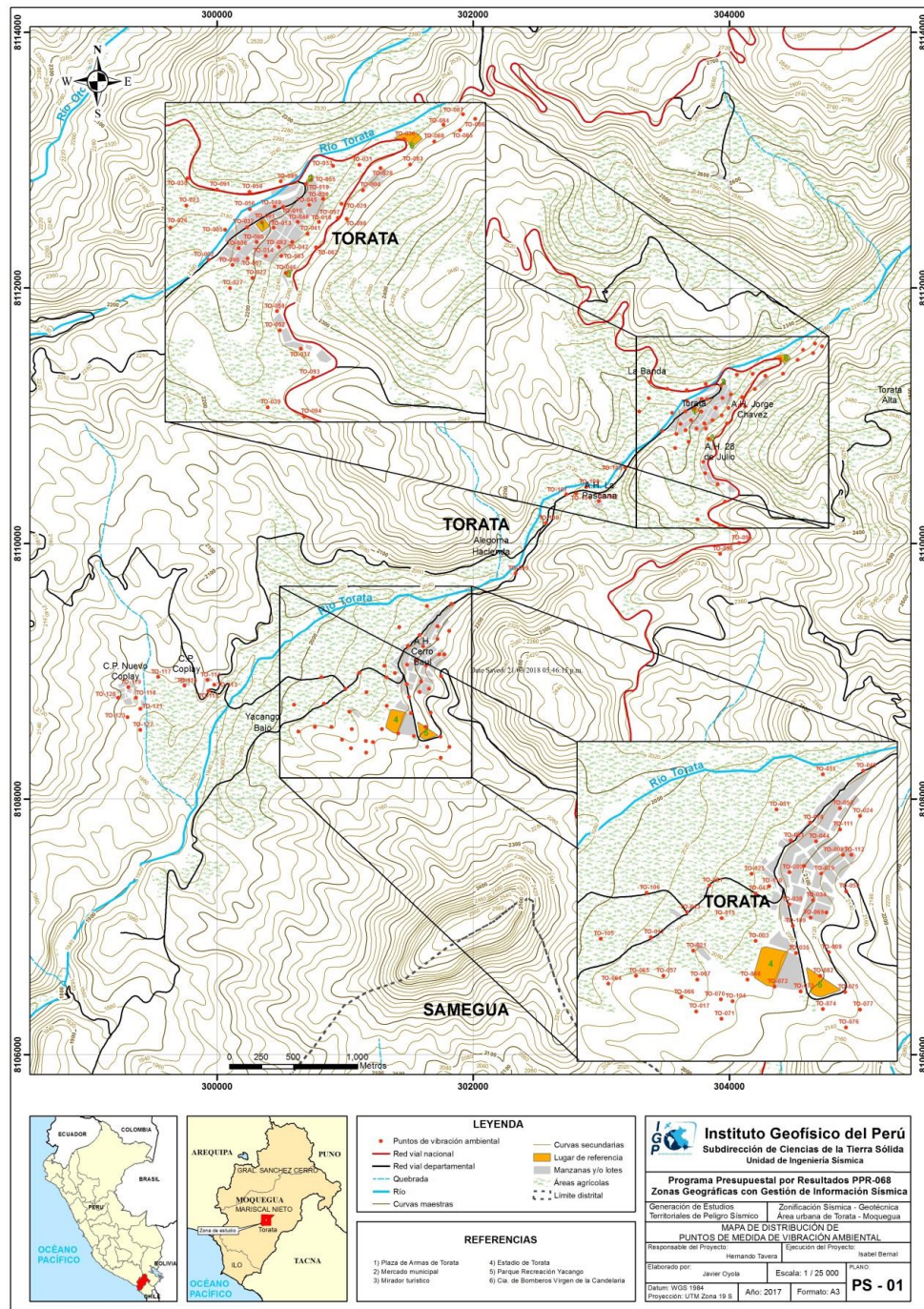


Figura 7: Mapa catastral del área urbana de Torata - Yacango y la distribución de puntos donde se tomaron los registro de vibración ambiental HV.

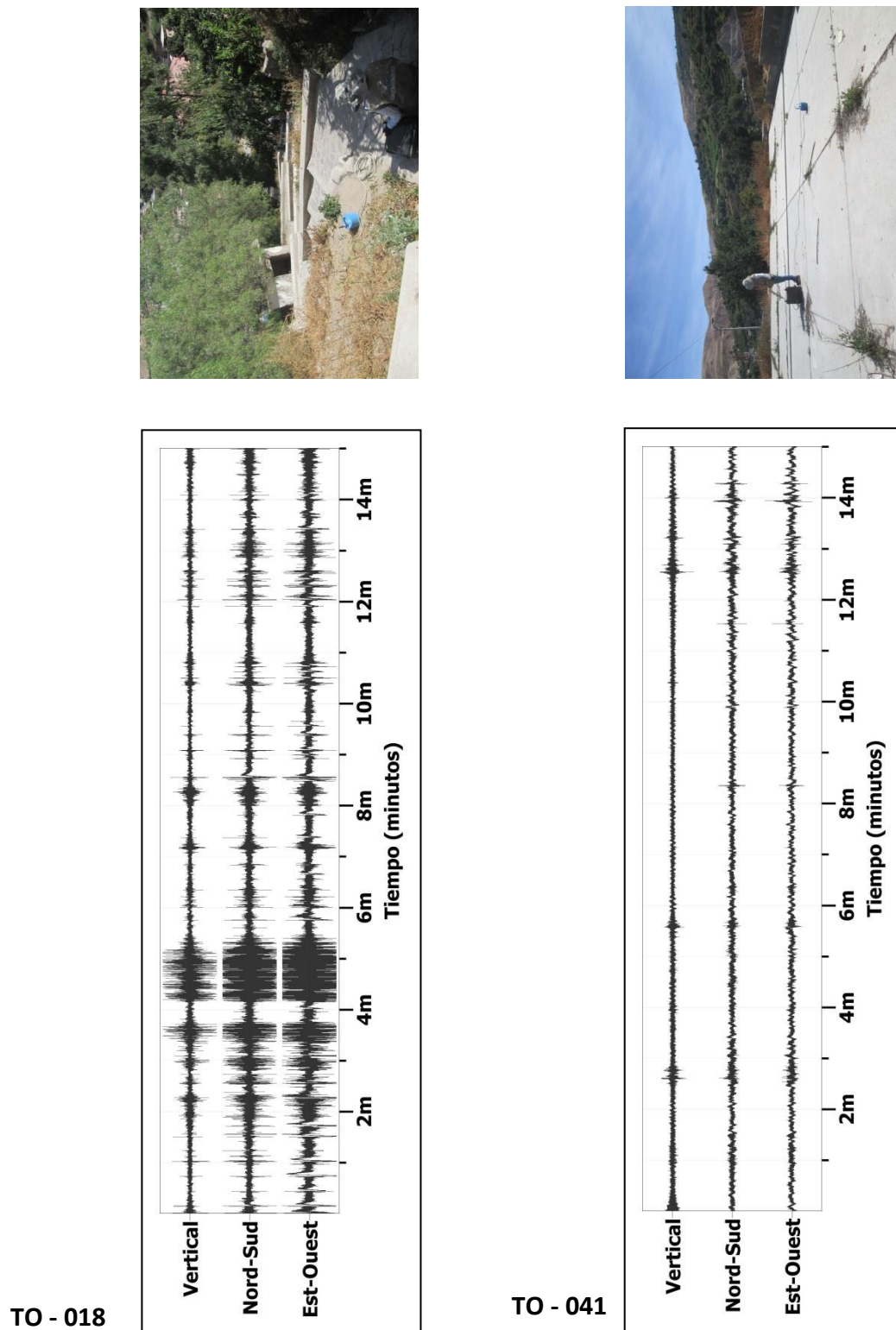


Figura 8: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (TO-018) y otro con ruido de fondo constante (TO-041). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

2.2. Registro de arreglos lineales (MASW)

Para el registro de información 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, ver Figura 9. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, 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 las áreas urbanas de Torata - Yacango se realizaron 7 arreglos sísmicos; en la Tabla 3 se presentan las coordenadas de cada línea y en la Figura 10, se presenta el mapa con la distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas.

Tabla 3: Coordenadas y características de las Líneas Sísmicas.

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-TO	303586	8111188	2205	4	92
	303496	8111208	2208		
LS02-TO	304164	8111196	2257	4	92
	304229	8111262	2257		
LS03-TO	303645	8110833	2196	3	69
	303629	8110767	2194		
LS04-TO	301575	8109172	2093	4	92
	301652	8109226	2098		
LS05-TO	301634	8108557	2081	4	92
	301713	8108510	2092		
LS06-TO	299287	8108881	2025	4	92
	299286	8108788	2010		
LS07-TO	299899	8108815	2000	4	92
	299915	8108905	2009		

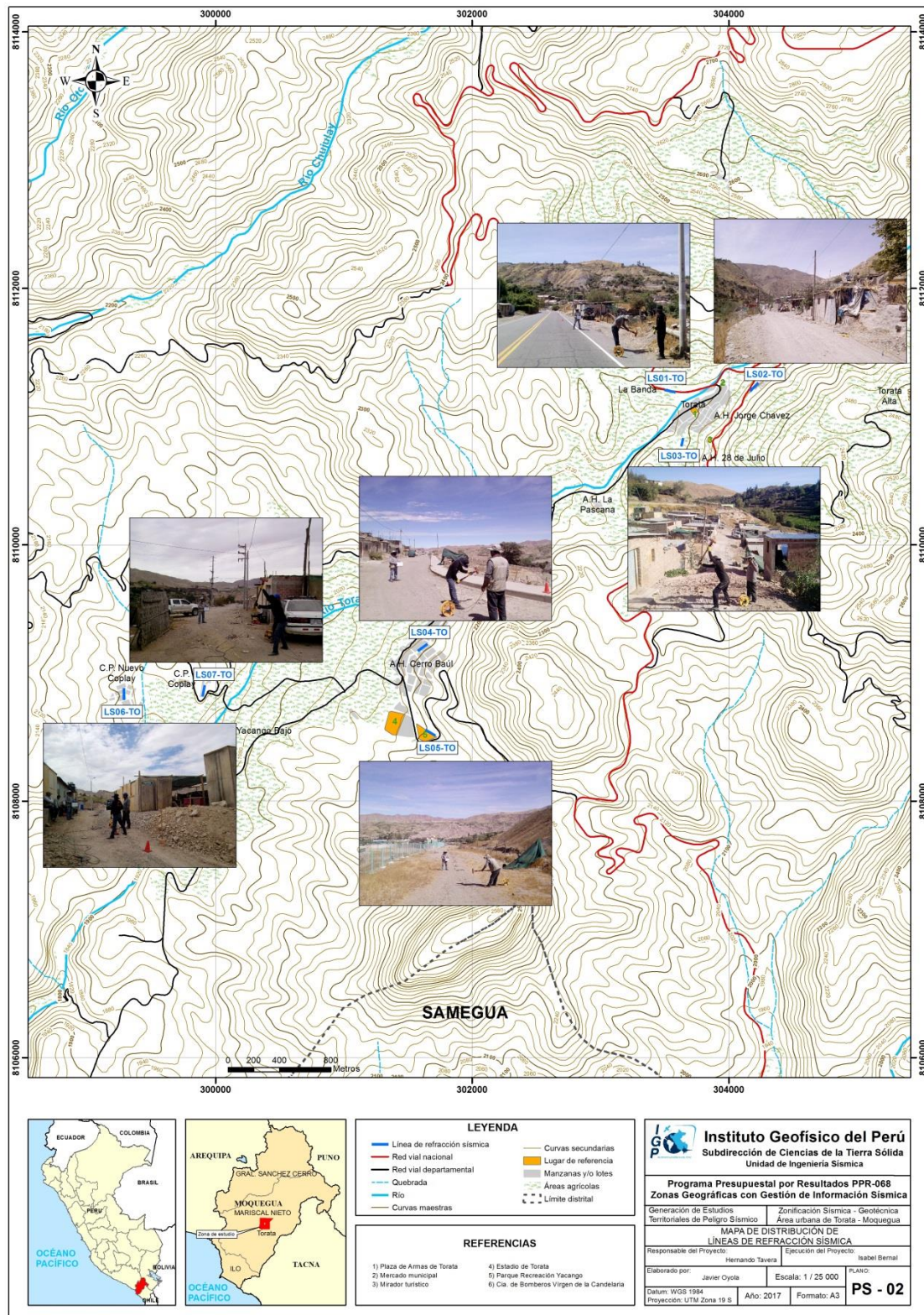


Figura 10: Mapa del área urbana de Torata - Yacango y distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas como: LS01-TO,..., LS07-TO.

Durante la adquisición de datos se visualiza las señales sísmicas, a fin de verificar la calidad de los datos y el nivel de ruido, tal como se observa en la Figura 11. Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (en cada punto de disparo se registran varios golpes y es acumulado al anterior), 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. El procesamiento de la información de MASW fue realizado en el programa de computación SeisImager.

