



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



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

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



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE CASTILLA

Lima - Perú

2019

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipion

Autores

Isabel Bernal

Caracterización Sísmica y Geofísica de la Ciudad de Castilla

Juan Carlos Gómez

Caracterización Geológica y Geotécnica de la Ciudad de Castilla

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Marco Mattos

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

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Marisol Enríquez

Este Informe ha sido producido por:

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

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

Distrito de Castilla – Provincia de Piura – Región Piura

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 Piura (distrito de Piura), Castilla (distrito de Castilla), Sullana (distrito de Sullana), Paita (distrito de Paita), Chulucanas (distrito de Chulucanas), Catacaos (distrito de Catacaos), Sechura y Parachique (distrito de Sechura). Estos estudios permiten conocer el Comportamiento Dinámico de los Suelos a partir de la recolección de datos de campo utilizando técnicas geofísicas, sísmicas, geológicas y geotécnicas.

El análisis e interpretación de los datos obtenidos permiten tener como resultado la “Zonificación Sísmica – Geotécnica de los suelos de la ciudad de Castilla”, información primaria que debe ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Este documento técnico debe constituirse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

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

INDICE

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 de la ciudad de Castilla

PARTE 3: Caracterización sísmica y geofísica de la ciudad de Castilla

ANEXOS: Documentos y Anexos se adjunta en un DVD.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “**Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres**”, el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2018 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollo la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las áreas urbanas de las siguientes ciudades (Figura 1):

- **Castilla**, distrito de Castilla, provincia Castilla, región de Piura.
- **Piura**, distrito de Piura, provincia y región de Piura.
- **Sullana**, distrito de Sullana, provincia de Sullana, región de Piura.
- **Paita**, distrito de Paita, provincia de Paita, región de Piura.
- **Chulucanas**, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón, región de Piura.
- **Catacaos**, distrito de Catacaos, provincia Catacaos, región de Piura.
- **Sechura y Parachique**, distrito de Sechura provincia de Sechura, región de Piura.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región norte 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 Piura (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.

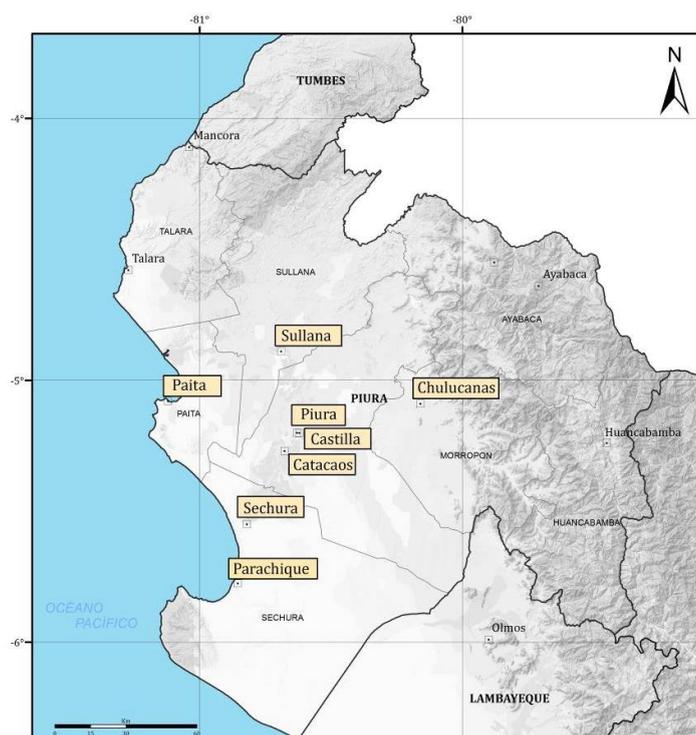


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades intervenidas durante el año 2018: Zonificación Sísmica– Geotécnica de suelos.

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

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

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

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

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

1.1. Objetivo

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



Figura 3: Plaza principal de la ciudad de Castilla.

1.2. Historia

La historia de Castilla se remonta a los orígenes de los Tallanes, etnia piurana que surgió aproximadamente desde los años 500 o 600 d.C., y que estuvo conformada por un extenso grupo de curacazgos o señoríos establecidos a lo largo de los valles del Río Piura y Tumbes.

El gobierno de los Tallanes se caracterizó por el dominio fuerte y autoritario de sus caciques o jefes étnicos, la jerarquización o división de clases fue notablemente marcada y se distinguieron, además de la nobleza y el pueblo, la clase sacerdotal. Respecto a la sucesión de la jefatura o gobierno, entre los tallanes fue posible el ascenso de mujeres cacicas o "capullanas" al poder. Aunque se conoce por documentos de la época que estas mujeres-gobernantes asumieron el control de sus cacicazgos de manera similar a los hombres, se cree que en tiempo pre-hispánicos accedieron al gobierno sólo bajo circunstancias particulares, como la ausencia de un posible heredero varón al cacicazgo.

Aproximadamente, desde los años 1350 y 1400 d.C. la dinámica la sociedad de los tallanes se vio sometida por el altamente militarizado Reino Chimú. Aunque poderoso y bien organizado, el gobierno ejercido por este reino no pretendió ni produjo mayores cambios en la estructura político-administrativa de los tallanes. El principal objetivo de los chimús, fue el obtener una mayor cantidad de tributos y ofrendas que permitieran continuar con el boato, bienestar y poderío de su reino.

El 30 de marzo de 1861, se decreta la Ley de creación del distrito de Castilla, como parte de la Provincia de Piura. No obstante, en agosto de 1908 Castilla retorna a formar parte de Piura, mediante la Ley 723. Finalmente, el 13 de agosto de 1920, el Presidente Augusto B. Leguía, promulga la Ley Regional 208, por la cual se reivindican políticamente y devuelve la categoría de distrito a Castilla.

El distrito de Castilla, geográficamente se encuentra ubicado en el norte del Perú, es uno de los 9 distritos que constituye la provincia de Piura. Está ubicada en el centro oeste del departamento en el valle del río Piura, a una altitud promedio de 32 m.s.n.m., limita por el norte y noreste con el distrito de Tambogrande, por el este y sureste con la provincia de Morropón, por el sur con el distrito de Catacaos y por el oeste con el distrito de Piura. Dentro de la división eclesiástica de la Iglesia Católica del Perú, pertenece a la Arquidiócesis de Piura (Figura 3).

La zona de estudio, de acuerdo a la información del INEI, tiene una superficie territorial de 662.23 km², que representa el 10.66% de la superficie total de la provincia de Castilla y una densidad poblacional de 186.7 Habitantes/km².

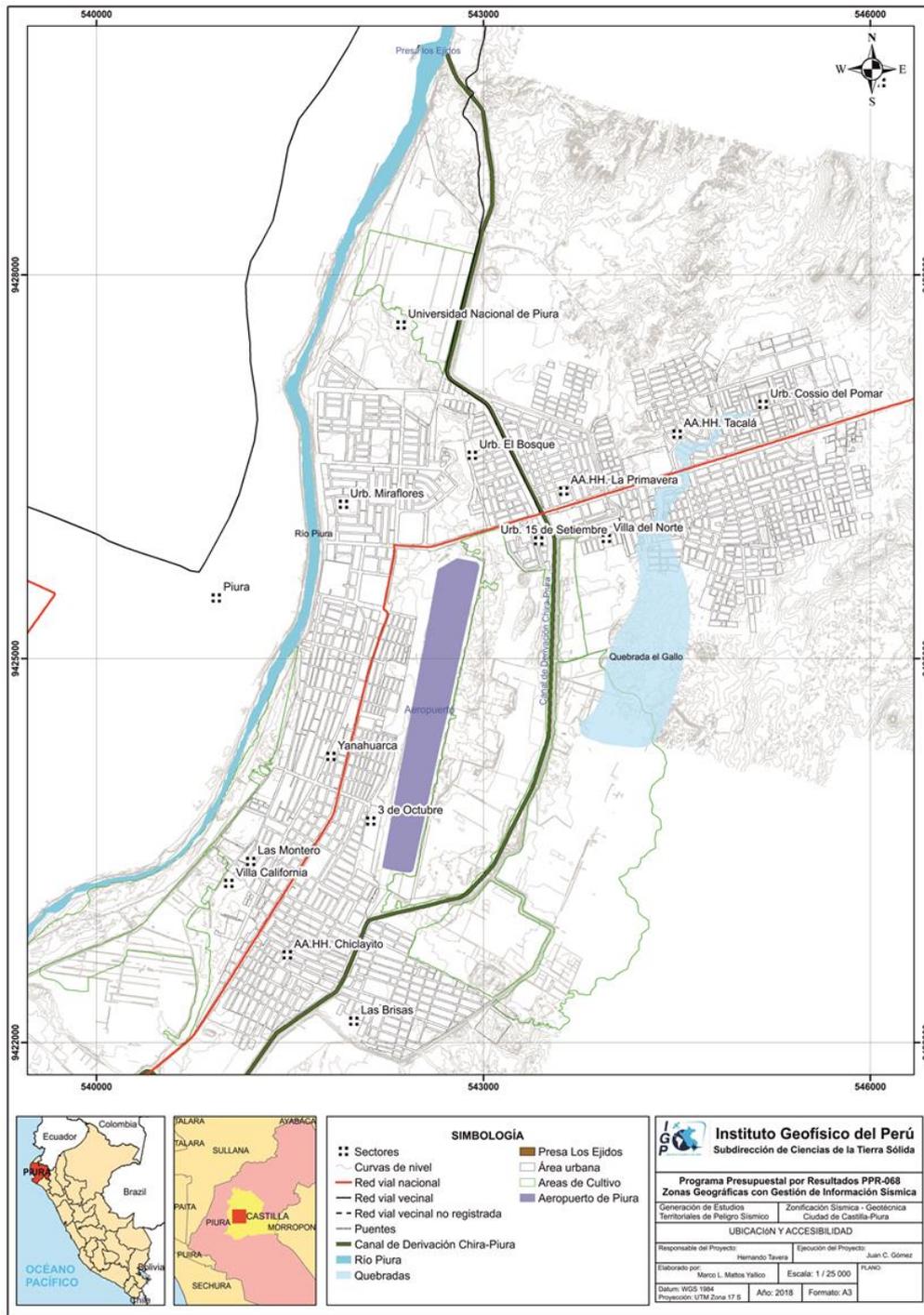


Figura 3: Mapa de ubicación geográfica de la ciudad de Castilla.

1.3. Accesibilidad y Clima

El acceso, desde Lima, hacia la ciudad de Castilla se recorre 987 km por la carretera Panamericana Norte, totalmente asfaltada y en buenas condiciones.

Para determinar las condiciones climáticas de la ciudad de Castilla, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Información obtenida de la estación meteorológica San Miguel - 000247, ubicada en el distrito de Catacaos (Figura 4), al sur – oeste del distrito de Castilla, en las coordenadas geográficas: Latitud $5^{\circ}14' 46.33''$, Longitud $80^{\circ} 41' 3.69''$ y en la cota de 22 m.s.n.m. De acuerdo a los datos obtenidos para el periodo 2016-2017, en la ciudad de Castilla se presenta un clima templado durante todo el año y entre los meses de abril a noviembre, no es usual las precipitaciones pluviales, pero se tiene lluvias entre los meses de diciembre a marzo.

Durante el fenómeno del Niño de 2017, las precipitaciones pluviales acumuladas fueron de 503 mm y las temperaturas máximas promedio de 35.8°C a 36.2°C y mínimas promedio de 16.9°C a 17.1°C (Tabla 1).

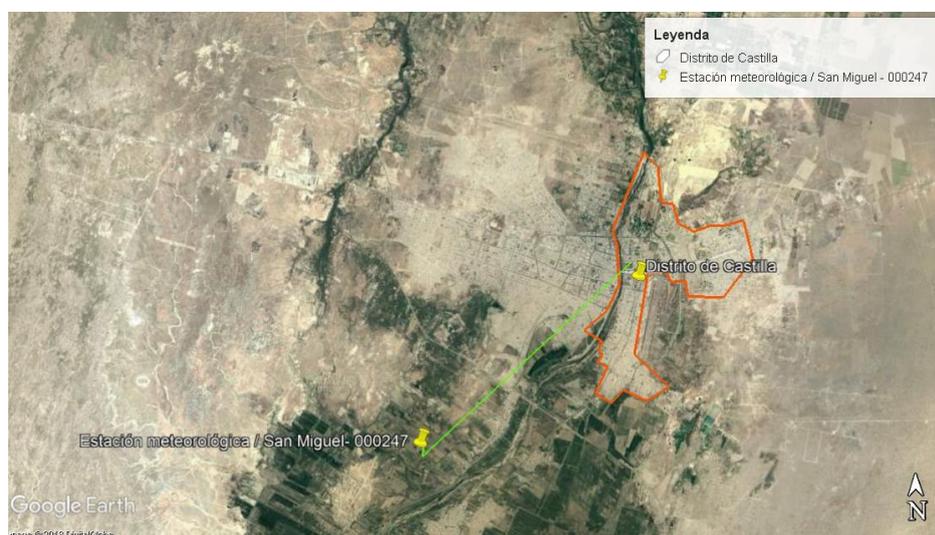


Figura 4: Imagen Satelital donde se muestra la Estación Meteorológica “San Miguel”, ubicada a 9.14 km al sur-este del distrito de Castilla. Fuente: Google earth.

Tabla 1: Registro de temperaturas mínimas/ máximas y precipitaciones pluviales acumuladas durante el período 2016 – 2017.

Variable	Año 2016											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	34.9	36.2	35.8	34	32.2	31.3	30.9	31.3	31.2	31.2	32.3	33.8
T° Min Promedio (°C)	22.8	24.0	23.8	22.0	19.4	17.8	17.1	17.9	17.7	17.67	16.36	19.2
Precipitación (mm)	0.6	28	50.7	5.6	0	0	0	0	0	0	0	1.1
Variable	Año 2017											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° Max Promedio (°C)	35.4	34.8	33.8	NP	NP	NP	NP	27.7	29.2	NP	NP	NP
T° Min Promedio (°C)	22.4	23.5	24.0	NP	NP	NP	NP	16.9	16.7	NP	NP	NP
Precipitación (mm)	84	99.4	503	NP	NP	NP	NP	0	0	NP	NP	NP

1.4. Economía

El distrito de Castilla, presenta tres sectores que son la base de su economía: comercio inmobiliario, construcción y transporte. La población económica activa (PEA) es de 100,252 pobladores que constituye el 39 % de la población total (Tabla 2).

Tabla 2: PEA ocupada por actividad en ciudad de Castilla. Fuente: INEI, 2007.

DEPARTAMENTO, PROVINCIA, ÁREA URBANA Y RURAL, SEXO Y RAMA DE ACTIVIDAD ECONOMICA	TOTAL	EMPLEADO	OBRERO	TRABAJAD OR INDEPENDI ENTE	EMPLEADO R O PATRONO	TRABAJAD OR FAMILIAR NO REMUNERA DO	TRABAJAD OR DEL HOGAR
Distrito CASTILLA	46718	16730	6461	16758	954	1262	1898
Agríc., ganadería, caza y silvicultura	2993	111	1275	1112	153	342	
Pesca	269	76	157	33	3		
Explotación de minas y canteras	145	104	34	4	3		
Industrias manufactureras	3712	416	1353	1756	125	62	
Suministro de electricidad, gas y agua	253	98	120	33		2	
Construcción	3054	234	1845	882	71	22	
Comerc., rep. veh. autom.,motoc. efec	10770	2875	335	6645	304	611	
Venta, mant.y rep. veh.autom.y moto	1068	173	200	620	57	18	
Comercio al por mayor	714	355	57	235	27	40	
Comercio al por menor	8988	2347	78	5790	220	553	
Hoteles y restaurantes	2304	957	108	1060	96	83	
Trans., almac. y comunicaciones	5167	1269	456	3327	76	39	
Intermediación financiera	426	409	4	9	3	1	
Activid.inmobil., empres. y de alquiler	3475	2613	255	531	64	12	
Admin.pub. y defensa; p. segur.soc.afi	2054	1856	198				
Enseñanza	3590	3265	8	287	14	16	
Servicios sociales y de salud	1402	1237	20	137	6	2	
Otras activ. serv.comun.soc y persona	1590	755	104	695	21	15	
Hogares privados con servicio domésti	1898						1898
Organiz. y organos extraterritoriales	1	1					
Actividad economica no especificada	960	454	189	247	15	55	
Desocupado	2655						

En la Tabla 2 se observa que la PEA de Castilla, tiene una mayor proporción en vendedores y comerciantes con un 48% siendo el segundo lugar para los empleados sector inmobiliario y construcción (14%) y en tercera ubicación, los empleados del sector transporte (11%).

1.5. Estudios previos

Para la ciudad de Castilla, 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:

- INDECI (2017). Estado situacional de emergencia de lluvias intensas en el distrito de Castilla. El estudio señala que las lluvias ocurridas el día 19 de marzo del 2017 ha producido el colapso de viviendas, así como también instituciones educativas; además las vías de comunicación fueron destruidas. En cuanto a la infraestructura agrícola, las defensas ribereñas fueron afectadas.
- En el 2011, INDECI y la OEA presentan el “Plan de Gestión del Riesgo de desastres de la Ciudad de Piura”, realizado por el programa de reducción de desastres para el desarrollo sostenible en las ciudades de Piura (Perú) y Machala (Ecuador). Este estudio concluyo que las zonas que presentan mayor nivel de vulnerabilidad se concentran en el borde de la Quebrada del Gallo y del Dren 1308; además, de la zona de cangrejeras en el A.H. San Valentín. Desde el punto de vista de las edificaciones, la vulnerabilidad alta se concentra en el área central de Castilla, en el A.H. Talarita, Campo Polo, Las Montero, Independencia, El Indio, parte de la Urb. Miraflores y la mayoría de los asentamientos humanos localizados al este de la ciudad. En el resto de la ciudad, los niveles de vulnerabilidad son medios y bajos.
- En el 2009, INDECI y la OEA dentro del marco Ciudades Sostenibles realizó el “Estudio Mapa de Peligros de la Ciudad de Piura”. En este trabajo se ha ejecutado el método sísmico con la finalidad de identificar las características físicas de los suelos de Piura y Castilla. Este trabajo concluye que los suelos en promedio alcanzan hasta una profundidad estimada de 25 metros, considera un Suelo Flexible Tipo S3 (según Norme E030-2003), con valores para la velocidad

de onda de corte estimadas no mayores a 500 m/s y periodos de vibración natural del suelo mayores a 0.90 segundos. Asimismo, emplearon la geofísica para identificar el nivel freático presenta 3 y 5 metros de profundidad en condiciones normales, pero durante la ocurrencia de lluvias extraordinarias (presencia del Fenómeno del Niño) puede llegar a aflorar en superficie. Los suelos que predominan en el área de estudio son arenas mal gradadas y arcillas, este último se distribuye principalmente en el A.H. El Indio.

- En el 2002, INDECI realizó el “Plan de usos del suelo y propuesta de medidas de mitigación de los efectos producidos por los fenómenos naturales en la ciudad de Castilla”. Este estudio tuvo por finalidad evaluar los peligros o amenazas naturales a las que se encuentra expuesta la ciudad, a fin de diseñar una propuesta de mitigación.
- El Fenómeno del Niño 1997-1998, de acuerdo a las observaciones de INDECI, se empieza a gestar a fines de 1996 y a comienzos de 1997, se hace más notorio la presencia de variaciones sustanciales en el clima de todo el país, afectando la región Piura y al distrito de Castilla. Al 30 de junio de 1998, el departamento más afectado fue Piura y por lo tanto todos sus distritos incluyendo el distrito de Castilla, presento 120.637 damnificados, y 10255 viviendas destruidas.
- El Fenómeno del Niño de 1982 y junio de 1983, en el distrito de Castilla, fue uno de los más severos. Las inundaciones causaron la destrucción de viviendas, carreteras, puentes y cuantiosas pérdidas en la agricultura con graves consecuencias económicas, ambientales y sanitarias.
- Mapa de Estimación de zonas inundables (CONIDA, 2017). El estudio delimito las zonas inundables durante los meses de marzo-abril del 2017. A lo largo del cauce del río Piura, fueron afectados los distritos de Piura y Castilla. Se delimitaron 7 zonas inundables que comprenden: Peligro Alto: Catacaos, Cumbibirá, Simbilá, La Legua, Susana Higuacchi y Piura Cercado. Peligro Muy Alto: Urb. Quinta Julia.
- Plan de usos del suelo y propuesta de medidas de mitigación de los efectos producidos por los fenómenos naturales de la ciudad de Castilla (INDECI). En este informe se describen los estudios sobre mecánica de suelos y geotecnia

realizados por la Universidad de Piura en la ciudad de Castilla y alrededores, determinándose siete sectores: Sector 1: Al Sur de la ciudad comprende los AA.HH. El indio y Las Brisas, entre el canal de derivación Chira-Piura y el Dren 1308 teniendo suelos arcillas (SC). Sector 2: Al Sureste de la ciudad, entre las Av. Progreso, Jorge Chávez y el canal de derivación Chira-Piura, comprende los AA.HH. Chiclayito, Calixto Balarezo, Juan Pablo II, González Prada, campo zonal donde se identificaron suelos arcillas arenosas (CL). Sector 3: Al Oeste de la ciudad, entre las Av. Progreso, Ramón Castilla y las defensas del río Piura, comprende los AA.HH. Las Montero, Miguel Cortés, Independencia, 28 de Julio, parte de Campo Polo y del área central del distrito donde los suelos que representan son arenas con limos (SM-SP) y arcillas de grano medio (SM). Sector 4: Se ubica en el área central de la ciudad, entre las Av. Jorge Chávez, Luis Montero, Progreso y Guardia Civil. Comprende el A.H. central del distrito donde los suelos identificados son arenas con limos (SM-SP). Sector 5: Al Noroeste de la ciudad, entre las Av. Ramón Castilla, Luis Montero, canal de derivación Chira-Piura, el Malecón María Auxiliadora y los límites del sector VI., comprende la Urb. Miraflores y parte del área central del distrito presentan suelos arcillosos de grano medio (SP). Sector 6: Al Noreste del área central de la ciudad de Castilla, entre la Panamericana Antigua y los límites de los sectores V y VI. Comprende, 15 septiembre, Nuevo Horizonte, y los AA.HH. María Goretti, Víctor Raúl, Primavera, Los Pinos, Villa del Norte, Señor de los Milagros, San Valentín, Miguel Grau, Nuevo Castilla I y II etapa, Corazón de Jesús, Los Almendros, Táchala, Las Mercedes, Los Médanos, Cossío del Pomar, Valle de Esperanza y ciudad el Niño, aquí los suelos identificados son arenas con limos (SM-SP). Sector 7: Al Este de la ciudad, comprende las zonas aledañas a la carretera a Chulucanas donde los tipos de suelos identificados son arcillas de grano medio, (SP).