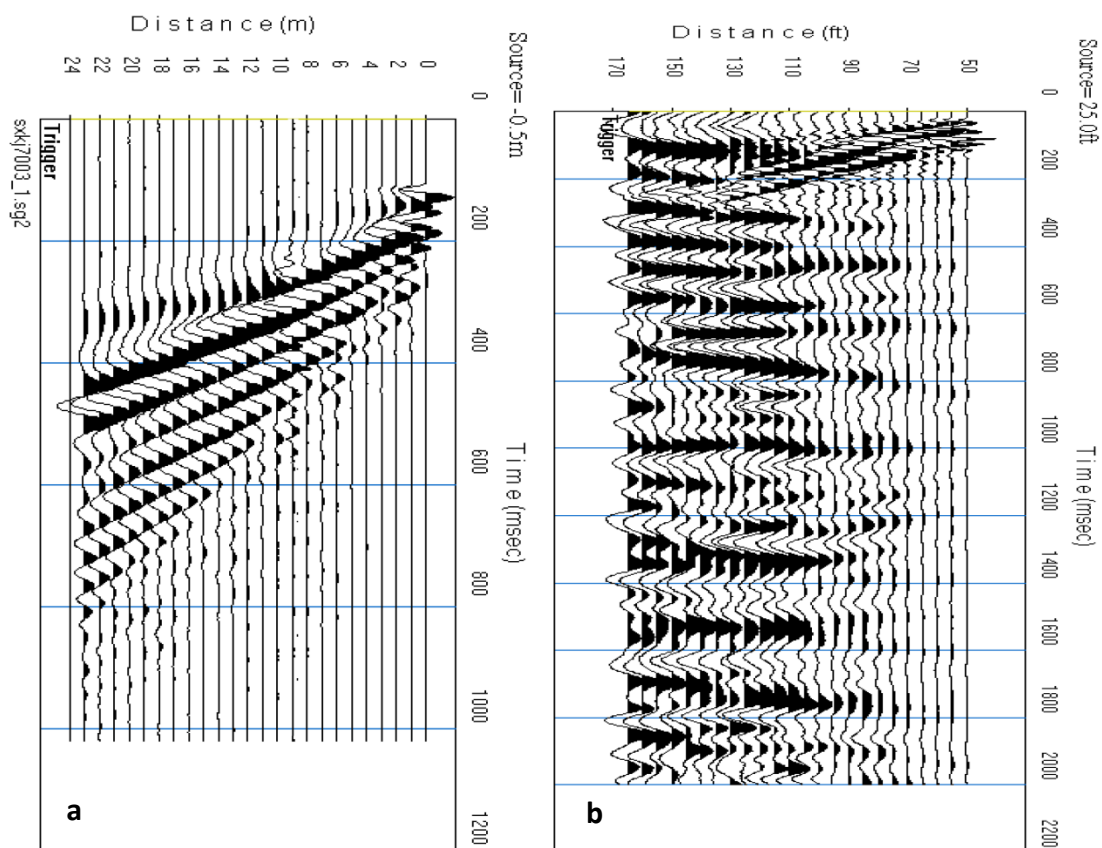


Figura 11: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental, es decir, alta calidad. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 12, como ejemplo se muestra la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS07-TO, ubicado próximo en el C.P. Coplay. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental, registrados por sensores ubicados a lo largo de la línea y cuyo punto de disparo se encuentra a una distancia de 6 metros al final de la línea sísmica.

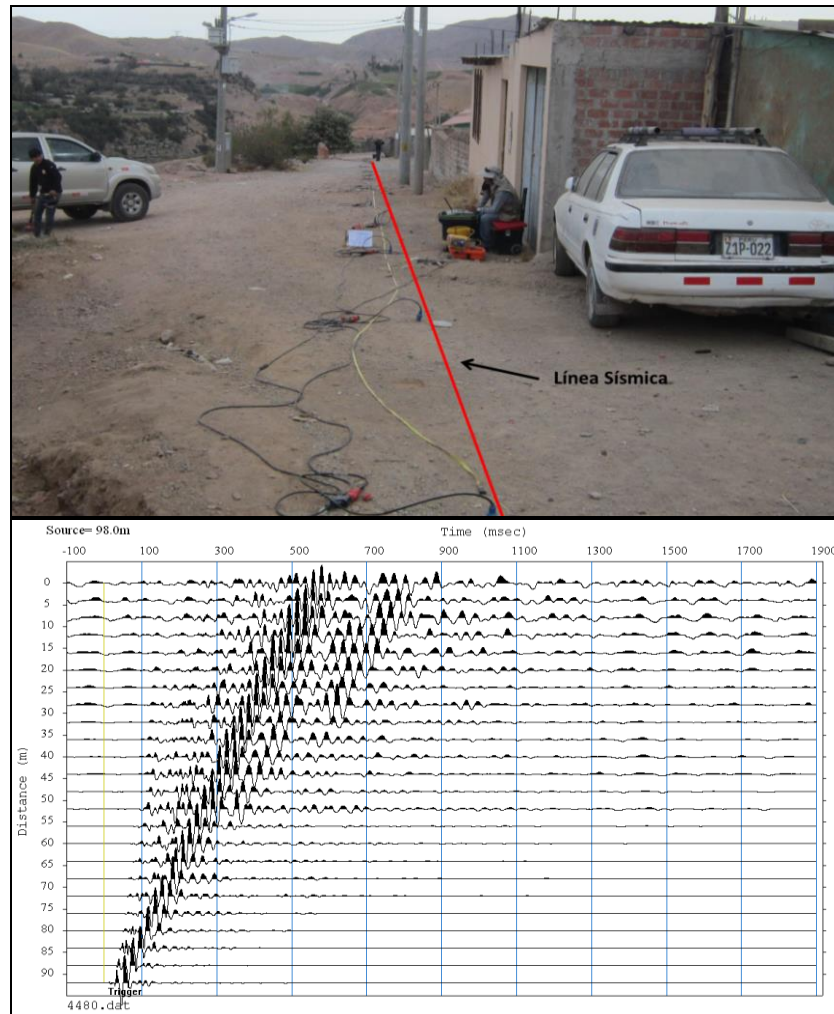


Figura 12: Disposición del equipo de adquisición por el método de MASW y el registro sísmico obtenido.

2.3. Registro de la 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.

Para las áreas urbanas de Torata y Yacango se realizaron 08 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 140 y 210 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad mayores a los 30 metros.

En la Tabla 4, se muestra las coordenadas UTM (WGS84) que corresponden a los puntos extremos de cada una de las líneas eléctricas.

Tabla 4: Coordenadas de las Líneas eléctricas (LE) realizadas en la ciudad de Torata – Yacango

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01-TO	303629	8111183	2209	10	140
	303509	8111105	2193		
LE02-TO	304196	8111355	2233	10	140
	304062	8111315	2219		
LE03-TO	303812	8110788	2245	10	140
	303711	8110888	2210		
LE04-TO	302941	8110452	2136	10	190
	302757	8110437	2127		
LE05-TO	301899	8109195	2172	10	190
	301716	8109246	2113		
LE06-TO	301548	8108621	2102	10	210
	301725	8108496	2127		
LE07-TO	299835	8108858	1990	10	190
	299805	8108670	1976		
LE08-TO	299545	8109063	2001	10	140
	299427	8108976	1987		

La calidad de la señal eléctrica de todos los registros se evaluó mediante un test de resistencia de contacto entre los electros y el terreno, garantizando 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 consideró los siguientes criterios:

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

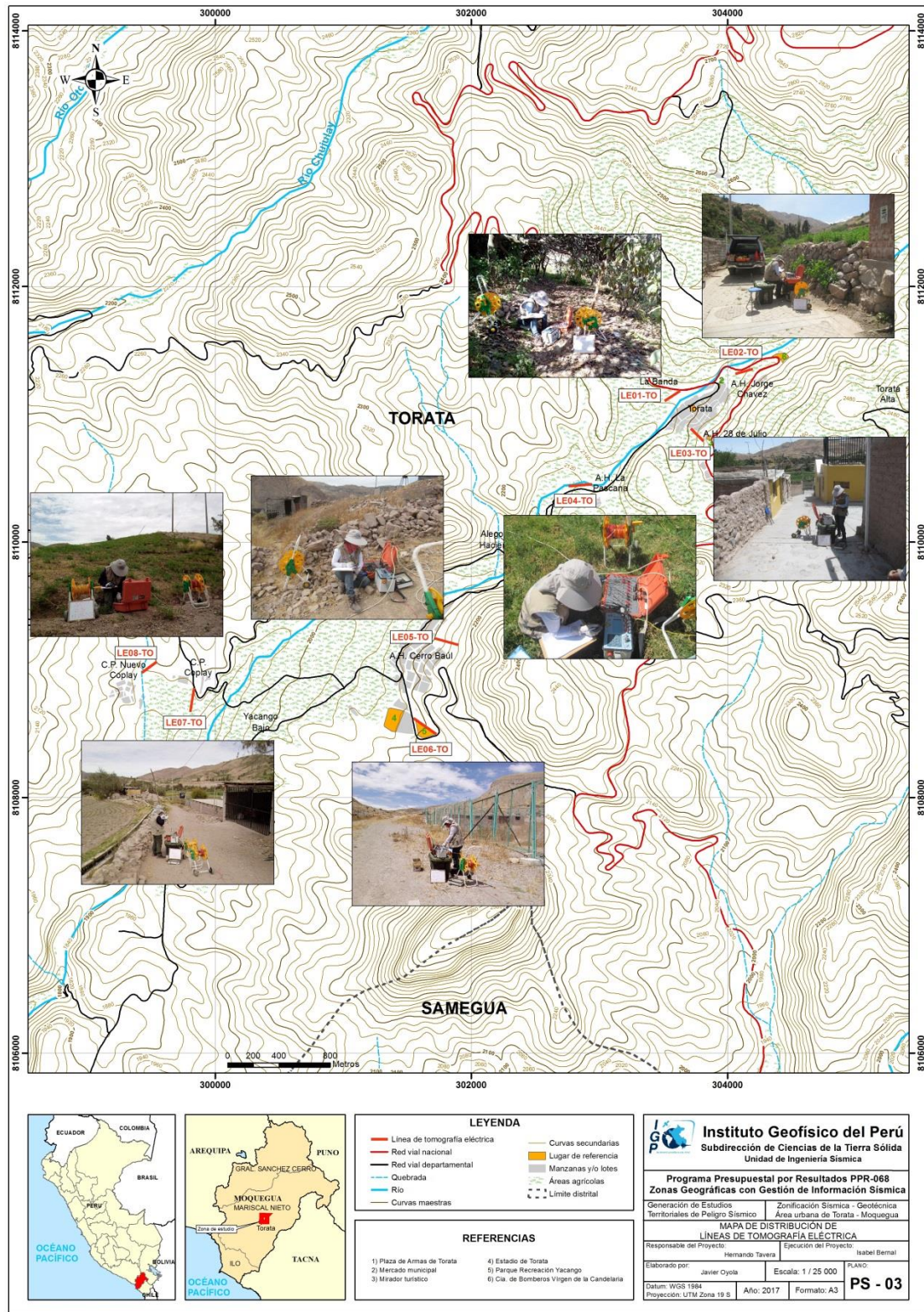


Figura 13: Mapa del área urbana de Torata - Yacango y la distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-TO, ..., LE08-TO.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. En la Figura 14, se muestra la

disposición del equipo eléctrico en campo y un ejemplo de la distribución de valores de resistividad en profundidad.

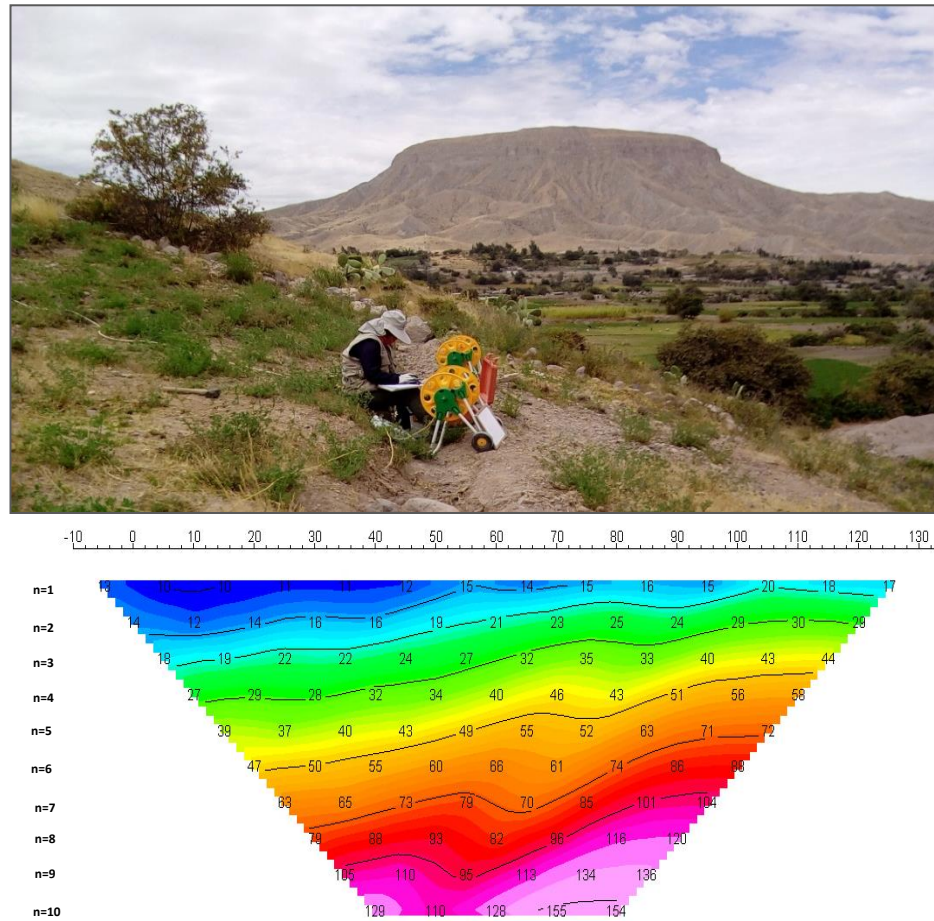


Figura 14: Disposición del equipo de adquisición por la técnica de ERT (LE08-TO) y el registro eléctrico obtenido en campo.

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS GEOFÍSICOS

En este estudio se ha realizado la aplicación de los métodos sísmicos y geofísicos de razones espectrales (H/V), arreglos sísmicos lineales (MASW) y métodos eléctricos (ERT). Conocer las propiedades físicas y dinámicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc. en las áreas urbanas de Torata - Yacango). A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos para las áreas urbanas de Torata y Yacango.

3.1. Frecuencias Predominantes

Esta información permite obtener espectros de Fourier para los tres componentes de registro de vibración ambiental obtenidos de manera puntual en 123 puntos (Figura 7). La relación espectral de las componentes horizontales con la vertical permite conocer las frecuencias y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa para cada punto.

- **Distribución de frecuencias predominantes:** A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los han permitido definir dos rangos de frecuencias F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz), el primero corresponde a un pico de frecuencia bien definido, y el segundo de un pico de menor amplitud con tendencia a valores mayores de frecuencia. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en el área urbana de Torata - Yacango.