2. CONDICIONES LOCALES DE SITIO

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

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de Zonificación Sísmica - geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS), teniendo en cuenta que la intensidad del sacudimiento sísmico varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a, b; Bard y Sesame, 2004; Bernal, 2002), ver Figura 5.



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

La metodología a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, considera estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica a partir de observaciones de campo y la toma de 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 la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades físicas, tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, o alternativamente, para suelos granulares, considera el promedio ponderado de los N_{60} obtenidos mediante un ensayo de penetración estándar (SPT), o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada S_u para suelos cohesivos. Se estable 5 perfiles (Tabla 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
S₀	> 1500	Roca dura
S₁	500 a 1500	Roca o suelo muy rígido
S₂	180 a 500	Suelo medianamente rígido
S₃	< 180	Suelo blando
S₄	Clasificación basada en el EMS	Condiciones Excepcionales

- **Perfil Tipo S₃: Suelos Blandos**, corresponden suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte V_S menor o igual a 180 m/s.
- **Perfil Tipo S₄: Condiciones Excepcionales**, corresponde a suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio. Será determinado con un Estudio de Mecánica de Suelos (EMS).

La velocidad de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros (V_{S30}) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{Si}}\right)}$$

Dónde:

d_i = espesor de cada uno de los estratos n.

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

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

ZONA I: Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s, con velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 500 y 1500 m/s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana.

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

ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) fluctúa alrededor de los 180 m/s.

ZONA IV: Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E.030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

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

-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 la ciudad de Castilla, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

-En la ciudad de Castilla se han identificado 5 unidades geomorfológicas: Lecho fluvial, Llanura de Inundación, cuenca ciega y Terraza aluvial (sobre la cual se asienta la mayor parte de las zonas urbanas del distrito de Castilla) y Lomas (sobre esta unidad se asientan las zonas de expansión urbana, entre ellas el AA HH, Madre teresa de Calcuta y Las Pampas de Castilla, ubicadas al nor-este del distrito de Castilla).

-El 80% de las zonas urbanas del distrito de Castilla, se asientan entre los 27 y 34 metros sobre el nivel del mar, con pendientes menores a 10° grados, lo que nos indica que no están expuestas a movimientos en masa (deslizamientos de tierra, entre otros). Sin embargo, en la urbanización Cossío del Pomar podría estar expuesto a flujos de lodo en periodos de precipitación por la quebrada el Gallo.

-Los eventos geodinámicos delimitados en la ciudad de Castilla corresponden a inundaciones pluviales y fluviales (río Piura) que azotan todo el distrito, principalmente en épocas de precipitaciones extraordinarias y junto a ellos flujos de lodo por la activación de la quebrada el Gallo.

-Las mayores amplificaciones relativas del suelo son mayores a tres veces en el sector Nuevo Amanecer, el A.H. Primavera II etapa y al norte de la Universidad Nacional de Piura, esto evidencia la existencia de suelos más flexibles en esta área que el resto del área estudiada, sin embargo, al oeste por el A. H. Valle La Esperanza los suelos presentan amplificaciones mínimas menores a 2 veces. Estas zonas serán más afectadas ante la ocurrencia de sismos.

-En el A.H. Primavera II etapa, Valle La Esperanza y en las inmediaciones del centro médico Castilla Essalud, predominan medios saturados superficiales y el predominio de suelos constituidos por arenas incrementa la probabilidad de experimentar el fenómeno licuación ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

-La Urb. Miraflores y el A.H. Miraflores, presentan suelos saturados y se debe a la influencia del río Piura y el canal de derivación Chira – Piura. En el frontis del

colegio Fe y Alegría, presentan suelos compactos sin saturación en los primeros 10 metros por debajo de esta capa se presenta saturación.

-Los resultados obtenidos para el área urbana de Castilla a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S2, S3 y S4 (Figura 6).

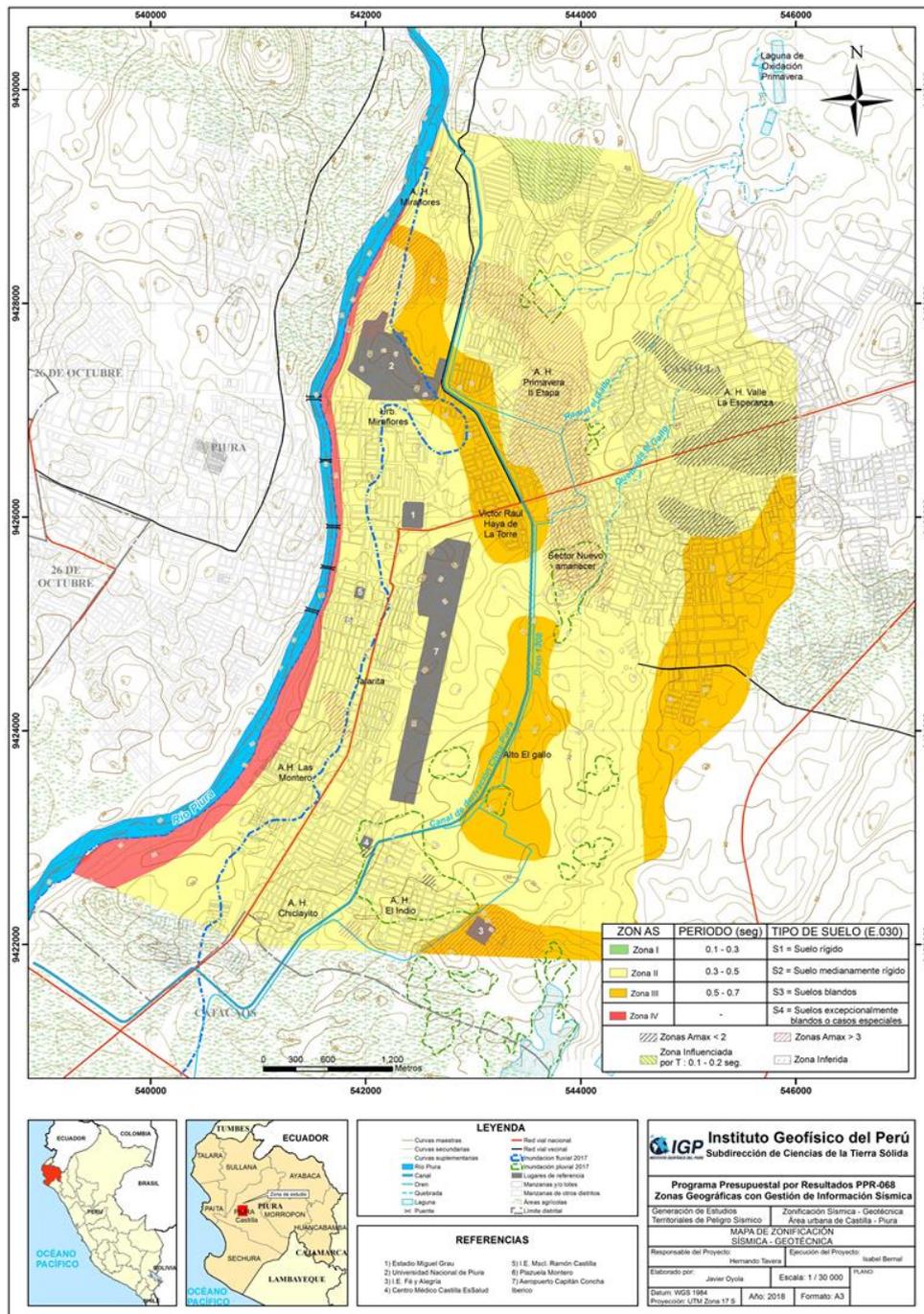


Figura 6: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Castilla.

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

CONTENIDO

1. METODOLOGÍA

1.1. Levantamiento Fotogramétrico

2. GEOMORFOLOGIA

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. Loma

2.3.2. Lecho fluvial

2.3.3. Llanura de inundación

2.3.4. Terraza Fluvial

2.3.5. Terraza Aluvial

2.3.6. Cuencas ciegas o depresiones

3. GEOLOGÍA

3.1. Geología regional

3.1.1. Geología histórica

3.2. Geología local

3.2.1. Formación Miramar (Nmp-m)

3.2.2. Formación Zapallal (Ts-za)

3.2.3. Depósitos Cuaternarios

4. GEODINÁMICA

4.1. Procesos de geodinámica interna

4.2. Procesos de geodinámica externa

4.2.1. Inundación

5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

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

5.1.1. Descripción de calicatas

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

- 5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D 1452)
- 5.4. Ensayo de penetración dinámica ligera (Norma DIN4094)
 - 5.4.1. Correlación entre el “N” DPL y el “N” SPT (ASTM D1586)
 - 5.4.2. Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del “N” SPT
- 5.5. Clasificación SUCS para Suelos
- 5.6. Ensayo 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

El estudio de cartografiado geológico, geomorfológico, geodinámico y de exploraciones geotécnicas realizadas en la ciudad de Castilla, se desarrollaron en 3 fases:

- ✓ **Gabinete I:** Recopilación e interpretación de imágenes satelitales de la zona de Castilla obtenidas del servidor Perú SAT-1 (año 2017), con la finalidad de reconocer geformas y la ubicación del área de estudio.

Revisión de información geológica regional de la zona del Boletín A N° 54 a escala 1:100,000 del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1994).

Elaboración de mapas temáticos preliminares como: Ubicación, geología y geomorfología para los trabajos de campo a escala gráfica 1:25000.

- ✓ **Campo I:** Se realizó el reconocimiento y delimitación de unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:25,000. Así mismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos relacionados a inundaciones fluviales (desborde del río Piura sobre la margen izquierda) que afectan a las urbanizaciones Las Montero y Villa California, entre otras; así como pluviales (acumulación de las aguas de escorrentía en zonas de depresión) en los AA.HH. Tacala y Urb. Cosio del Pomar, etc.
- ✓ **Campo II:** Ejecución de ensayos geotécnicos de Calicatas, DPL, posteos y ensayos de densidad natural in situ mediante el método del cono de arena. Primera etapa de campo.

En el área de estudio se realizaron un total de 9 calicatas para la extracción de las muestras de suelos que se enviaron a laboratorio para el análisis de sus propiedades físico-mecánicas y su clasificación SUCS.

Se realizaron 10 ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL), para el cálculo de los parámetros de resistencia al corte en variedades de arenas (ángulo de fricción y cohesión) y 9 auscultaciones manuales de exploración de suelos (posteos).

- ✓ **Laboratorio:** En esta etapa se realizarán ensayos de mecánica de suelos como humedad natural, límites de Atterberg y granulometría; siendo los ensayos de corte para obtener los parámetros de cohesión y ángulo de fricción de los suelos, para calcular la capacidad portante admisible respectiva.

- ✓ **Gabinete II:** Análisis de los resultados obtenidos de campo y del laboratorio para el cálculo de las capacidades portantes de los suelos y registro de resultados de los ensayos geotécnicos: Densidades, logueo de calicatas, clasificación SUCS, etc.

Digitalización del cartografiado de campo a escala gráfica 1:25000, para obtener los mapas temáticos de geomorfología, geología, geodinámica, ubicación de exploraciones geotécnicas, zonificación de suelos y capacidades portantes.

1.1. Levantamiento Fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico se realizó en la zona urbana del distrito de Castilla, con el propósito de obtener una topografía base indispensable para los trabajos de cartografiado, sobre un área de 17 has, que abarco las Urb. Cossio del Pomar, Los Almendros y La Primavera; mientras que, los demás sectores (1422 ha) fueron cubiertos con la base topográfica entregada por la municipalidad del distrito de Castilla. Este trabajo se realizó con el propósito de obtener la representación digital del relieve que conforman las unidades: lecho fluvial, terraza aluvial, colina, llanura de inundación, cuencas ciegas (depresiones).

Para la ejecución del levantamiento, se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (VANT), servicio que fue contratado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a una consultora particular.

Este levantamiento fotogramétrico consistió en:

Establecimiento de puntos de control geodésicos GNSS base y puntos de premarcados con el sistema GNSS-RTK para la georeferenciación y ajuste de vuelo, configuración y planificación de vuelo en campo y procesamiento de datos en gabinete con el software Postflight Terra 3D. El resultado es el modelo digital del relieve y fotos aerogramétricas (Ortofoto). A partir de esta información se obtuvo un plano topográfico

a escala 1:25 000 con las curvas de nivel (líneas que unen puntos con igual altitud) equidistante de 0.5 m. En la Figura 1, se muestra el modelo digital obtenido con una resolución de 0.15m.



Figura 1: Ortofoto que muestra ambas márgenes, izquierda y derecha del río Piura, desde la Presa Los Ejidos hasta las Urbanizaciones Las Montero y Villa California.

2. GEOMORFOLOGIA

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 (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 existente en la ciudad de Castilla, en relación a su origen. Previamente, en base al levantamiento topográfico realizado y mediante 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). Ésta información fue verificada y validada durante el trabajo de campo. Asimismo fue útil para delimitar las unidades geomorfológicas del área de estudio (Figuras 2).

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 (Felícisimo, 1994).

Para la elaboración del MDE de la ciudad de Castilla, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel diseñadas anteriormente, obteniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno que cubre un área de 1667 ha aproximadamente (Figura 2).

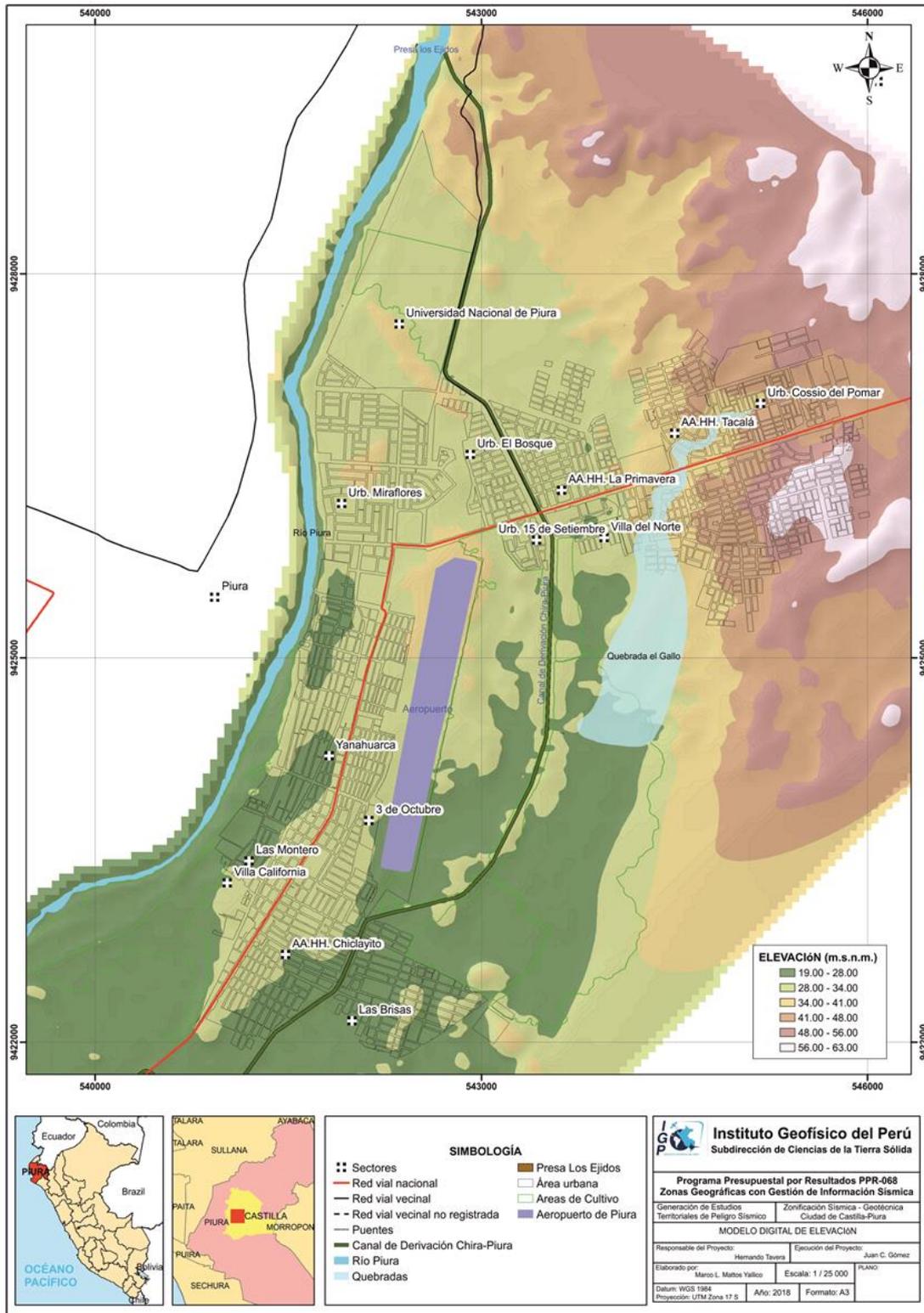


Figura 2: Mapa de modelo digital del terreno de la ciudad de Castilla y alrededores

En base al MDE elaborado de la ciudad de Castilla se ha reconocido que hacia el noroeste (en el AA HH Pampas de Castilla), se encuentran se ubican las mayores elevaciones entre 48 y 63 m.s.n.m.; la parte central urbana se asienta sobre los 27 y los 34 m.s.n.m.; mientras que, hacia el oeste Urb. Miraflores, Luis Montero, las altitudes disminuyen de 34 a 19 m.s.n.m. hasta llegar al nivel del río Piura.

2.2. Pendientes

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

El diseño de mapa de pendientes en el distrito de Castilla, fue desarrollado a partir del MDE elaborado anteriormente, haciendo usos 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 (Figura 3).

2.2.1. Clasificación del grado de pendientes

Para la clasificación de los rangos de pendientes se usó como base el informe: “Estudio de riesgos geológicos del Perú – (Fidel, 2006) (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 distrito de Castilla se encuentra asentada sobre una terraza aluvial que presenta pendientes menores a los 5°; sin embargo, hacia el este del distrito de Castilla se han identificado zonas con pendientes que varían de 5° a 10°.

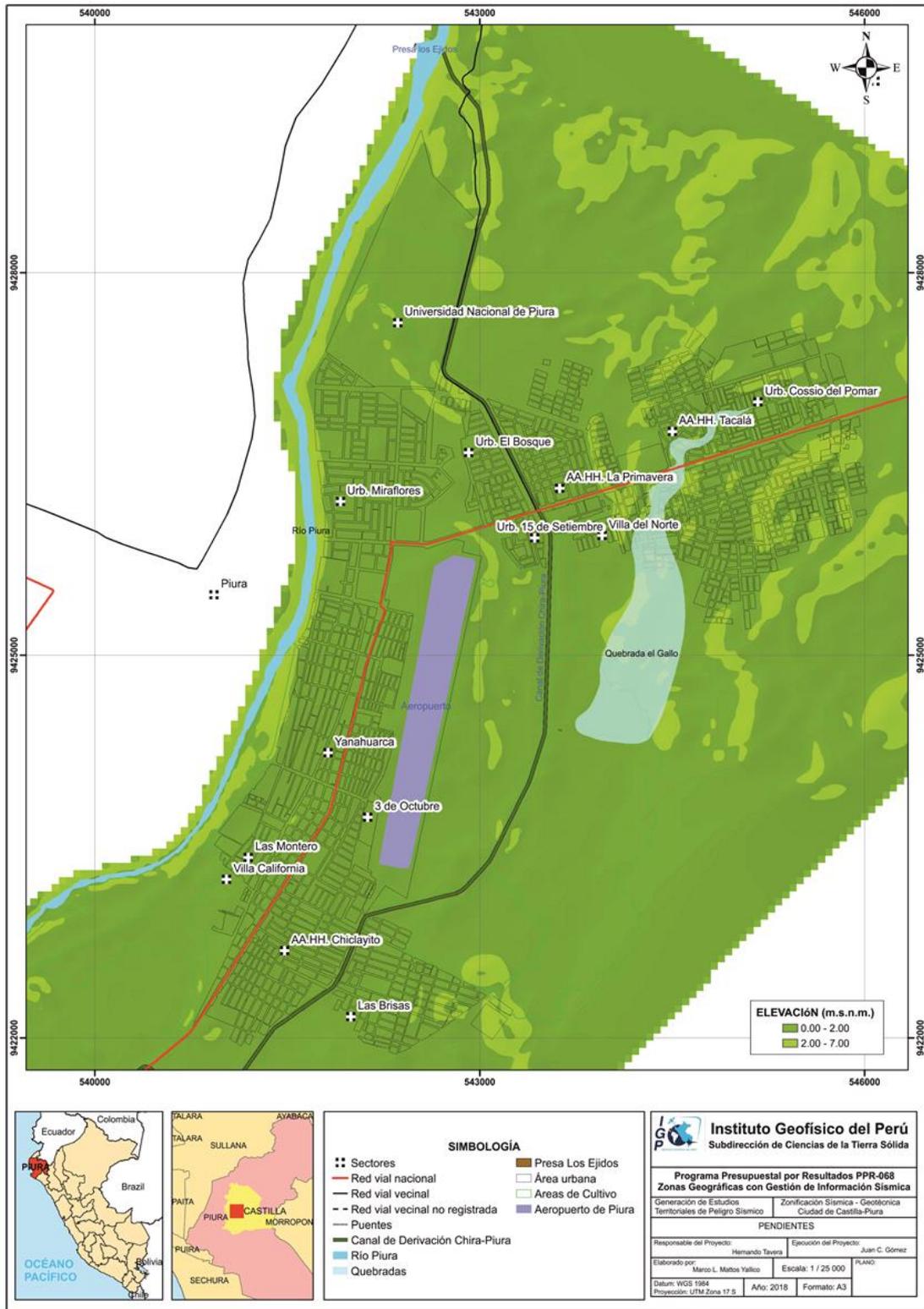


Figura 3: Mapa de pendientes del terreno de la ciudad de Castilla y alrededores

2.3. Unidades geomorfológicas

Estas geoformas están compuestas por materiales que presentan una génesis propia que explica la dinámica de cómo se formaron y las características físicas que conforman un relieve (forma, altura, pendiente, drenaje, textura de vegetación, color, etc., que las diferencian entre sí.