- **Frecuencia predominante F_0 :** En la Figura 15, se muestra el mapa con la distribución espacial de las frecuencias predominantes, sobresaliendo en la margen derecha de la Plaza de Armas y el Mercado Municipal del área urbana de Torata, frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz.; hacia la margen izquierda en el sector La Banda valores entre 1.5 y 1.7 Hz. En el C.P. Yacango sobresalen valores entre 1.0 y 1.5 Hz., y hacia Yacango Bajo, estos valores tienden a incrementarse hasta 1.8 Hz.

Los ejemplos de razones espectrales para los puntos TO-031 (A), TO-046 (B) ubicados en el sector de La Banda, El Mirador Turístico y en dirección N del Parque

Recreacional de Yacango se muestra en la Figura 16. En esta figura se observa el predomina de un pico bien definido a frecuencias de 1.8, 1.9 y 1.4 Hz. con amplificaciones de hasta 4 veces. Asimismo, sobresale un segundo pico, entre 4.0 y 7.0 Hz con mínimas amplificaciones, aunque en algunos casos alcanza amplificaciones de hasta 3 veces, tal como se observa en el punto TO-031.

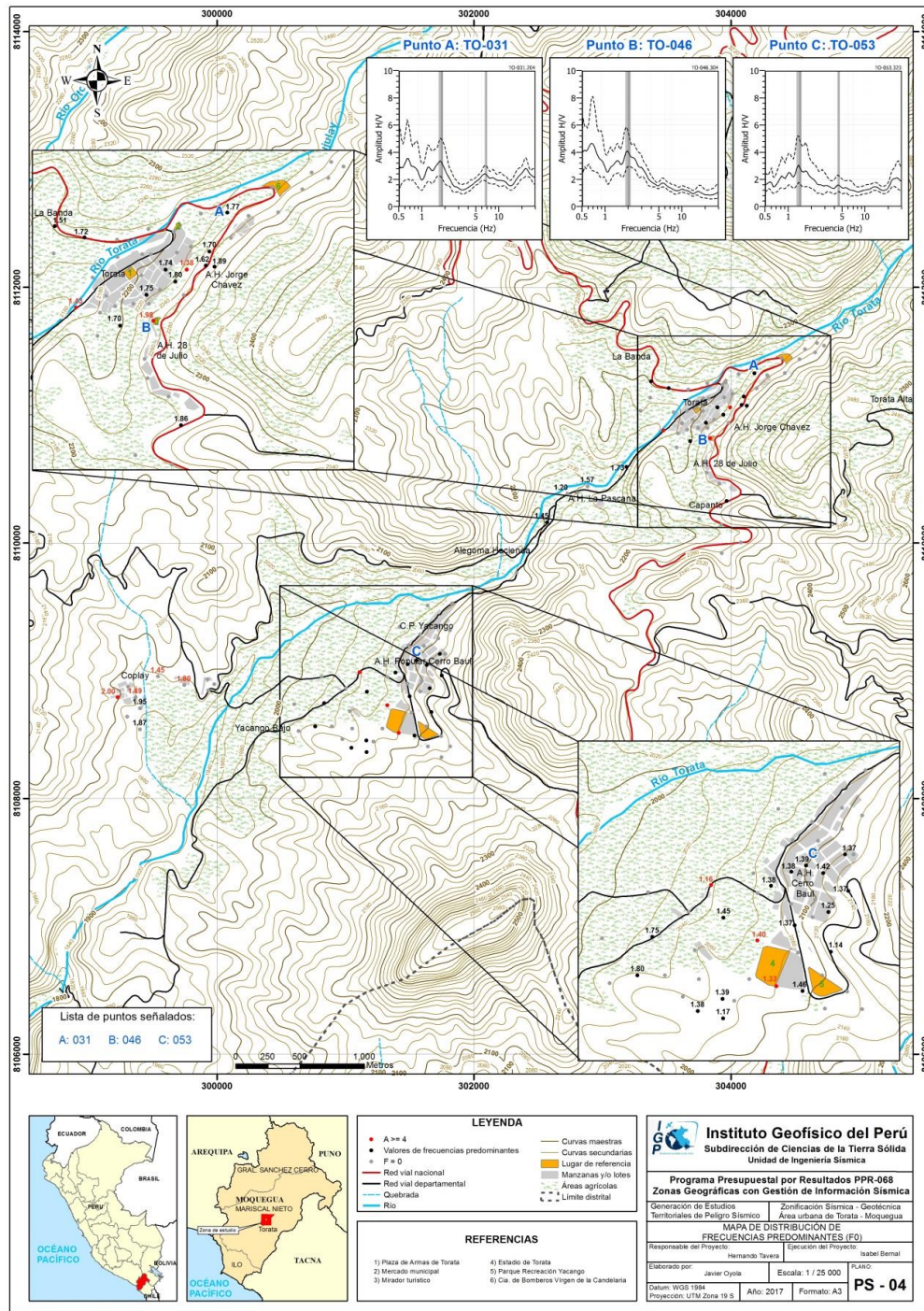
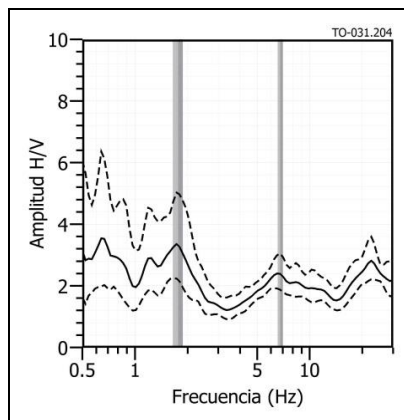
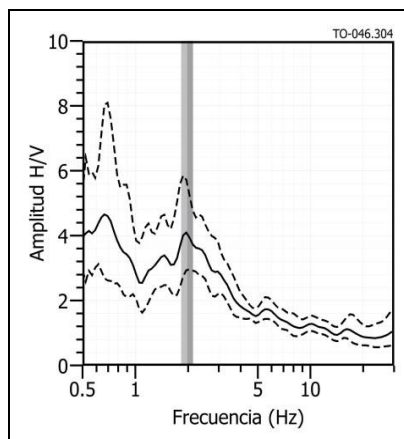


Figura 15: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes definidas en cada punto. Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 14 como característicos de este rango.

TO - 031



TO - 046



TO - 053

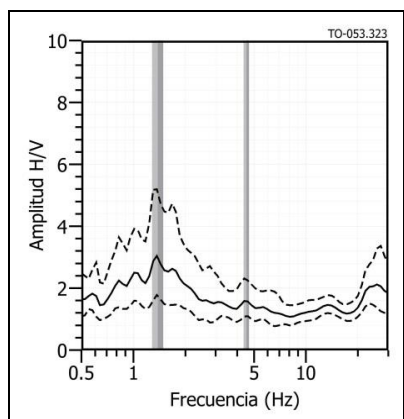


Figura 16: Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-031 (A), TO-046 (B) y TO-053(C), ubicados en el sector de La Banda, El Mirador Turístico y en dirección N del Parque Recreacional de Yacango. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencia predominante F1:** En la Figura 17, se muestra el mapa de distribución espacial de las frecuencias predominantes, F1 ($F > 2.0$ Hz). En la zona céntrica del área urbana de Torata y el sector La Banda sobresalen valores entre 2.0 y 9.0 Hz; hacia el sector sur del Mirador de Turístico se observan valores entre 2.0 y 6.0 Hz. y conforme se tiende hacia su extremo NE, estos valores tienden a 4.0 y 5.0 Hz. Por otro lado, en el C.P. Yacango se observa valores de frecuencias predominantes entre 2.0 y 10.0 Hz. En la Figura 18, se muestra ejemplos de razones espectrales que caracterizan a los suelos para en el rango de frecuencias F1.

Las razones (H/V) obtenidos para los puntos TO-029 (E), TO-030 (F) y TO-092 (O), ubicados en el A.H. Jorge Chavez, en el sector La Banda y en la margen derecha de la Plaza de Armas de Torata, muestra el predominio de frecuencias de 5.8, 4.0 y 5.2 Hz. con amplificaciones de hasta 4 veces. Asimismo, se observan la presencia de un primer pico a frecuencias de 1.7, 1.5 y 1.8 Hz. con amplificaciones de hasta 4 veces y en el punto TO-092, un tercer pico a 13.6 Hz. alcanzando amplificaciones mínimas de hasta 2 veces, evidenciando la presencia de suelos relativamente heterogéneos. El primer pico frecuencias desaparece hacia el extremo NE de la zona urbana de Torata, puntos TO-084 (L), TO-087 (M) y TO-088 (N), distribuidos en la margen derecha de la Compañía de Bomberos Virgen de la Candelaria. Aquí predominan frecuencias de 4.5, 4.3 y 4.5 Hz. con amplificaciones de hasta 3.0 veces, valores que evidencian la presencia de suelos relativamente compactos.

Las razones espectrales para los puntos los puntos TO-015 (A), TO-065 (H) y TO-079 (K), ubicados en dirección O, NO, N del Parque Recreación de Yacango, muestran frecuencias entre 4.0 y 10.0 Hz. con amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces. Asimismo, es notorio la presencia de un primer pico con frecuencias menores a 2.0 Hz. y amplificaciones de hasta 4 veces. En los puntos TO-021 (C), TO-073 (I) y TO-075 (J), ubicados al NO y próximo al Parque Recreacional de Yacango sobresalen frecuencias de 6.0, 5.9 y 5.9 Hz. con amplificaciones de hasta 3 veces. En los puntos TO-016 (B), TO-024 (D) y TO-049 (G), ubicados en dirección NE del Parque Recreacional de Yacango, sobresalen frecuencias 5.1, 6.0 y 5.9 Hz. con amplificaciones de hasta 3 veces. Estos resultados sugieren que los suelos en el C.P. Yacango son relativamente heterogéneos.

En las razones espectrales para los puntos ubicados en el C.P. Coplay, sobresalen frecuencias mayores a 2.0 Hz. con amplificaciones relativas de hasta 8 veces. En el extremo norte de Coplay se observa que las razones espectrales

presentan las máximas amplificaciones que las razones espectrales presentan los puntos ubicados en su extremo sur, donde las amplificaciones relativas son de hasta 4 veces.

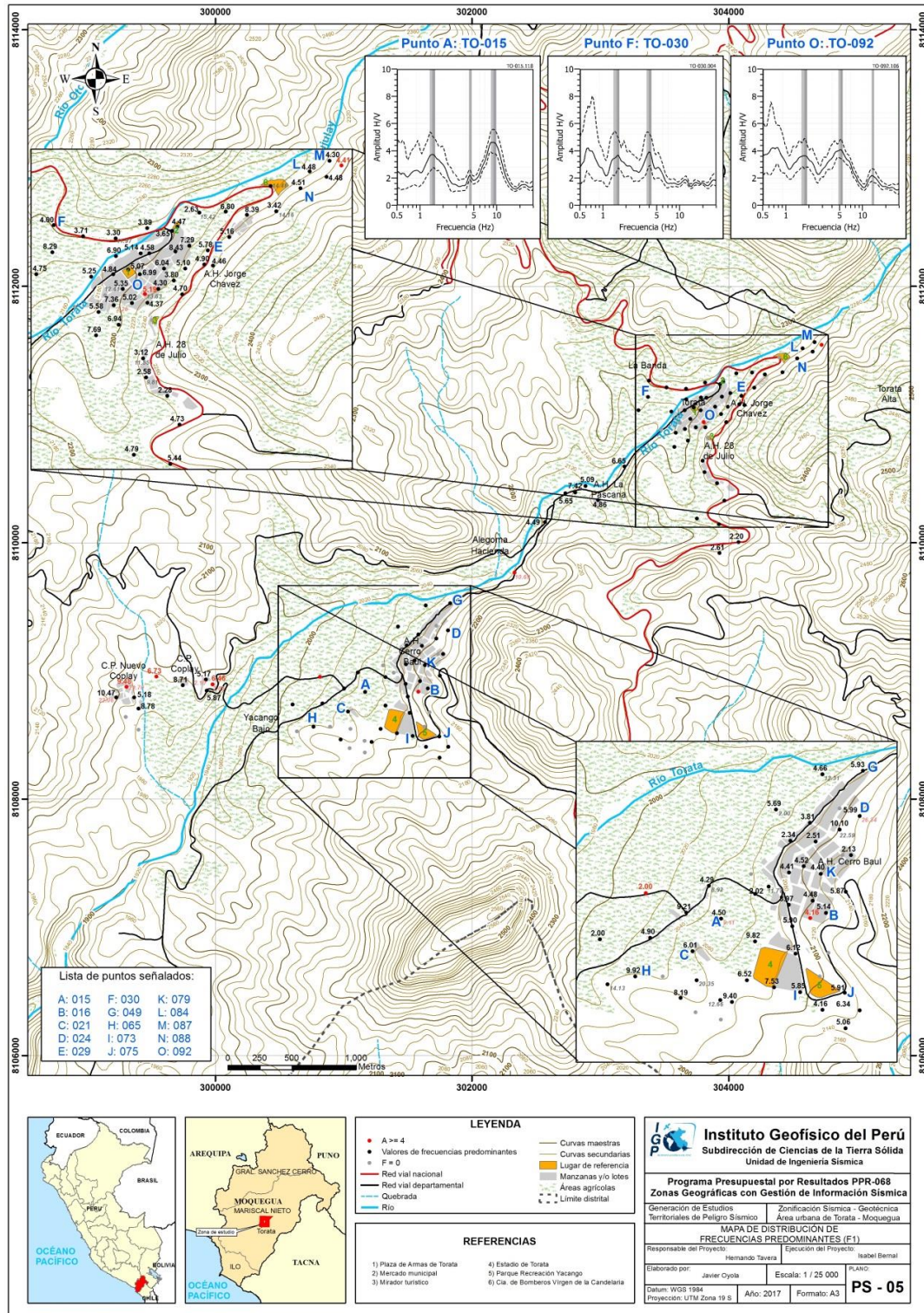
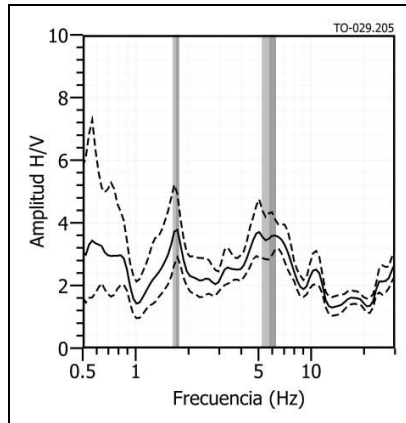
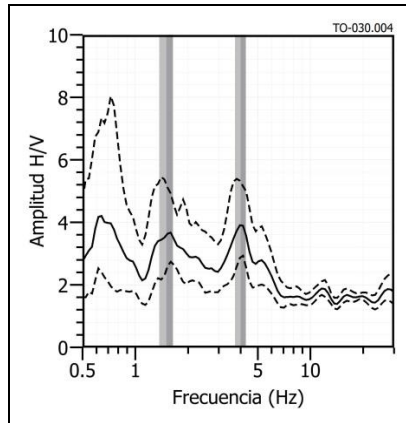


Figura 17: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes definidas en cada punto. Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 16 como característicos de este rango.