En conclusión, las geoformas son generadas por procesos geodinámicos de tipo endógeno (internos) y exógenos (externos) que dan lugar a relieves positivos y negativos.

Características físicas: Las características físicas de la forma, 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, el viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos tales como: intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación generando diferentes geoformas, clasificándose de acuerdo a su origen en depositacional, 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 distrito de Castilla se cartografiaron seis unidades: lecho fluvial, terraza fluvial, llanura de inundación, terraza aluvial, Loma y depresión (Tabla 2 y Figura 4).

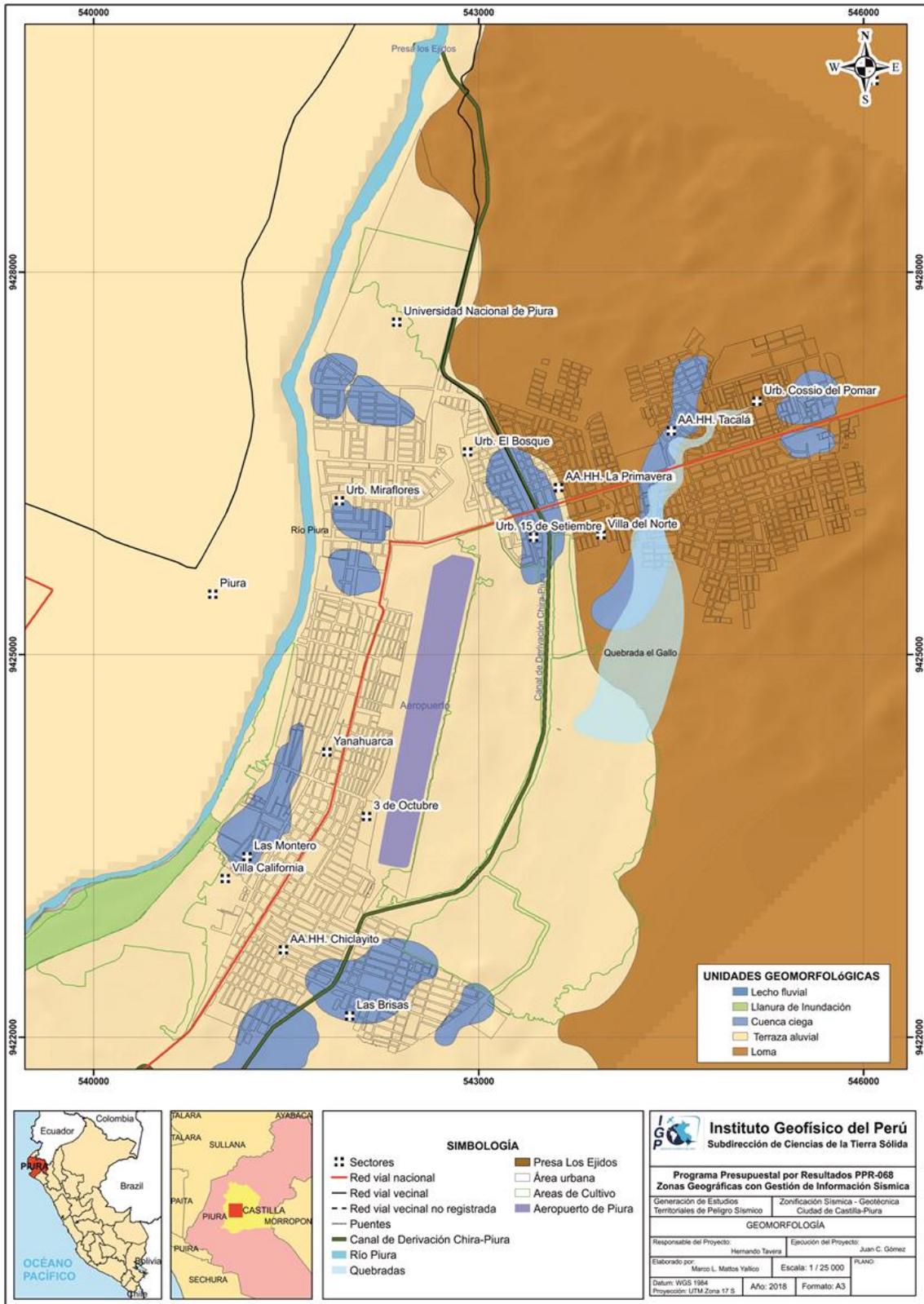


Figura 4: Mapa geomorfológico de la ciudad de Castilla y alrededores

Tabla 2: Unidades Geomorfológicas de la zona de estudio

GEOMORFOLOGÍA PATRÓN				
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		PROCESOS	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	
Pendiente	<5°	Denudacional	Lecho Fluvial	
Altura	0-100			
Geometría	Alargada			
Drenaje	Dendrítico		Loma	
Pendiente	< 35°			
Altura	< 300 m			
Geometría	Alargado	Deposicional	Terraza -Fluvial	
Drenaje	Dentritica			
Pendiente	<5°			
Altura	<100		Llanura de Inundación	
Geometría	Irregular			
Drenaje	Irregular			
Pendiente	<5°		Erosional	Terraza aluvial
Altura	<100			
Geometría	Planar			
Drenaje	Irregular			
Pendiente	<5°			Cuenca ciega (depresión)
Altura	0-100			
Geometría	Irregular			
Drenaje	Irregular			
Pendiente	<5°			
Geometría	Irregular			
Drenaje	Paralelo			

2.3.1. Loma

Esta geoforma presenta una pendiente < 35°, altura < 300 m, una geometría alargada, drenaje dendrítico y origen denudacional. Esta unidad abarca el 40 % del área de estudio. El trabajo de campo ha permitido identificar lomas en los sectores de: AA.HH. Madre Teresa de Calcuta y. Alas Peruanas ubicada al noroeste de la ciudad de Castilla (Figura 5).



Figura 5: Lomas, (líneas naranjas) sobre la cual han construido sus viviendas (Asociación Pampas de Castilla).

2.3.2. Lecho fluvial

En la zona de estudio el lecho fluvial del río Piura recorre 8.6 km aproximadamente entre los sectores de los Ejidos y el Puente Independencia. Este fluye con dirección noreste a suroeste, y su cauce o lecho fluvial topográficamente es irregular con un ancho aproximado de 90 metros a altura del Puente Bolognesi, aunque varía en todos los tramos de su recorrido, presenta islotes y bancos de arena en algunos sectores de Las Palmeras, Las Montero, puente Independencia y pasaje Los Cocos, entre otros (Figura 6).



Figura 6: Lecho fluvial del río Piura, (flecha amarilla) a la altura del puente Independencia.

2.3.3. Llanura de inundación

El agua de escorrentía forma llanuras de inundación, en las que se construyen las ciudades (Morisawa, 1968). En el distrito de Castilla ha sido formada por la acción del río Piura, que erosiona, transporta y deposita grandes volúmenes de sedimentos en la parte media (dónde se asienta el distrito en mención) y baja de la cuenca. Esta unidad está conformada por material aluvial, con una longitud promedio de 200 m, desde la margen izquierda del río Piura hacia el área urbana de Las Palmeras (Figura 7).

2.3.4. Terraza Fluvial

Las terrazas fluviales, se encuentran ubicadas en ambos márgenes del río Piura y están conformados litológicamente por arenas, limos y arcillas. En estas terrazas se puede evidenciar la presencia de pequeñas conchas de origen marino con diámetros

menores a 5 cm, pero incrustadas en los sedimentos antes mencionados (Figuras 8 y 9).



Figura 7: llanura aluvial ubicada en ambos márgenes del río Piura, sector de Las Palmeras (Línea, amarilla).



Figura 8: Terraza fluvial, (línea punteada) delimitada en la margen derecha del río Piura a 300 m. al noroeste del Puente Independencia.



Figura 9: Terraza fluvial ubicada en la margen izquierda del río Piura a 1 km al sur de la Av. Progreso.

2.3.5. Terraza Aluvial

En la ciudad de Castilla, aproximadamente el 70 % de las viviendas se asientan sobre esta geoforma, conformada por limos, arenas, arcillas y gravas (Figura 10).



Figura 10: Terraza aluvial, margen izquierda del río Piura ubicada en el sector 4 de mayo (Av. Jorge Chávez) a 900 m. al suroeste del aeropuerto de capitán FAP Guillermo Concha Ibérico – Castilla.

2.3.6. Cuencas ciegas o depresiones

Estas unidades han sido originadas por la acción hídrica en los suelos, es decir la energía de flujo manifestada en el arranque y desgaste del material que conforma el suelo. En el distrito de Castilla se han identificado cuencas ciegas (depresiones) en: A.H. 28 de Julio, Aeropuerto, Av. Guardia Civil, Av. Irazola, Av. Universitaria, calle Cuzco – Tacna, calle Tacna, Canal de Balarezo, AA.HH. El Indio V Etapa, La Primavera III Etapa, Las Brisas, Los Médanos, Urb. San Bernardo, Teresa de Calcuta, Terminal Terrestre, Valle La Esperanza y Cossio del Poma (Figura 11).



Figura 11: Cuenca ciega o depresión “Urbanización Cossio del Poma”.

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 (proceso de meteorización).

El intemperismo asociado a los procesos de meteorización, es básicamente un proceso químico, el agua actúa como disolvente, la remoción de los elementos más pequeños del cuerpo de roca deja espacios, por ende, el agua sigue penetrando y acelerando el proceso de desintegración. La roca se vuelve porosa, después, se descompone en fragmentos cada vez más pequeños, hasta que, al ser transportada y asociada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas lo que determina también su naturaleza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice (SiO_2) en forma de cuarzo es estable en climas templadas, pero en climas ecuatoriales, las altas temperaturas y las precipitaciones pluviales contribuyen a su descomposición; es por ello que, es importante conocer los tipos de rocas y sus características físicas (Harvey, 1987). Estos procesos de meteorización, modelan tanto la roca como el suelo, dando como resultado las 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, caídas de rocas, entre otros).