TO - 029



TO - 030



TO - 092

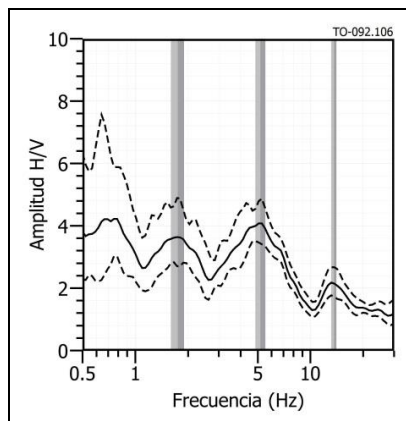
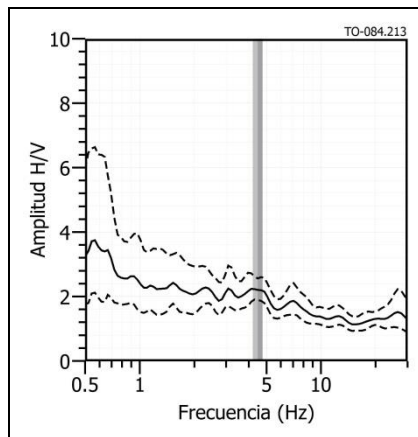
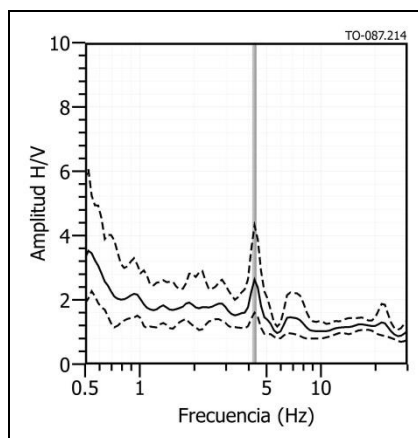


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-029 (E), TO-030 (F) y TO-092 (O), ubicados en el A.H. Jorge Chávez, en el sector La Banda y en el centro de la ciudad de la margen derecha de la Plaza de Armas de Torata. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

TO - 084



TO - 087



TO - 088

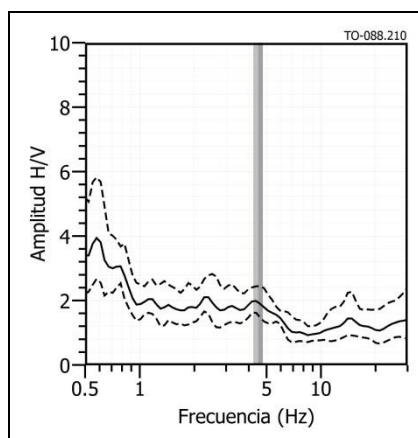
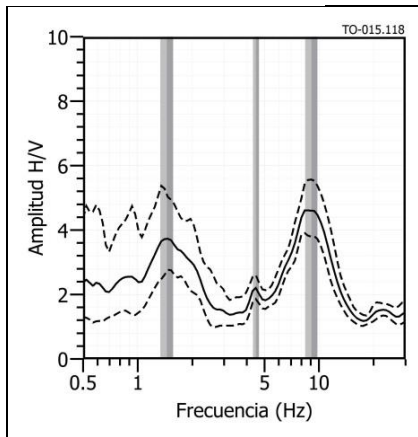
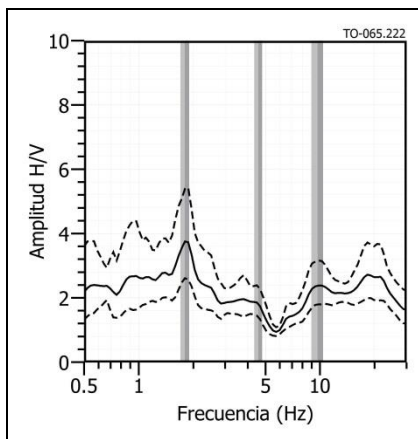


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-084 (L), TO-087 (M) y TO-088 (N), que se distribuyen en la margen derecha de la Compañía de Bomberos Virgen de la Candelaria. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

TO - 015



TO - 065



TO - 079

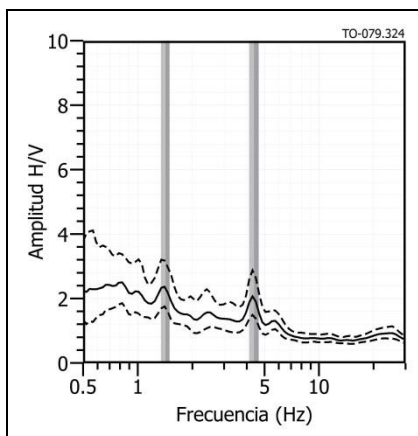
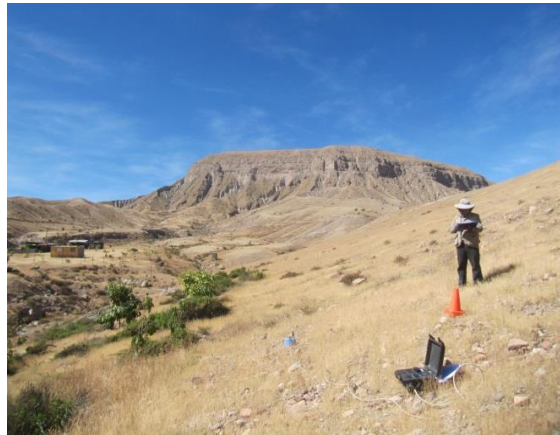
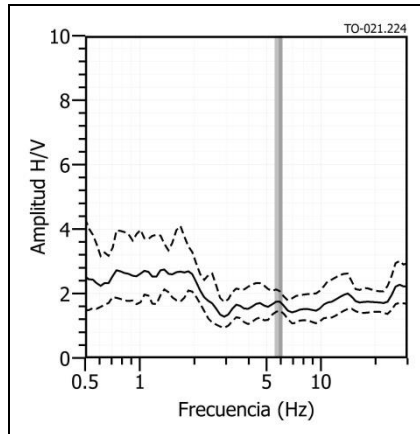
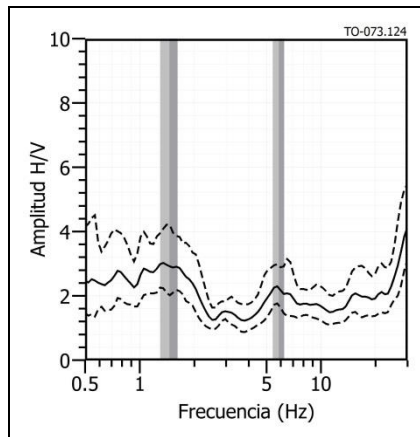


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-015 (A), TO-065 (H) y TO-079 (K), ubicados en el extremo O, NO, N del Parque Recreación de Yacango. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

TO - 021



TO - 073



TO - 075

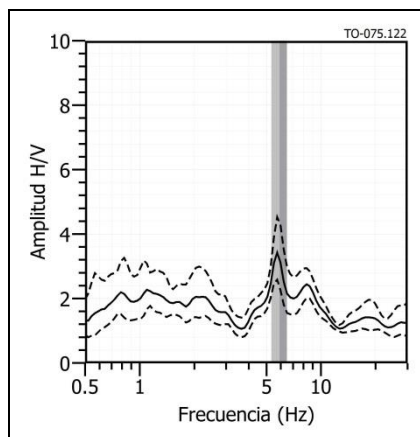
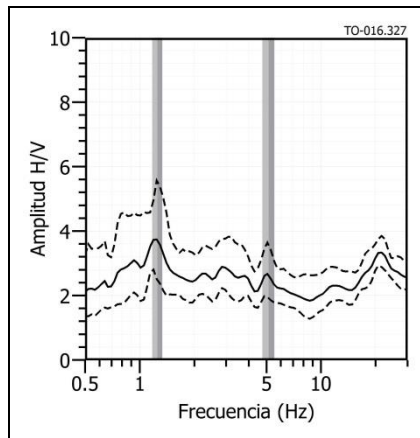
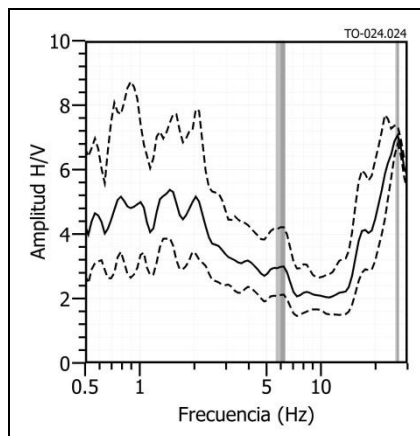


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-021 (C), TO-073 (I) y TO-075 (J), ubicados en dirección NO y próximos al Parque Recreacional de Yacango. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

TO - 016



TO - 024



TO - 049

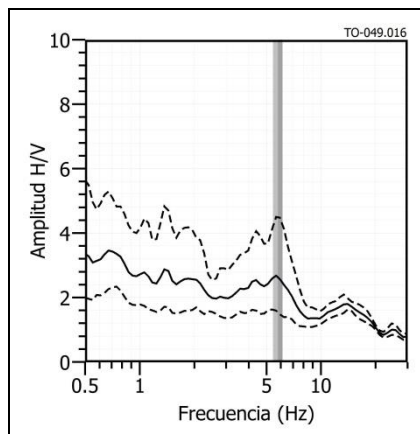


Figura 18: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos TO-016(B), TO-024 (D) y TO-049 (G), ubicados en dirección NE del Parque Recreacional de Yacango. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

3.2. Perfiles de velocidad de ondas de corte Vs

Los modelos de velocidad de propagación (V_s) proporcionan información muy útil para el reconocimiento general de la estructura y naturaleza del subsuelo. En este sentido, en las áreas urbanas de Torata y Yacango, el uso del método MASW permite conocer las características de sus suelos. En el área de estudio se ha obtenido, información para las líneas sísmicas LS01, LS02 y LS03 en el cercado de Torata, LS04 y LS05 en el C.P. Yacango y LS06 y LS07 en C.P. Coplay (Figura 10). A continuación, se describe los resultados obtenidos agrupados según su similitud de velocidades V_s en el perfil sísmico y según su ubicación:

- Línea sísmica LS01-TO: Ubicada en el sector La Banda, próximo al área urbana de Torata (Figura 10): Indica la presencia de suelos conformados por dos capas; la primera, de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 210 m/s, la segunda, con velocidad V_s de 315 m/s y con 9 metros de espesor. Ambos suelos son moderadamente rígidos.

- Líneas sísmicas LS02-TO, LS04-TO, LS05-TO y LS07-TO: Ubicadas en la A.H. Jorge Chávez (LS02), A.H. Cerro Baúl (LS04), al costado del Parque Recreacional de Yacango (LS05) y en el C.P. Coplay), ver Figura 10. La información obtenida indica la presencia de suelos conformados por dos capas sísmicas: la primera de 4 a 9 metros de espesor y velocidades V_s entre 251 a 324 m/s correspondiente a suelos moderadamente rígidos. La segunda, con velocidades V_s de 392 a 484 m/s y espesores de 7 a 14 metros correspondiente a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades de $V_s > 632$ m/s y sugiere la existencia de suelo muy rígido o rocas blandas.

- Línea sísmica LS03-TO: Ubicado en el A.H. 28 de Julio (Cercado de Torata), ver Figura 10. Indican la presencia de suelos conformados por una capa de 11 metros de espesor y velocidad V_s de 301 m/s que sugiere suelo moderadamente rígido. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 955$ m/s que sugiere roca moderadamente dura.

- Línea sísmica LS06-TO: Ubicada en el C.P. Nuevo Colplay (Figura 10) y sugiere la presencia de suelos conformados por una capa con velocidades V_s de 689 m/s y 9

metros de espesor correspondiente a suelos muy rígidos o roca blandas. El semiespacio con velocidades $V_s > 1215$ m/s corresponde a rocas moderadamente duras.

En la Tabla 5, se resume los valores de velocidad de ondas de corte V_s obtenidos para los distintos tipos de perfiles de suelo, según lo indicado en la Tabla 3. En la Figura 19, se presenta los resultados obtenidos para la línea sísmica LS01, y para las líneas LS02 a LS07, ver Anexos.

Tabla 5: Valores de espesor y V_s de las líneas sísmicas realizados en Torata y Yacango mediante el método de MASW.