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

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

3.1. Geología regional

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Es así que, se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1994) a escala 1: 100,000. En esta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Terciario Superior (66 M.a) hasta el Cuaternario Reciente.

3.1.1. Geología histórica

Según, Palacios, (1994), la historia geológica empieza con la depositación de sedimentos de facies pelíticas en una cuenca, luego estos serían sometidos a una serie de procesos tectónicos, metamórficos e intrusiones. Sobre un relieve labrado en rocas Precámbricas, se desarrolla la cuenca Paleozoica que está constituida por una secuencia lutácea y areniscas cuarcíticas, seguida de una secuencia de depósitos continentales como consecuencia del fallamiento.

Durante el Cretácico las cuencas alcanzan un gran desarrollo (secuencia clástica y carbonatada). A finales del Cretácico y comienzos del Terciario, con el levantamiento de Los Andes, se producen al noroeste movimiento epirogénicos seguidos de erosión en forma cíclica, lo que permite la depositación de conglomerados cubiertos por areniscas, limolitas y argilitas. En el Eoceno Superior, el mar alcanzó su máxima extensión entre Paita y Sullana e ingresando a la cuenca Sechura y en el Oligoceno se produce la transgresión de norte a sur. A fines del Mioceno un nuevo levantamiento reactiva fallas y fracturas ubicadas al noroeste y norte, dando lugar a la regresión del mar y erosión intensa. Nuevamente en el Plioceno los mares ingresan al continente por el norte y sur, depositando una secuencia clástica arcillo-arenosa, proceso que continuó hasta el Plio-Pleistoceno, formándose los tablazos a manera de terrazas.

3.2. Geología local

La geología local, consistió en el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Castilla a escala 1: 25,000 sobre un área de 44.17 km² aproximadamente (Figura 12). En la Tabla 3 se describen estas unidades.

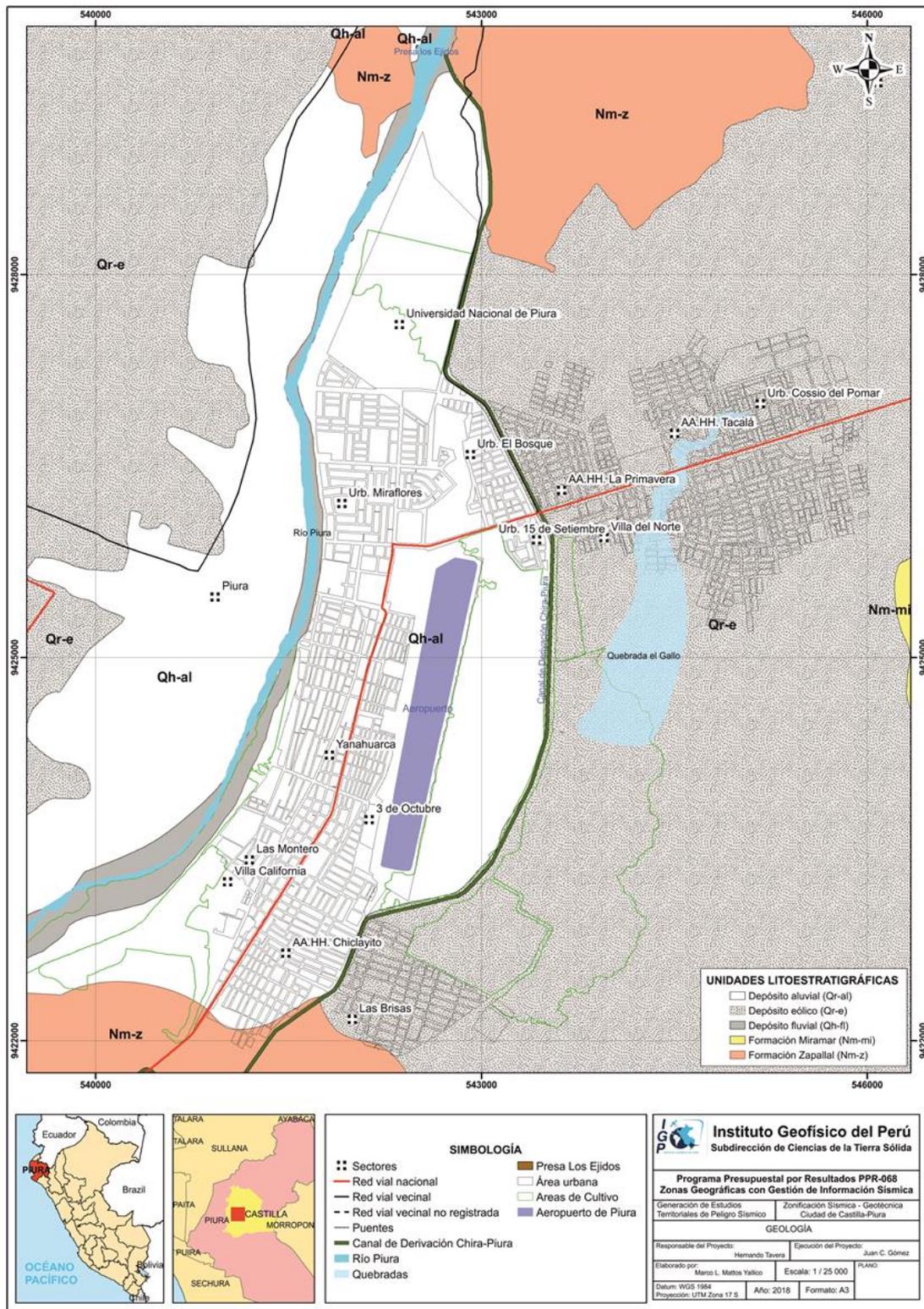


Figura 12: Mapa de geología local para la ciudad de Castilla y alrededores.

Tabla 3: Columna cronolitoestratigráfica de la zona de estudio.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS Y SIMBOLO	LITOLOGÍA
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENO	Deposito fluvial Qh-fl	Arenas, arcillas y gravas Gravas, limos, y arcillas con clastos subangulosos a subredondeados, forman terrazas Arenas de grano medio a fino
			Deposito aluvial Qh-al	
			Depositos eólicos Qh-e	
	NEÓGENO	PLIOCENO	Formación Miramar Nm-p	Conglomerado constituido, por areniscas arcósicas, areniscas tobáceas areniscas coníferas
		MIOCENO	Formación Zapallal Ts-za	
		PALEÓGENO	EOCENO-OLIGOCENO	
MESOZOICA	CRETÁCICO	SUPERIOR		
		JURÁSICO	SUPERIOR	

3.2.1. Formación Miramar (Nmp-m)

Está constituida por conglomerados en matriz de arenisca arcósica de grano fino, de color amarillo a plomo, con presencia de óxidos limolíticos e intercalaciones de capas de arenas sin cohesión (deleznales) (Figura 13).



Figura 13: Areniscas arcósicas de grano fino de color amarillo y plomizo en inmediaciones del AA. HH. Pampas de Castilla, ubicadas en lado noreste de la ciudad de Castilla.

3.2.2. Formación Zapallal (Ts-za)

Esta Formación está constituida por areniscas cuarzosas intercaladas con capas delgadas de arcilla y limo de 30 cm, de espesor (Figura 14).



Figura 14: Afloramientos de la Fm. Zapallal, en la margen derecha del río Piura ubicados a 100 metros al sur-este de la Presa los Ejidos.

3.2.3. Depósitos Cuaternarios

En la zona de estudio predominan los depósitos fluviales, aluviales y eólicos los cuales se describen a continuación:

Depósitos Fluviales (Qh-fl): Conformados por gravas, arenas y arcillas acumuladas por la dinámica fluvial del río Piura que se han depositado en ambas márgenes la cual abarca un área de 105 ha, aproximadamente (Figura 15).

Depósitos Aluviales (Qh-al): Son terrazas fluviales conformadas por la acumulación de gravas, limos, y arcillas con clastos subangulosos a subredondeados. En este relieve se asienta la población del distrito de Castilla y cubren un área aproximada de 1000 ha, aproximadamente (Figura 16).

Depósitos Eólicos (Qh-e): Conformados por arena de grano fino a medio no consolidada. Éstos afloran en los AA.HH. Madre Teresa de Calcuta y Pampas de Castilla, donde se evidenció depósitos eólicos acumulados en forma de dunas (Figura 17).



Figura 15: Depósitos fluviales de arena, grava y arcilla (Polígono, amarillo) en ambas márgenes del río Piura, ubicadas a 150 m al sur-oeste de la Presa los ejidos, distrito de Castilla.



Figura 16: Depósitos aluviales de arcillas, limos y gravas ubicados en la Av. 4 de Mayo, estos materiales han conformado terrazas aluviales.



Figura 17: Depósitos eólicos en las zonas de expansión urbana de la ciudad de Castilla, al noreste del distrito.

4. GEODINÁMICA

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

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

4.1. Procesos de geodinámica interna

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

4.2. Procesos de geodinámica externa

Estos procesos transportan materiales desde la parte alta de la cuenca hacia la parte baja de ésta. Asimismo, estos procesos tienen como factores condicionantes: geomorfología (formas de relieve), litología (tipos de rocas y/o suelos), estructuras geológicas (pliegues y disposición de estratos) que interactúan con los factores detonantes como sísmicos (sismicidad de la zona), climatológicos (incremento de las precipitaciones) y antrópicos (urbanismo, usos del suelo y construcción de vías de comunicación) (Figura 18).

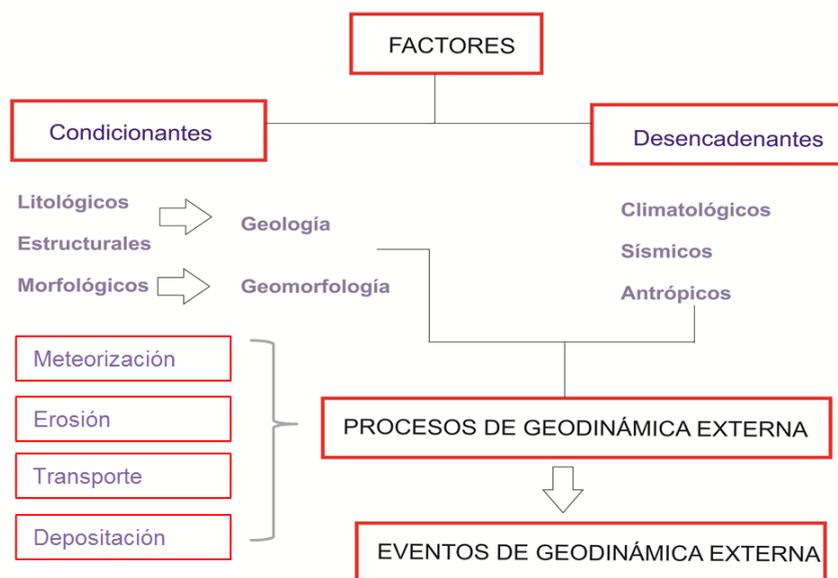


Figura 18: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

Los eventos de geodinámica superficial se dividen según su origen en Hidrometeorológico e hidrogravitacional, son descritos a continuación:

a) Hidrometeorológico: Entre estos se encuentra la inundación pluvial, fluvio-aluvial, costera. La primera se genera directamente de las precipitaciones pluviales, es decir, sin que el aporte de agua llegue a alguna escorrentía superficial, las aguas se acumulan en hondonada o depresiones naturales y su proceso de infiltración puede tardar días.