Superficie				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-TO	210	4	315	9	558	-	377
LS02-TO	269	7	392	13	661	-	394
LS03-TO	301	11	955	-	-	-	514
LS04-TO	324	7	484	14	655	-	455
LS05-TO	251	4	410	7	632	-	475
LS06-TO	689	9	1215	-	-	-	983
LS07-TO	287	9	460	14	649	-	405
Suelo blando (Vs < 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) Roca dura (Vs > 1500 m/s)							

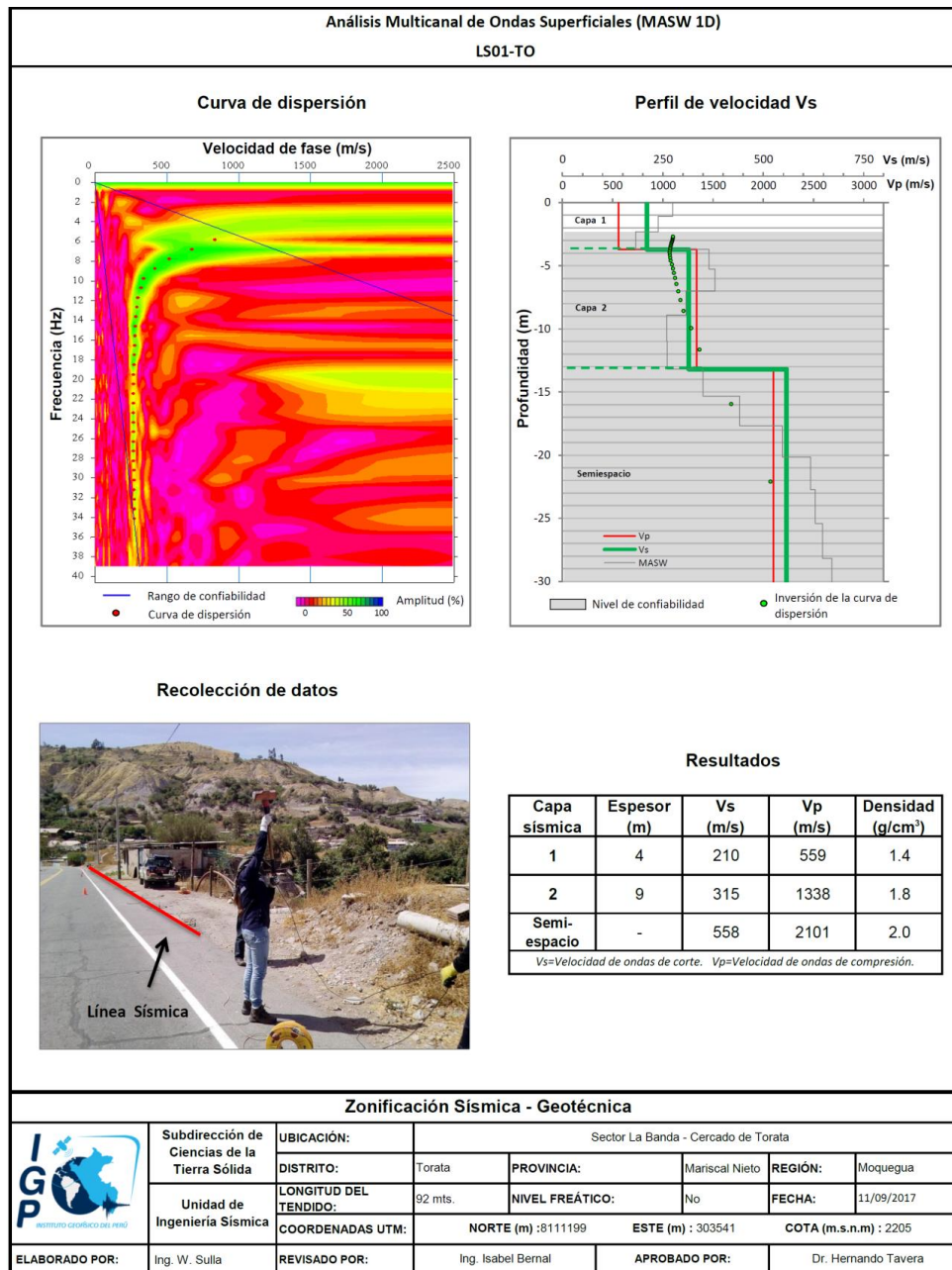


Figura 19: Resultados obtenidos con el método MASW para la línea sísmica LS01-TO.

Finalmente, los resultados obtenidos con la aplicación del método MASW ha permitido determinar la existencia de 2 capas sísmicas y un semiespacio. Las características físicas capa sísmica y su correlación con la geología son descritos a continuación:

En el área urbana de Torata, se tiene la presencia de suelos moderadamente rígidos en superficie (V_s 210 a 315 m/s), con espesores de 11 a 13 metros en el sector La Banda y en el A.H. 28 de Julio. Por debajo, se presentan suelos rígidos a muy rígidos se ha identificado la presencia de rocas emplazados en el extremo norte del área urbana. Sin embargo, se ha identificado la presencia de rocas moderadamente

duras en el A.H. 28 de Julio. Los suelos en superficie, corresponderían a los aluviales que suprayacen a los depósitos de tobas volcánicas (A.H. Jorge Chavez) y a rocas volcánicas (A.H. 28 de Julio).

En el C.P. de Yacango y Coplay se ha identificado suelos moderadamente rígidos en superficie (V_s 251 a 324 m/s) con espesores mayores a los 4 metros, principalmente en el A.H. Cerro Baúl (7 metros) y en Coplay (9 metros). Estos suelos se encuentran sobre suelos rígidos a muy rígidos a profundidad; es decir, suelos competentes de grandes espesores donde la roca se encuentra por debajo de la profundidad investigada. Los suelos del C.P. Yacango corresponden a depósitos aluviales (Figura 20) y del C.P. Coplay a suelos constituidos por areniscas y limolitas (Fm. Sotillo).

Por otro lado, en el C.P. Nuevo Coplay, el perfil de suelo indica la presencia de rocas blandas en superficie (V_s 689 m/s) que suprayacen a rocas moderadamente duras en profundidad; es decir, la presencia de roca volcánica fracturada cubierto de material aluvial de pequeño espesor en superficie, ver Figura 20.



Figura 20: a) Depósitos aluviales en el C.P. Yacango. b) Restos de roca desintegrada en superficie.

3.3. Periodos Dominantes

En este estudio, los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos. En la Figura 21 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes para el área urbana de Torata - Yacango, los cuales

han sido separados en dos grupos, en números pequeños los periodos mayores a 0.3 segundos y en números grandes los periodos menores.

Los periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se distribuyen de manera casi uniforme sobre la zona céntrica de Torata. Hacia el extremo NE de la zona céntrica se concentran periodos de 0.2 segundos (dirección NE de la Compañía de Bomberos Virgen de la Candelaria). Asimismo, en dirección oeste con respecto Mercado Municipal (puntos próximos a la carretera) y en el A.H. 28 de Julio, los periodos tienden a valores que fluctúan entre 0.3 y 0.4 segundos, en la margen derecha de la Plaza de Armas de Torata se observa la influencia de un segundo período que fluctúa entre 0.5 a 0.6 segundos. Por otro lado, en el C.P. Yacango se concentran periodos de entre 0.1 a 0.3 segundos con la influencia de un segundo período que fluctúa entre 0.5 a 0.8 segundos; asimismo, en la proximidad a C.P. Yacango Bajo se presentan periodos de 0.5 segundos. En el C.P. Coplay se observa el dominio de periodos de 0.1 a 0.2 segundos se distribuyen con la influencias de un segundo periodo de 0.5 segundos. En general, las amplificaciones mayores a 4 se presentan de manera dispersa en el área urbana de Torata - Yacango.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos del área urbana de Torata - Yacango están relacionados con sus condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, donde T_0 es el periodo dominante, H el espesor del estrato y V_s es la velocidad de onda de corte. Asumiendo, velocidades de 210 m/s y 310 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se estima la presencia de una capa superficial con espesores de 5 y 16 metros. Para el C.P. Yacango y Coplay se asumen velocidades de 251 m/s y 324 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.3 segundos, identifica la presencia de una capa superficial con espesores entre 6 y 24 metros, asentada sobre un estrato más rígido que presenta espesores de 30 y 65 metros.

En Torata - Yacango, la distribución espacial de periodos mayores a 0.5 segundos sugiere la presencia, en el subsuelo, de una capa profunda de gran espesor y los periodos menores, una capa superficial de menor espesor, donde la primera influye moderadamente sobre la segunda.

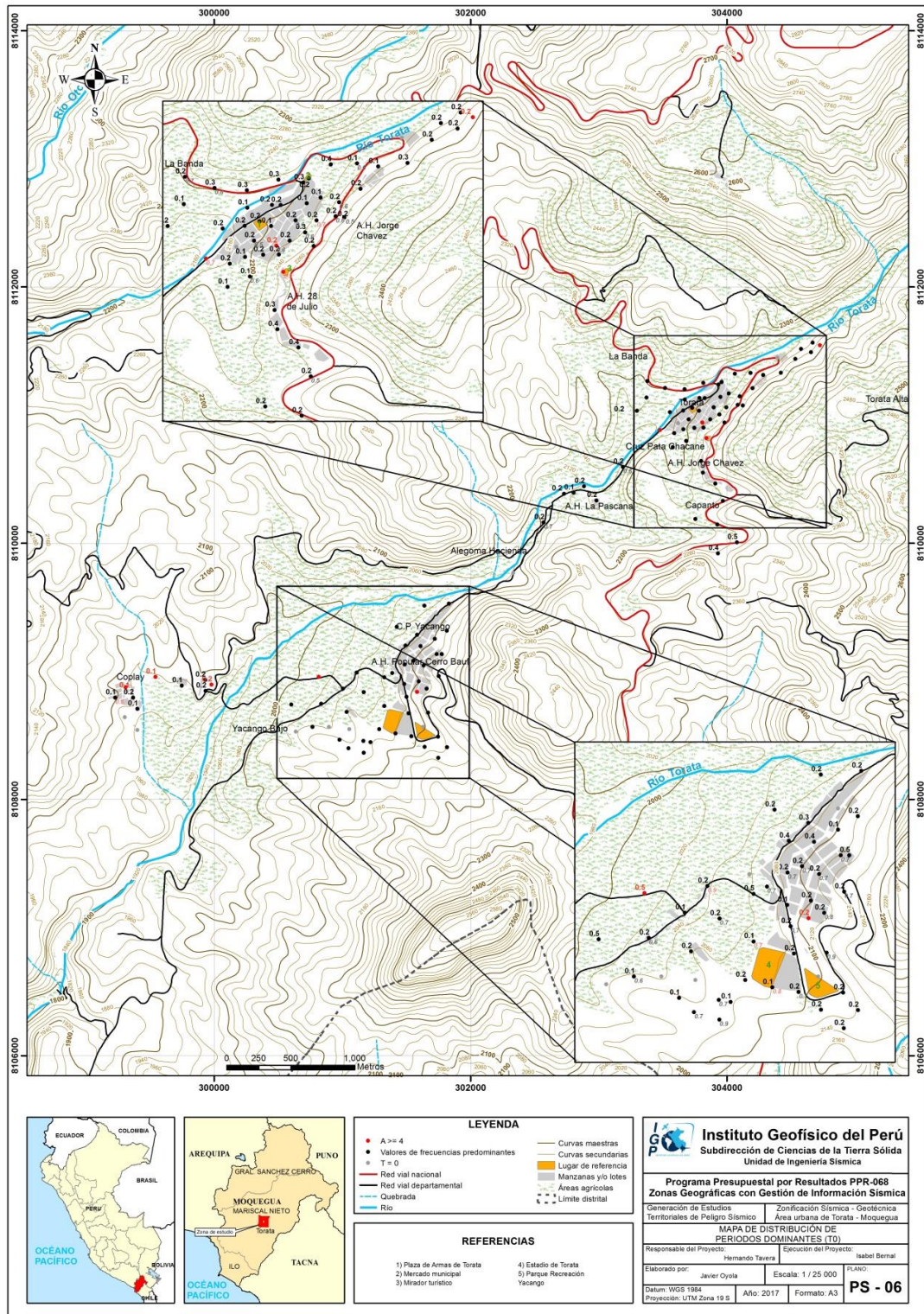


Figura 21: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

3.4. Resistividad geoeléctrica

A continuación, se describen los resultados obtenidos para las líneas de tomografía eléctrica realizados en el área urbana de Torata - Yacango:

Las líneas eléctricas LE01-TO y LE03-TO ubicadas en el extremo oeste de la Plaza de Armas de Torata y próximo al Mirador Turístico, paralelo a la Calle Loreto, (Figura 22), fueron tomadas sobre terrenos de cultivo próximos al río Torata. En la línea LE01-TO se ha identificado valores bajos a muy bajos resistivos ($<100 \Omega.m$), correspondientes a materiales aluviales saturados constituidos por gravas arcillosas. La línea LE03-TO presenta horizontes geoeléctricos de materiales bajos resistivos a muy bajo resistivos, a depósitos aluviales de mayor permeabilidad. Asimismo, en menor porcentaje se identifica de manera aislada la presencia de valores medianamente resistivo (100 a $500 \Omega.m$).

En resumen, las estas líneas eléctricas definen, en menor porcentaje, la presencia de los valores medianamente resistivos ($>100 \Omega.m$) asociados a materiales con menor contenido de humedad, porosidad y permeabilidad como los depósitos aluviales con presencia de gravas; mientras que, en mayor porcentaje se presentan valores bajos resistivos ($<100 \Omega.m$) tanto en superficie como en profundidad, definiendo la presencia de medios con mayor contenido de humedad y mayor permeabilidad como arenas arcillosas y porosas, pudiendo pasar a un medio saturado (Figura 22).

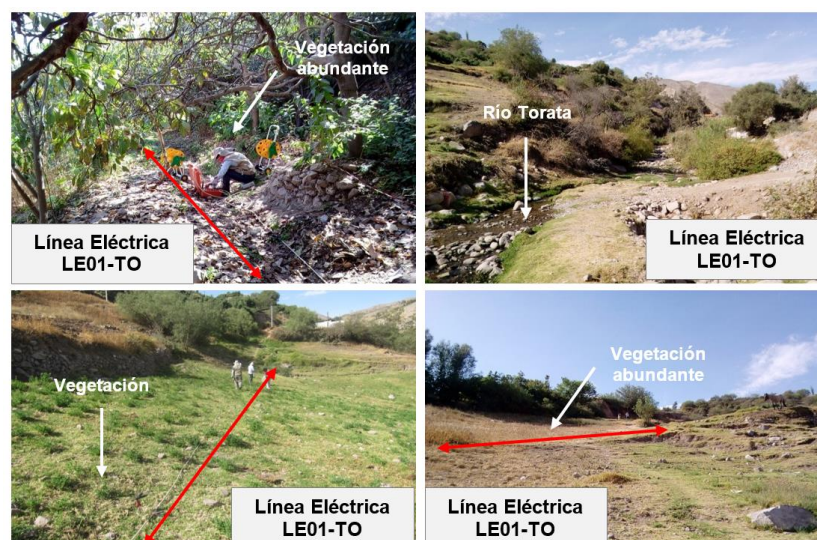


Figura 22: Vista de las líneas eléctricas LE01-TO donde los suelos están compuestos de materiales que puedan almacenar agua a niveles freáticos ubicada entre 5 y 20 metros de profundidad.



Figura 22: ... Continuación.../ Vista de las líneas eléctricas LE03-TO.

Las líneas eléctricas LE02-TO y LE04-TO, paralelas al río Torata se encuentran ubicadas a espaldas del Mercado Municipal y en el AA HH la Pascana, y las líneas eléctricas LE05-TO y LE06-TO, ubicados en el C.P. de Yacango (A.H. Cerro Baúl) en la ladera del cerro Mejía y al costado del Parque Recreación Yacango (Figura 23).

Presentan dos horizontes geoelectrónicos. En la línea LE02-TO, se definió que el primer horizonte presenta valores medianamente resistivos a resistivos asociados a la presencia de gravas y bloques de rocas depositadas por el río Torata. La línea LE04-TO, presenta un dique de material medianamente resistivo que podría asociarse a un afloramiento de rocas. La línea LE05-TO presenta dos horizontes, donde el primer es medianamente resistivo a resistivo y se asocia la presencia de material de la formación Huaracané con depósitos de rocas volcánicas de menor permeabilidad. La línea LE06-TO muestra un primer horizonte de valores medianamente resistivos de poco espesor asociados a la compactación del terreno y al material depositado por una quebrada estacional; mientras que, en el segundo horizonte se observan a presencia de medios saturados, siendo los valores de bajo resistivo a muy bajo resistivo ($<100 \Omega.m$), asociados a la influencia del riego de los terrenos de cultivo, al río Torata y a la mayor permeabilidad y porosidad del material que existe en profundidad: depósitos aluviales donde el material más fino se deposita en profundidad.



Figura 23: Vista de las líneas eléctricas LE02-TO, LE04-TO, LE05-TO y LE06-TO.

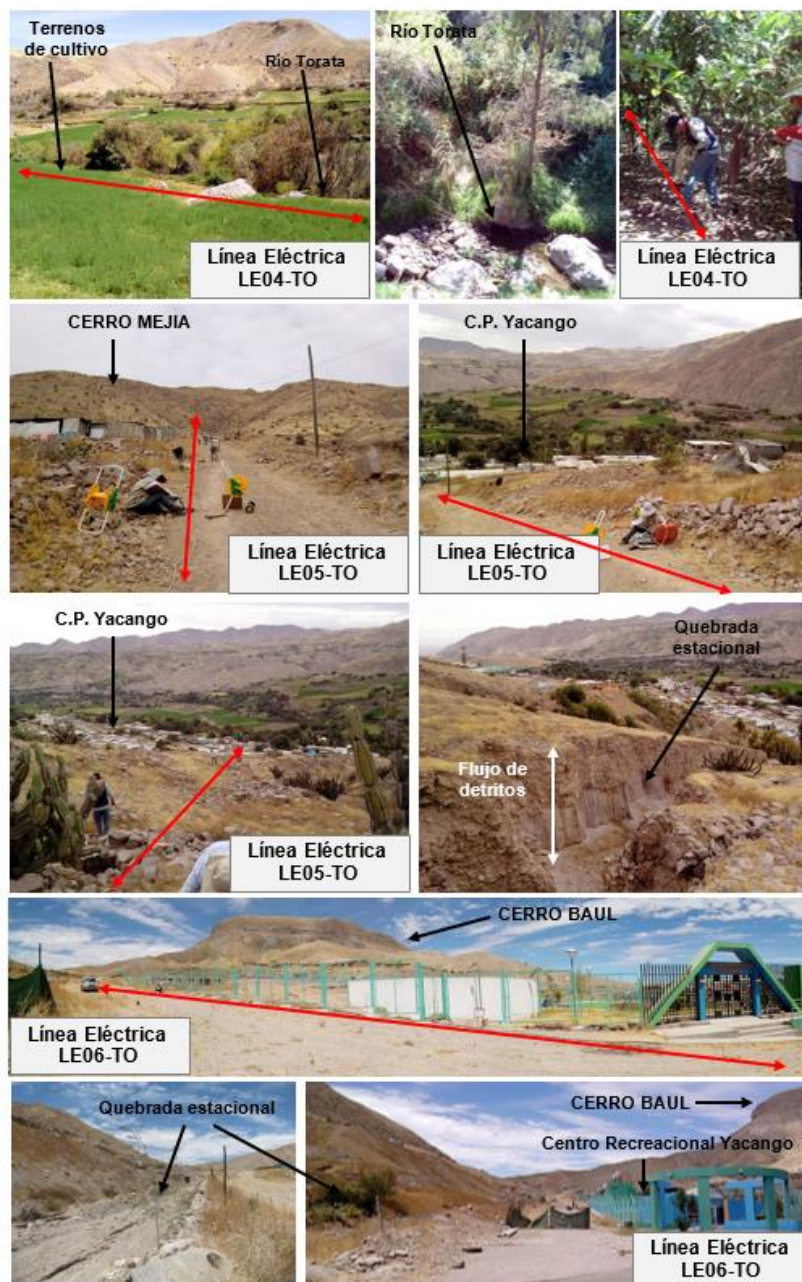


Figura 23: ... Continuación.../ Vista de las líneas eléctricas LE02-TO, LE04-TO, LE05-TO y LE06-TO.

En resumen, en las estas líneas eléctricas se observa la presencia de un mayor porcentaje de valores bajos a muy bajos resistivos ($<100 \Omega.m$) asociado a la presencia de materiales porosos y permeables en profundidad, y en menor porcentaje se presentan valores de forma aislada medianamente resistivo a resistivos ($> 100 \Omega.m$), tanto en superficie como en profundidad.

Las líneas eléctricas LE07-TO y LE08-TO fueron realizadas en el Centro Poblado de Coplay (Figura 24). La línea LE07-TO, define la presencia de un horizonte geoelectrico con valores muy bajos resistivos ($<100 \Omega.m$) asociados a la presencia depósitos aluviales del río Torata, a la actividad agrícola y a la existencia de un canal revestido. La línea LE08-TO presenta dos horizontes geoelectricos, el primero con valores bajos a muy bajo resistivos ($<100 \Omega.m$), como consecuencia del riego periódico de los terrenos de cultivo y el segundo horizonte presenta valores resistivos a muy resistivos ($>100 \Omega.m$) asociados a la presencia de rocas de la formación Huaracané o material arcilloso impermeable.

En resumen, las estas líneas eléctricas presentan un mayor porcentaje de valores bajos a muy bajos resistivos ($<100 \Omega.m$) asociados a materiales porosos; mientras que, el material resistivo a muy resistivo (100 a 1700 $\Omega.m$) presente en profundidad en la línea LE08-TO, presenta rocas volcánicas poco permeables.

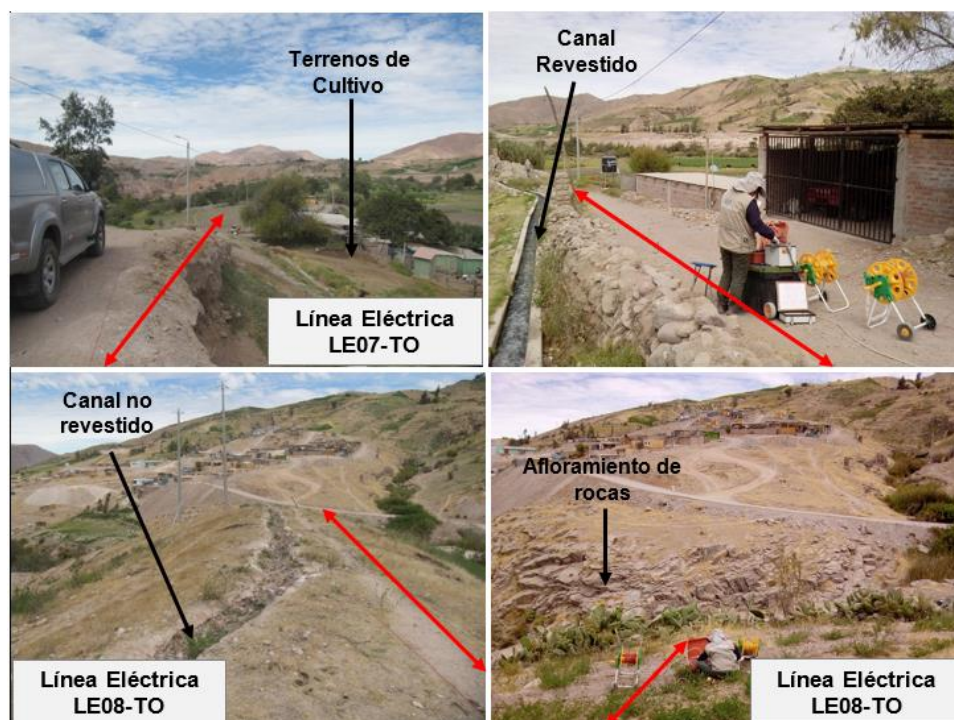


Figura 24: Vista de la línea eléctrica LE07-TO y LE08-TO.

En la Tabla 6, se muestra la orientación, profundidad de observación alcanzada y la saturación del medio para cada línea eléctrica y en la Figura 25, se presenta el resultado obtenido para la línea LE01–TO (otros, ver anexos).

Tabla 6: Valores de resistividad obtenidos para las líneas eléctricas en las áreas urbanas de Torata y Yacango.

Línea Eléctrica	Orientación	Profundidad de alcance (m)	Horizontes geoelectrónicos	Profundidad del horizonte saturado (m)	Saturación
LE01-TO	<i>NE-SW</i>	39	Horiz. 1 ($< 100 \Omega.m$)		P
LE02- TO	<i>NE-SW</i>	39	Horiz. 1 ($> 100 \Omega.m$)		NP
			Horiz. 2 (40 - 80 $\Omega.m$)	15	P
LE03- TO	<i>NW-SE</i>	39			P
LE04- TO	<i>E-W</i>	39	Horiz. 1 ($> 100 \Omega.m$)		NP
			Horiz. 2 (40 - 80 $\Omega.m$)	15	P
LE05- TO	<i>SE-NW</i>	39	Horiz. 1 ($> 100 \Omega.m$)		NP
			Horiz. 2 (40 - 80 $\Omega.m$)	15	P
LE06- TO	<i>NW-SE</i>	39	Horiz. 1 ($> 100 \Omega.m$)		NP
			Horiz. 2 (40 - 80 $\Omega.m$)	5	P
LE07- TO	<i>NW-SE</i>	39	Horiz. 1 ($< 100 \Omega.m$)		P
LE08-TOT	<i>NE-SW</i>	39	Horiz. 1 (40 - 80 $\Omega.m$)		P
			Horiz. 1 ($> 100 \Omega.m$)		NP

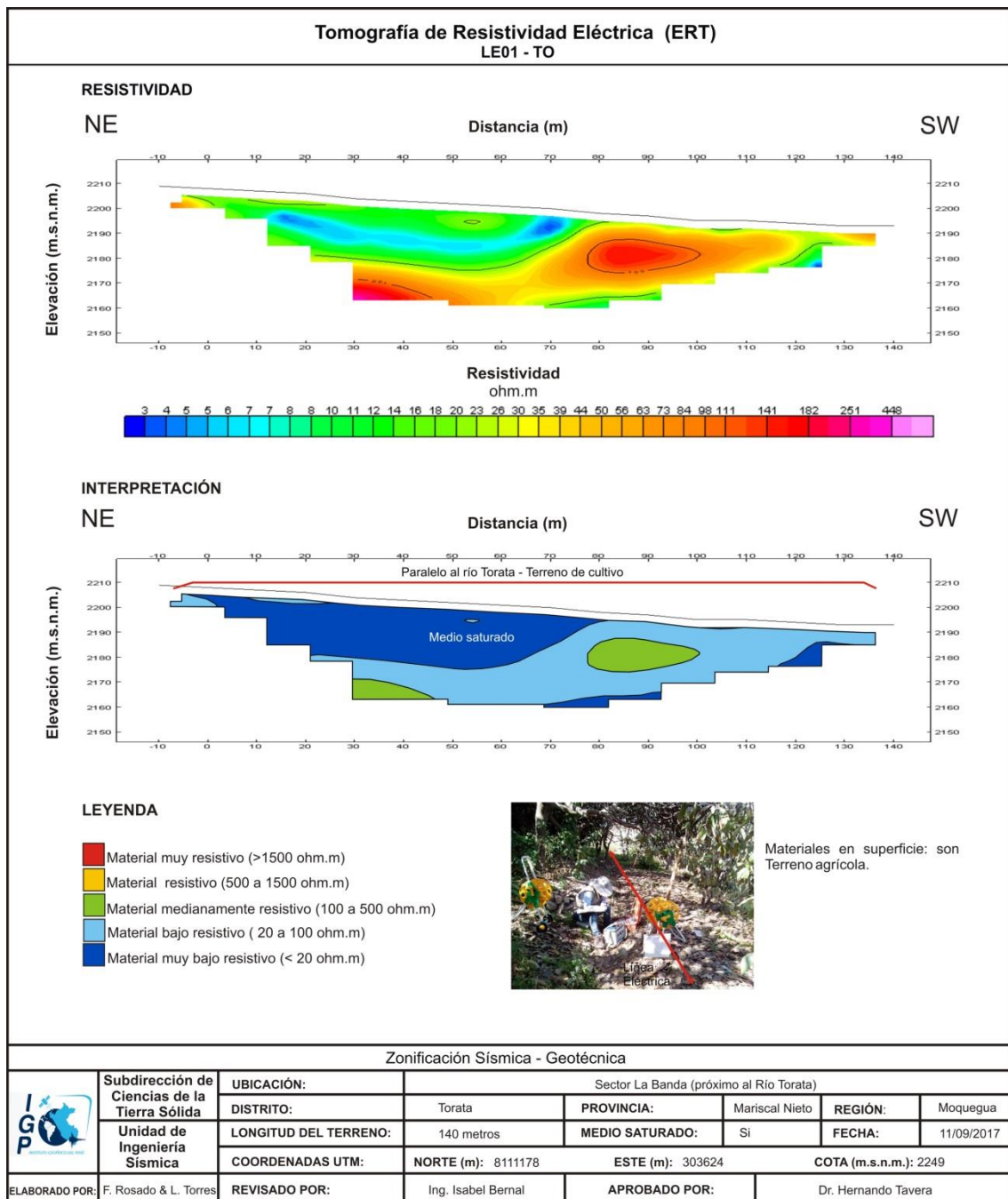


Figura 25: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-TO

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el área urbana de Torata predominan de los medios saturados desde la superficie, excepto en el extremo de Torata y en el A. H. La Pascana y el C. P. Yacango donde el material predominante en superficie es un medio no saturado. La compilación de la información obtenida se presenta en la Tabla 6.