La inundación fluvio-aluvial, producto del desborde de río o quebradas en períodos de precipitaciones extremas afectando extensiones de terreno adyacentes a la fuente de agua. En la zona costera las zonas litorales son afectadas por tsunamis y mareas generadas por vientos de ciclones. Otros efectos son causados por la actividad antrópica debido a la falta de infraestructuras hidráulicas que originan la retención del flujo hídrico hasta llegar al colapso e inundar zonas urbanas ubicadas aguas abajo (CENAPRED, 2004).

b) Hidrogravitacional: Representados por los movimientos en masa (MM) donde interviene el agente erosivo (carcaveo, incisión y desgaste laminar) y la gravedad. Se presentan en laderas de los valles y en las partes bajas de las vertientes. Estos eventos son todos aquellos movimientos en masa ladera debajo 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: en el tipo de movimiento (desprendimientos o caídas, volcamientos, deslizamientos, avalanchas, desplazamientos laterales, flujos y movimientos complejos) y en el tipo de material, ya sean rocas y/o suelos (divididos en detritos y tierras).

Según su origen los eventos geodinámicos que afectan a la ciudad de Castilla son: Inundaciones fluviales y pluviales.

4.2.1. Inundación

Es un flujo relativamente alto que sobrepasa el canal natural por el cual discurre la escorrentía (Chow, 1956, 1994). Es el resultado del comportamiento de la cuenca hidrográfica en un período de incremento de precipitaciones. Es la ocupación ocasional de terreno por el agua de un río o una quebrada. Puede ocurrir en zonas litorales debido a tsunamis o la superposición de oleaje y las mareas, pero lo más frecuente son las inundaciones en el interior de los continentes, producidas por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes); es decir, atribuida al incremento brusco del volumen de agua, denominado crecida (Adaptado de CENEPRED, 2013). Las inundaciones pueden ser consecuencia de varios factores naturales y humanos (Tarbuck, 2005).

Las inundaciones fluviales se producen en valles o llanura de inundación como el resultado del desbordamiento de las márgenes del canal o de diques artificiales, pueden intensificarse por factores asociados con la cuenca de drenaje, los canales y su red (Patton, 1988) o a la duración e intensidad de la precipitación, que por lo regular exceden a la capacidad de infiltración del terreno, por ello la escorrentía aumenta rápidamente. Las inundaciones producen la mayor parte de las pérdidas humanas y materiales (Burton et al, 1978).

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 (Figura 19).

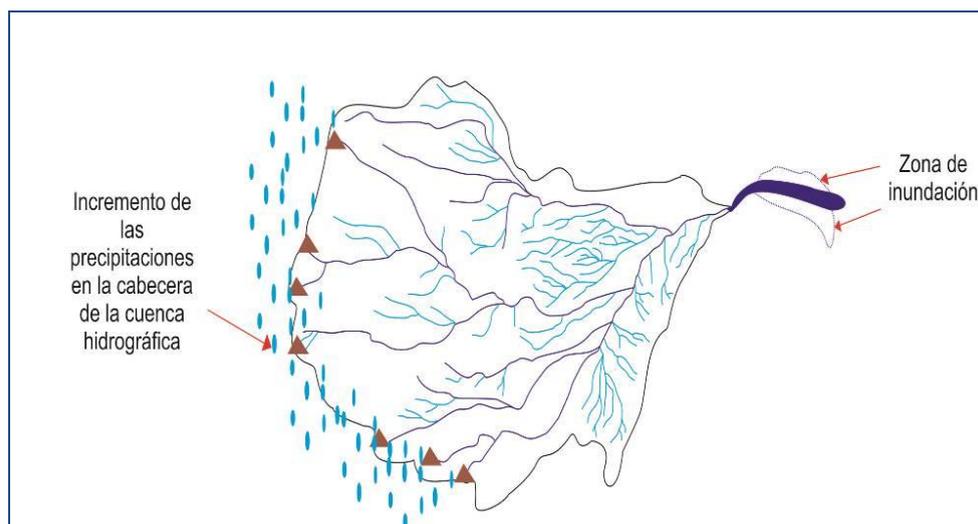


Figura 19: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica.

Cuando el caudal de una corriente llega a ser tan grande que supera la capacidad de su cauce, se desborda hacia sus márgenes. Estas se describen en términos de intervalo de recurrencia o período de retorno; es decir, la inundación puede repetirse en 30, 50 y 100 años. Un ejemplo, es el caudal de inundación que tiene un 1 por ciento de probabilidad de ser superado en un año cualquiera. Las inundaciones pueden ser consecuencia de factores naturales y humanos, (Tarbuck, 2005).

En la ciudad de Castilla se han identificado dos tipos de inundaciones y sus características se describen a continuación:

- **Inundaciones fluviales:** En el distrito de Castilla se ha delimitado dos eventos geodinámicos del tipo hidrometeorológicos: inundaciones fluviales y pluviales; ambas asociadas a precipitaciones extraordinarias “Fenómeno El Niño”. Las primeras se producen por el desborde del río Piura sobre la margen izquierda del distrito de Castilla afectando todas las viviendas que se encuentran en lado este, paralelas a las avenidas: Guillermo Trazola y la Av, Maria auxiliadora. El río Piura recorre unos 8.7 km desde la Presa los Ejidos hasta el puente de la Panamericana norte, tramo que corresponde al distrito de Castilla, desbordándose en épocas de máxima precipitación hasta unos 800 metros desde el cauce del río hacia las zonas urbanas (Figura 20) afectando en su recorrido a las urbanizaciones Villa California, Las Montero, Asociación 4 de Mayo, Asociación 7 de Setiembre, Urb: Miraflores y Universidad de Piura.

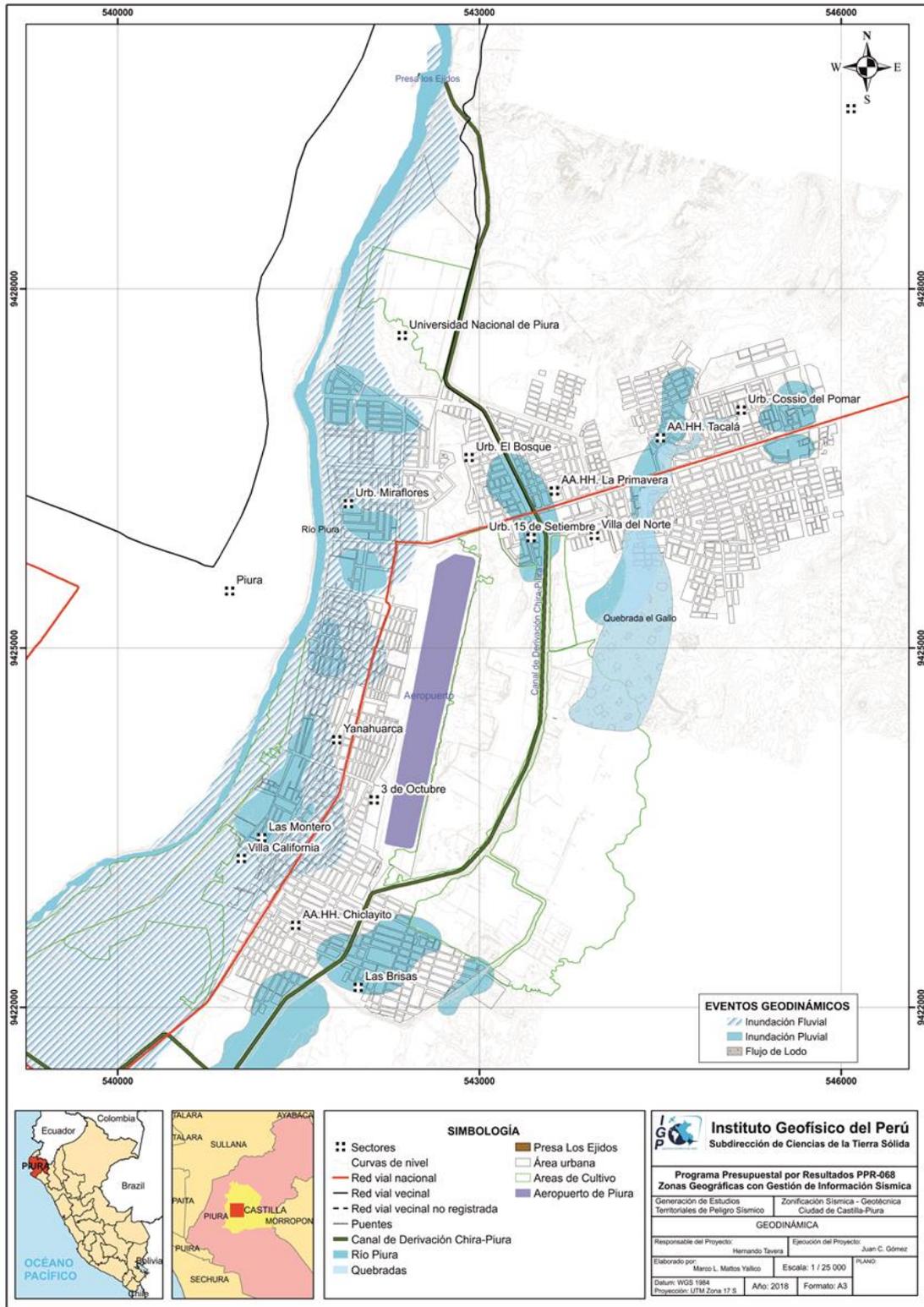


Figura 20: Mapa Geodinámico de la ciudad de Castilla y alrededores.

- **Inundación pluvial:** Las inundaciones pluviales son la acumulación de las aguas en zonas de depresión formando cuencas ciegas. Las zonas afectadas son: Urb. Cossio del Pomar, AA.HH. Tacala, Quebrada el Gallo, Urb. La Primavera, Villa del Norte, 15 de Setiembre, El Almirante, Los Rosales, Puente de Huarmaca, Universidad de Piura, entre otros.

Cabe señalar que el distrito en Castilla no posee un adecuado sistema de drenaje, ver Figuras 21, 22, 23, 24 y 25.



Figura 21: Zona de inundación pluvial, Urb. Cossío del Pomar, distrito de Castilla (abril del 2018).



Figura 22: Zona de inundación pluvial, Parque de Tácala, se observa una depresión o Cuenca ciega (líneas punteadas).



Figura 23: Zona de inundación pluvial, Urb. Cossío del Pomar.