A la profundidad alcanzada por este método (39 metros), ha identificado la presencia de medios saturados. El acuífero permeable saturado y en explotación,

presentaría resistividades que varían de 40 a 82 Ohm.m, correspondiendo a clastos gruesos de buena permeabilidad y con espesores que fluctúan entre 23 y 47 metros (INRENA, 2004): líneas eléctricas LE01-TO, LE02-TO, LE04-TO, LE05-TO y LE06-TO. En el C.P. de Coplay y la zona del Mirador Turístico de Torata, los suelos presentan mayormente resistividades menores a 20 Ohm.m con el incremento notable del material arcilloso y a mayor profundidad se corroboraría la impermeabilidad del suelo con un incremento de la resistividad en línea LE08-TO de 300 ohm.m.

Según la geología Torata presenta depósitos aluviales permeables, que corresponderían a gravas, clastos subredondeados y angulosos en una matriz areno limosa asociados a flujos de barro y conos aluviales, semiconsolidados, teniendo la capacidad de almacenar agua subterránea. Además, existe la Formación Huacarané con tobas, lapilli, líticos volcánicos, lavas de composición andesítica siendo medios impermeables.

Finalmente, los resultados obtenidos indican que el nivel freático en el área urbana de Torata se presenta a partir de 5 metros de profundidad, esto se puede correlacionar con los estudios geofísicos realizados por INRENA (2004). En la cuenca del río Torata, los espesores del acuífero varían entre 7 a más de 39 metros.

4. RESULTADOS

El mapa de microzonificación sísmica-geotécnica se elabora en función de la integración de los resultados de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, información que ha permitido delimitar los suelos con características dinámicas similares, así como sus propiedades mecánicas, y de acuerdo a la Norma de Construcción Sismoresistente E.030, se ha identificado la existencia en las áreas urbanas de Torata y Yacango de suelos de Tipo S1 y T4, cuyas características se detallan a continuación:

4.1. Mapa de Zonificación Sísmica

Según la Figura 26, para las áreas urbanas de Torata - Yacango, se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica:

- **ZONA I:** El área urbana de Torata está conformada por estratos de grava aluvial que se encuentran, a nivel superficial cubiertos por depósitos de materiales finos como arena-arcillosa, arena-limosa; en el C.P. Yacango arcillas y limos; en el C.P. Coplay la presencia de gravas pobremente graduadas con arenas y limos. Esta capa presenta espesores de hasta 20 metros en las áreas urbanas de Torata - Yacango.

En Torata, el suelo tiene un comportamiento moderadamente rígido a muy rígido con períodos de vibración de 0.1 y 0.3 segundos y velocidades de propagación de onda de corte (VS), entre 370 y 520 m/s, que corresponden a un dominio de suelos Tipo S1 según la Norma Sismorresistente Peruana. Asimismo, los suelos presentan una capacidad de carga admisible de media a muy baja de 1.0 - 3.0 kg/cm². Entorno a la Compañía de Bomberos Virgen de la Candelaria y al Mercado Municipal de Torata, existe la presencia de suelos con amplificaciones menores a 2.0 Hz representado por las líneas en negro.

Para el C.P. Yacango, los suelos tiene un comportamiento medianamente rígido con períodos de vibración de 0.1 y 0.3 segundos y velocidades de propagación de onda de corte (VS), entre 400 y 980 m/s, y que corresponden al dominio de suelos Tipo S1 según la Norma Sismorresistente peruana. Características similares se observan en C.P. Coplay. Ambos, presentan una capacidad de carga admisible de 3.0 kg/cm².

Con líneas en amarillo, se delimita un área que contiene aproximadamente al 40% del área en estudio que son influenciados por un segundo rango de periodos de entre 0.5 y 0.7 segundos ubicados a la margen izquierda del A.H. Jorge Chavez, el A.H. 28 de Julio y en el A. H. Cerro Baúl y hacia la margen izquierda de este último. Estos resultados sugieren que a pesar que estos suelos muestran gran consistencia por sus bajas amplificaciones, al presentar sensibilidad a dos rangos de periodos, evidencian una complejidad en su respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

-ZONAS II y III: Los suelos correspondientes a estas zonas no fueron identificados en el área analizada.

- ZONA IV: Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales, por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4. Predominan hacia el extremo SE y NE del área urbana porque que presentan una topografía irregular, donde puede generarse caída de rocas, además de flujo de detritos.

En general, 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 que experimente el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

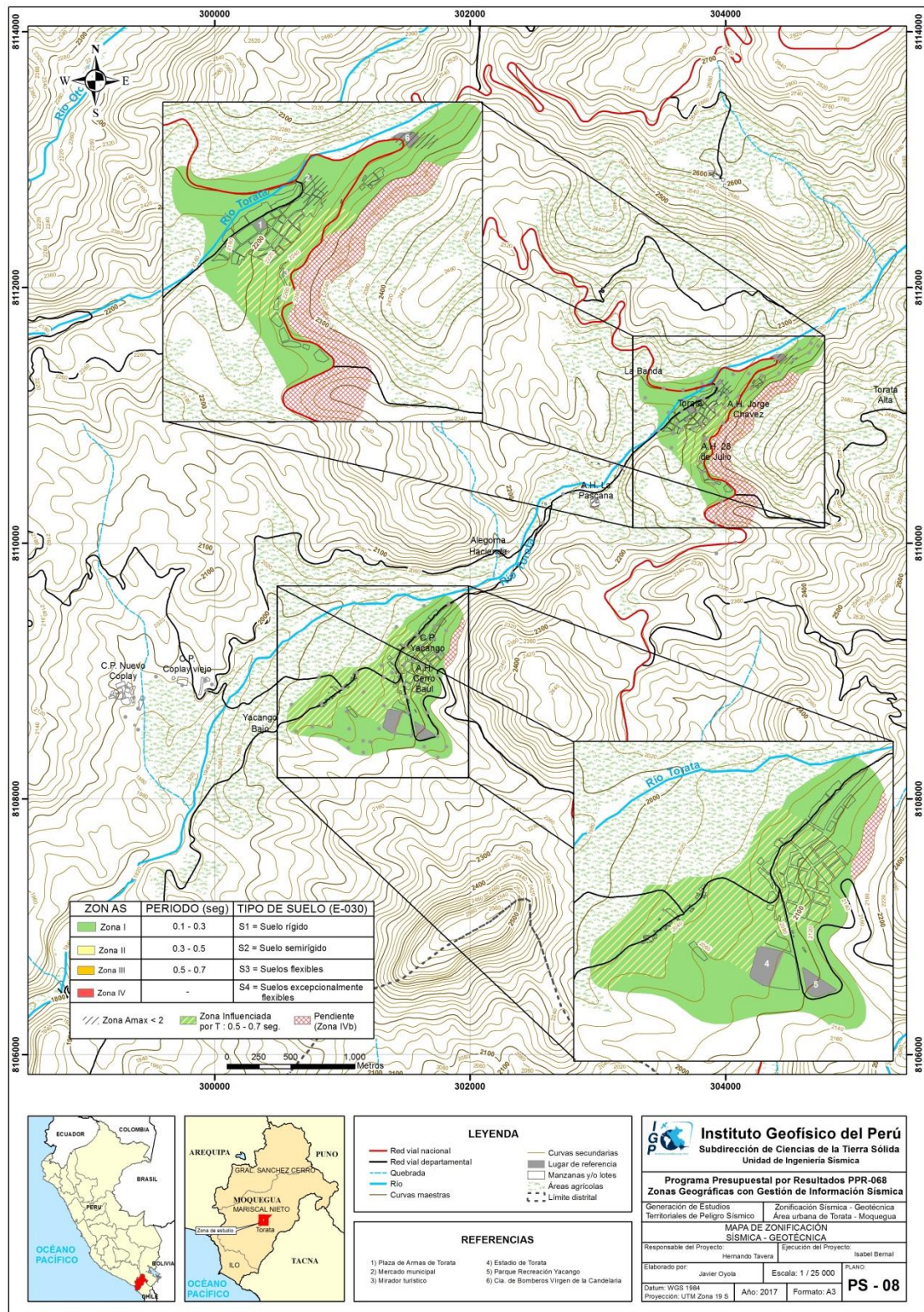


Figura 26: Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Torata - Yacango.

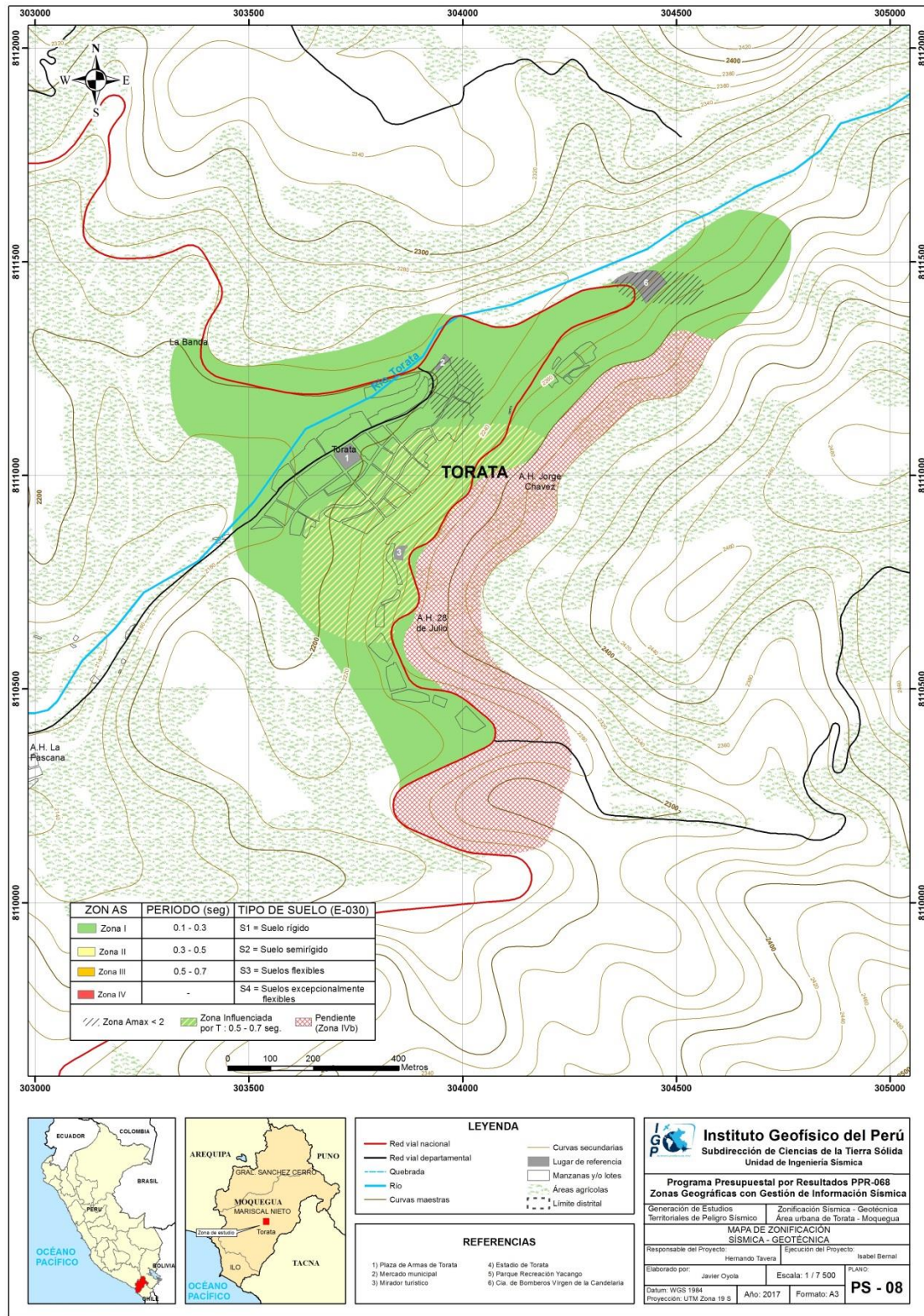


Figura 26: ...Continuación./ Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Torata.

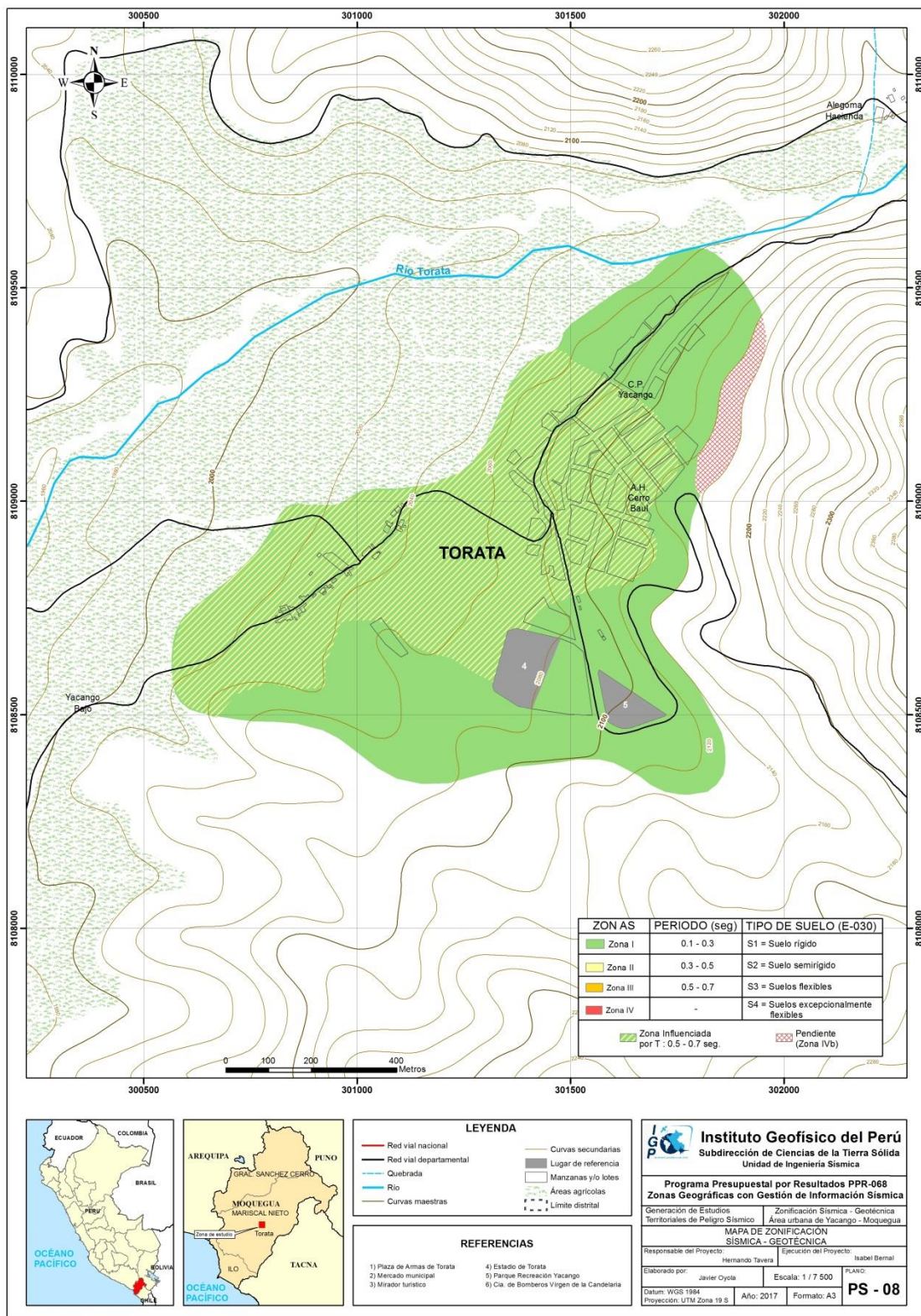


Figura 26 ...Continuación./ Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Yacango.

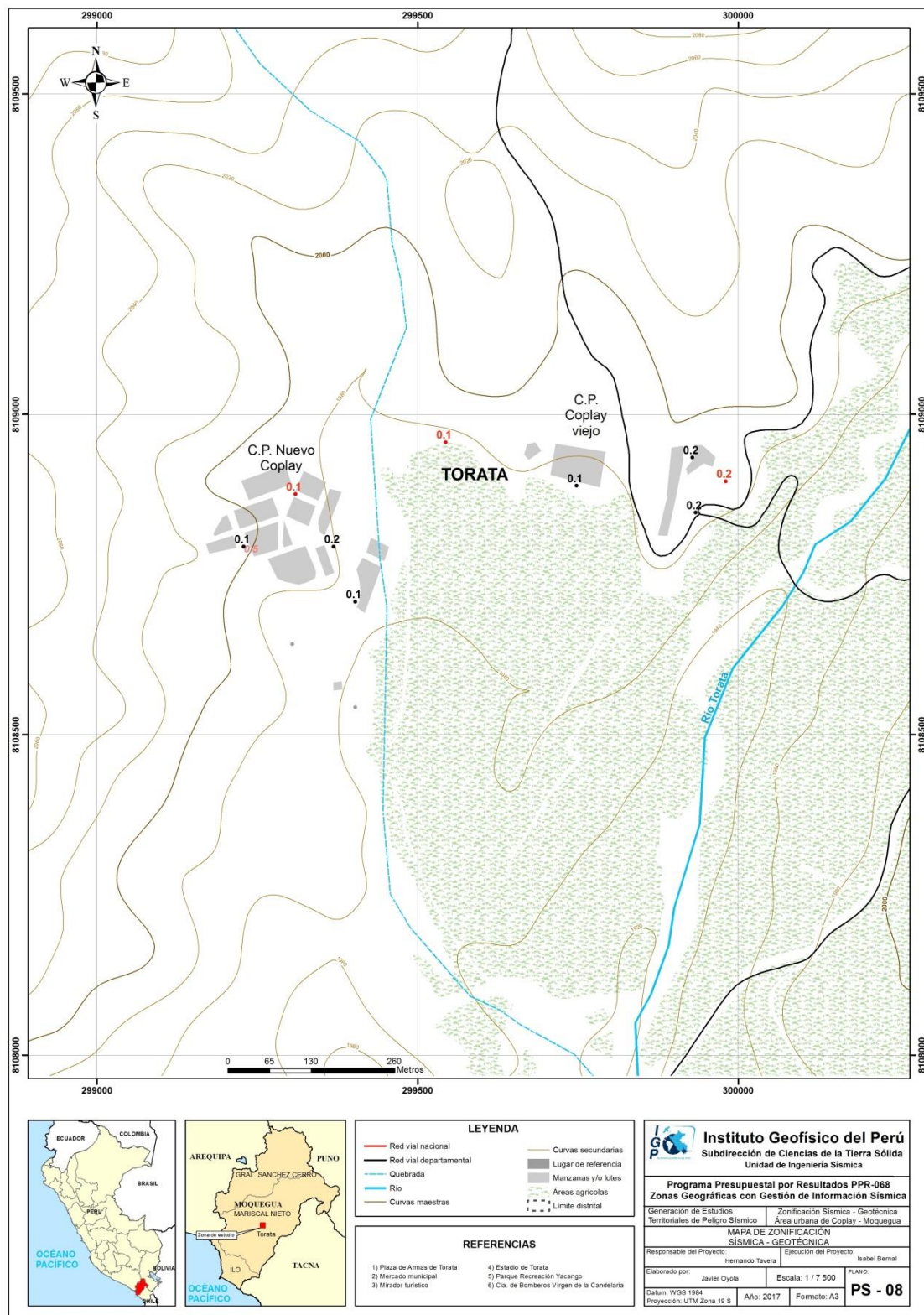


Figura 26: ...Continuación./ Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Coplay.

CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de Torata - Yacango, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permite definir un pico de frecuencia bien definido, y otro de menor amplitud con tendencia a valores menores de frecuencia. En la zona céntrica de Torata y el sector La Banda predominan frecuencias de entre 2.0 y 9.0 Hz. hacia el sur del Mirador de Turístico se observan valores entre 2.0 y 6.0 Hz. y conforme se tiende hacia el extremo NE estos valores tienden a 4.0 y 5.0 Hz. Por otro lado, en el C.P. Yacango se observan valores de frecuencias predominantes entre 2.0 y 10.0 Hz. Estos valores altos de frecuencias se asocian a depósitos aluviales que domina la zona, a niveles superficiales presentándose regularmente compactados y los valores menores a 2.0 Hz, a la presencia de capas más profundas, aunque en menor proporción se encuentran próximos al sector de La Banda, A.H Jorge Chavez, A.H. 28 de Julio y C.P. Yacango. Las amplificaciones máximas se presentan en algunos puntos del área de estudio.
- De los resultados de MASW, para el área de estudio se definen 2 capas sísmicas y un semiespacio, donde predominan los suelos moderadamente rígidos (V_s 210 a 324 m/s), con espesores de 4 a 11 metros se expande en toda el área de estudio, siendo los de mayor espesor en el sector la Banda y en el C.P. Coplay. Esta capa suprayace a suelos considerados como rígidos a muy rígidos en profundidad. Por otro lado, perfiles de suelo que considerada roca blanda a roca moderada dura en profundidad son encontrados en el C.P. Nuevo Coplay ($V_s > 689$ m/s).
- Los valores de velocidad promedio calculados para los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}), clasifican el área de estudio en dos tipos de suelo; con rangos de velocidad V_{s30} entre 377 a 514 m/s sugieren suelos rígidos emplazados mayormente en todo el área de estudio y suelos muy rígidos (V_s 983 m/s) distribuidos en el C.P. Nuevo Coplay.

- Los suelos de Torata responden a periodos de 0.1 y 0.2 segundos, los cuales se distribuyen de manera casi uniforme sobre la zona céntrica de Torata, hacia el extremo NE de la zona céntrica se concentran periodos de 0.2 segundos (dirección NE de la Compañía de Bomberos Virgen de la Candelaria). Asimismo, en dirección Oeste al Mercado Municipal (puntos próximos a la carretera) y en el A.H. 28 de Julio, los periodos tienden a valores que fluctúan entre 0.3 y 0.4 segundos, en la margen derecha de la Plaza de Armas de Torata se observa la influencia de un segundo período que fluctúa entre 0.5 a 0.6 segundos. Por otro lado, en el C.P. Yacango se concentran periodos de entre 0.1 a 0.3 segundos con la influencia de un segundo período que fluctúan entre 0.5 a 0.8 segundos; asimismo, en la proximidad a C.P. Yacango De modo general, las máximas amplificaciones se presentan de manera esporádica en el área urbana de Torata - Yacango. Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de Torata - Yacango están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, asumiendo velocidades de velocidades de 210 m/s y 310 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 5 y 16 metros. Para el C.P. Yacango y Coplay se asumen velocidades de 251 m/s y 324 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.3 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 6 y 24 metros, asentada sobre un estrato más rígidos de entre 30 y 65 metros.

- Según los resultados de Tomografía eléctrica, en la zona de Torata -Yacango predominan materiales muy bajo resistivos a bajo resistivos a niveles superficiales asociados a materiales porosos y permeables influenciado por el riego de los terrenos de cultivo y la influencia del río Torata y en menor porcentaje se presentan valores medianamente resistivo a resistivos presentes tanto en superficie como en profundidad. Los estudios geofísicos indican que en el área urbana de Torata está asentada sobre depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas y flujos de barros semiconsolidado predominan los medios semipermeables que alcanzan valores de resistividad de 500 $\Omega.m$, en el C.P. Yacango existen dos horizontes geoeléctricos siendo el superficial un medio impermeable y no saturado asociado materiales volcánicos de la formación Huaracane y depósitos aluviales y en el C.P. Coplay predominan en superficie medios saturados y permeables. Al Sur de la plaza en la línea 3 ubicada próxima al mirador presenta en profundidad un medio saturado, con valores de resistividad < 100 $\Omega.m$, que al existir mayor pendiente hace que el agua se deposite en las partes más bajas. Existe una transición de un

medio saturado y permeable con un medio impermeable que se observa claramente en la Línea LE08-TO.

- Los resultados obtenidos para el área urbana de Torata - Yacango han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de dos (2) zona sísmica correspondientes a suelos Tipo S1 y S4, que comprenden a suelos rígidos y excepcionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala-Carcedo, F.J., Olcina J. y Vilaplana J.M. (2004). Impacto social de los riesgos naturales en España en el período 1990-2000 (II). Fundación Mapfre y Fundación Mapfre Estudios.
- Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). (2016). Caracterización de Moquegua. Lima - Perú. BCRP. Recuperado de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Arequipa/moquegua-caracterizacion.pdf>
- Barazangi, M & Isacks, B (1976) Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology* 4 p.686-692
- 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
- 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
- Beláustegui, S., (1999) - Pendientes del Terreno y Fundamentos del Caudal Máximo No Erosivo. Hoja técnica N° 07. Buenos Aires – Argentina., 4 p.
- Bellido E. (1979) Cuadrángulo de Moquegua (35u), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, "Nonlinear Soil Amplification: It's Corroboration in Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2006) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Crespo Villalaz Carlos (2004); *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, 5ta edición.
- D. M., (1991) – A simple definition of a landslide. *IAEG Bull.*, 43, 27-29.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.
- 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, N° 3, 438-445
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(1): 74-77.
- 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, 2308-2327

Hutchinson, J. N., (1968) - Mass Movement. In the Enciclopedia of Geomorphology (Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York), 668-696p.

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.

INDECI (2006) Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo.

INEI. (2007). Censo Nacional de Poblacion y Vivienda. Lima- Perú. INEI. Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados/>

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.

Morisawa M., 1968: Streams, Their Dynamics and Morphology.

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.

Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.

Osorio, Ramirez. Santiago. ESTABILIDAD DE TALUDES. SLOPE STABILITY. Clase de Especialización en Geotecnia. Universidad de Caldas.

Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves Geophysics 64 800-8.

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. (2014). MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, 32(6):656-662.

Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>

Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F. (2004). Highresolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), J. Appl. Geophys., 5 56, 17–29, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.004

Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John

- Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Roma, V. (2010). Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16-28.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, (2006). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83, 173-193
- SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12: (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Socco, L.V., Boiero, D., Comina, C., Foti, S., y Wis_en, R. (2008). Seismic characterization of an Alpine site. *Near Surface Geophysics*, 6(4):255-267.
- T. & Isacks, B. L. (1992) - Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate, *Journal of Geophysical Research*, 97, 17503p.
- Varnes, D.J., (1958) - Landslide types and processes in Eckel E.B., ed., *Landslides and Engineering Practice*, Highway Research Board Special Report Publication 544, Washington, D.C., 20 – 47p.
- www.senamhi.gob.pe/. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ /Estación meteorológica de Yacango.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64, 691–700.

ANEXOS

ANEXO

La información que se detalla está contenida en el CD que se adjunta al presente Informe Técnico. “Zonificación Sísmica – Geotécnica de las áreas urbanas de Torata-Yacango”.

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 Tematicos