Figura 24: Nivel de Inundación en marzo del 1983, en la Urb. Cossío del Pomar, fue de 1.80 m de altura.



Figura 25: Muestra el cauce del río Piura, donde ambas márgenes sufren de inundaciones fluviales producto de las lluvias en los meses de máxima precipitación en los eventos del Fenómeno del Niño. El distrito de Castilla se encuentra en la margen izquierda. El río Piura recorre con dirección NE-SO.

5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los suelos son materiales inconsolidados conformados por 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 su comprensibilidad 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 26).

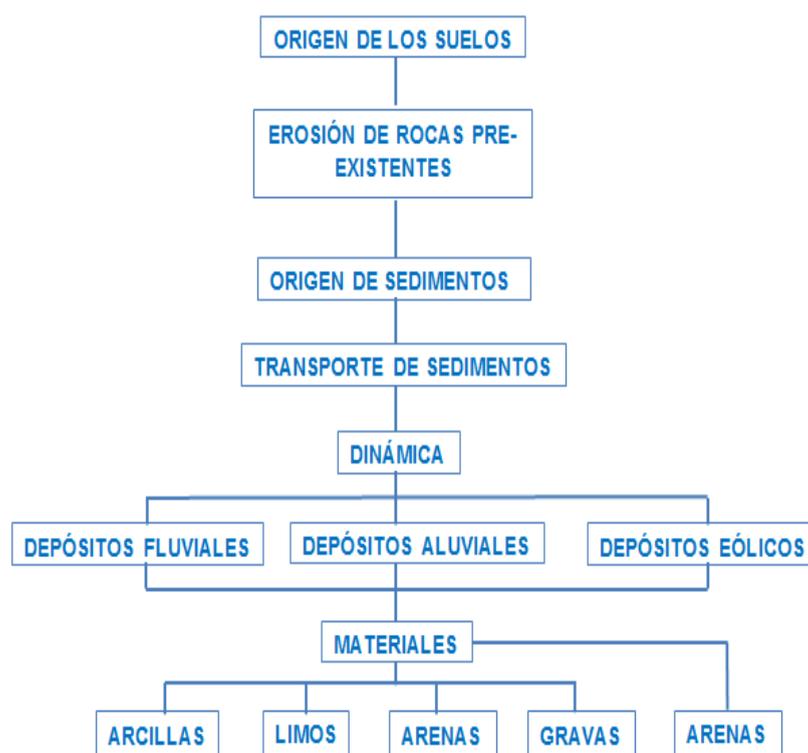


Figura 26: Diagrama del origen de los suelos.

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

En el distrito de Castilla, se realizó el estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) Figura 27.

Asimismo, de las calicatas se extrajeron 9 muestras de suelo para realizar los ensayos geotécnicos como: granulometría, plasticidad, corte directo y cálculo de la capacidad portante de los suelos.

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 su observación. Estas exploraciones se realizaron hasta aproximadamente 3.00 m. de profundidad, a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras en bolsas herméticas con capacidad de 5 Kg. aproximadamente, para la realización de ensayos y análisis (Figura 27).

Reconocimiento de la zona de estudio: En base al análisis visual de las características del terreno, accesibilidad y lugares apropiados, las exploraciones se realizaron en puntos distribuidos de manera uniforme en la ciudad de Castilla.

Excavaciones: Estas tuvieron las siguientes dimensiones: 1.5 x 1.5 m. y una profundidad aproximadamente 3.00 m. 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).

5.1.1. Descripción de calicatas

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo elaborado, las mismas que se adjuntan en los Anexos. Las excavaciones realizadas se ubican en las siguientes coordenadas UTM (Figura 27 y Tabla 4).

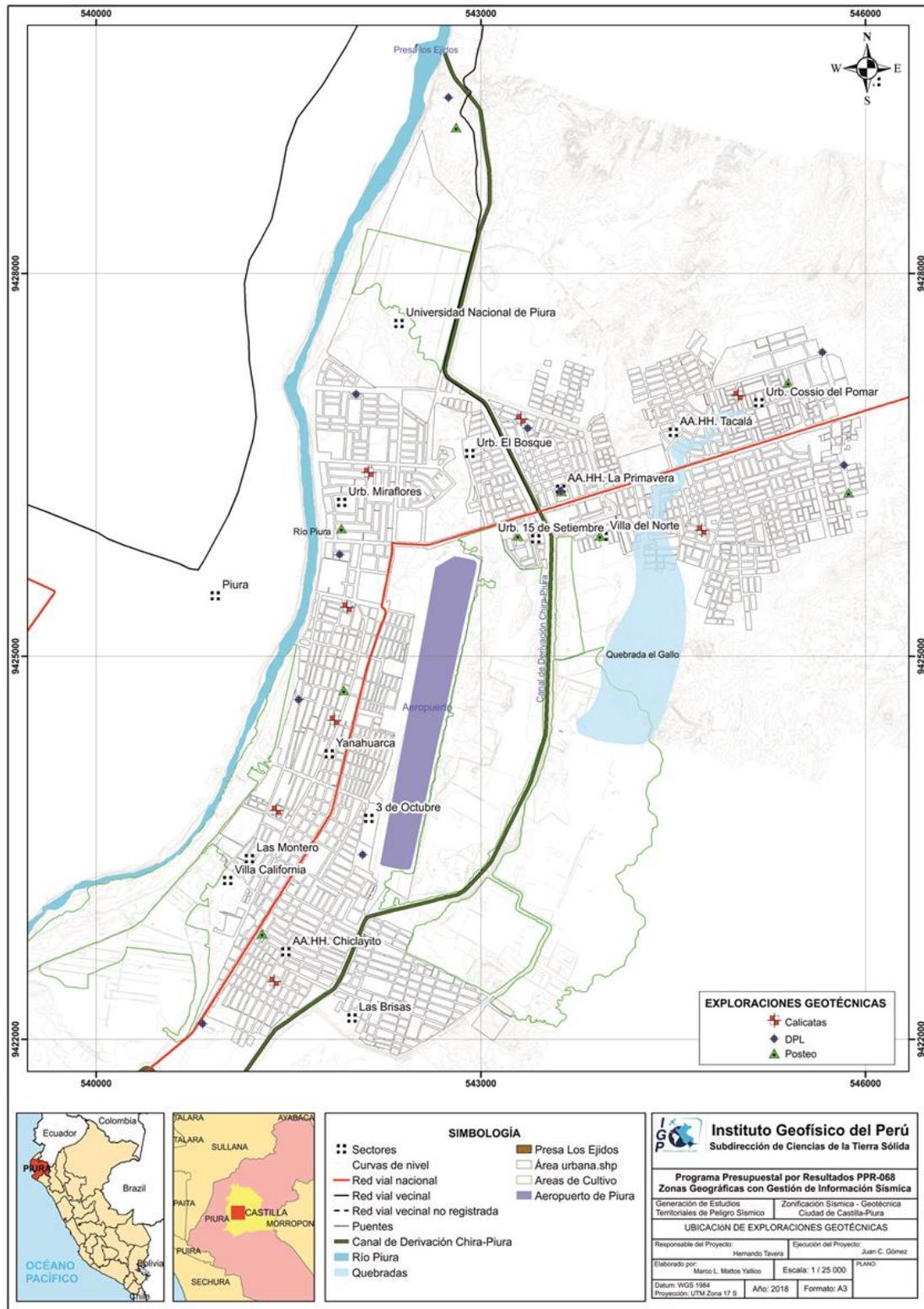


Figura 27: Mapa de distribución de calicatas, posteos y DPL en la ciudad de Castilla y alrededores.

Tabla 4: Ubicación de calicatas (NP, no presenta nivel freático)

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD EN (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
C- Ca - 01	545845	9426417	35	3.00	NP.
C- Ca - 02	545669	9427408	34	3.00	NP.
C- Ca - 03	543277	9425945	35	3.00	NP.
C- Ca - 04	542433	9426199	36	3.00	NP.
C- Ca - 05	542608	9429061	40	3.00	NP.
C- Ca - 06	540822	9422135	35	2.50	NP.
C- Ca - 07	542086	9423382	39	2.60	NP.
C- Ca - 08	541579	9424668	37	2.90	NP.
C- Ca - 09	541905	9426209	38	2.40	NP.

En las calicatas la profundidad de investigación promedio fue de 3.00 m., y en otras a menor profundidad debido a que se encontró caliche, nivel freático y material compacto. Por ejemplo, en el Parque Idepum, se identificó caliche de compactación alta.

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

Este método permite conocer la densidad o peso unitario de los suelos in situ con cierto grado de compactación natural. Consiste en extraer material del suelo, a través de un orificio de 10 cm de profundidad realizado en el interior de la calicata. El objetivo es obtener la relación entre la masa y el volumen conocido que ocupa la arena calibrada del cono de densidad.

En cada estrato muestreado se debe llevar a cabo un ensayo de densidad de campo, haciendo uso del método del cono de arena y así obtener el grado de compactación o consistencia y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales; y en otros casos, para obtener el grado de compactación. Esta información es necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo; sin embargo, no es aplicable en suelos que contengan cantidad excesiva de roca o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm), así como en suelos saturados; sino más bien, en suelos que presentan cierta cohesión, tales como: arenas limosas y arenas arcillosas con contenido de gravas inferiores a 38 mm de diámetro.

A continuación, en la Tabla 5, se presenta los resultados obtenidos de las densidades para nueve (9) calicatas, elaboradas en el área de estudio (datos obtenidos a través del método del cono de arena) y en los Anexos se adjunta sus fichas.

Tabla 5: Resultado de densidades in – situ

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
C- Ca - 01	D1-C-ca(SP-SM)	3.00/3.00	1.48	1.46	2.32
C- Ca - 02	D1-C-ca(SP-SM)	3.00/3.00	1.45	1.4	1.2
C- Ca - 03	D1-C-ca(SP-SM)	3.00/3.00	1.56	1.5	2.27
C- Ca - 04	D1-C-ca(SP-SM)	3.00/3.00	1.48	1.41	3.32
C- Ca - 05	D1-C-ca(SP-SM)	3.00/3.00	1.47	1.41	9.00
C- Ca - 06	D1-C-ca(SM-SC)	2.5/2.5	1.67	1.6	3.19
C- Ca - 07	D1-C-ca(SP-SM)	2.6/2.6	1.5	1.45	2.16
C- Ca - 08	D1-C-ca(SP-SC)	2.9/2.9	1.35	1.3	2.15
C-Ca - 09	D1-C-ca(SP-SM)	2.4/2.4	1.58	1.52	3.8

Según los resultados obtenidos, los suelos de la ciudad de Castilla presentan rangos de densidad entre 1.35 – 1.67 gr/cm³; y según la Tabla 6, corresponden a arenas pobremente graduadas, arenas limosas y arenas arcillosas.

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

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

5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D 1452)

Se define posteadora como un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 5 a 6 m., a fin de obtener muestras del suelo. Las muestras extraídas se obtienen trituradas y completamente alteradas, sin embargo, sirven para conocer el tipo de suelo y contenido de humedad que presenta. Se hace mención que, la posteadora presenta restricciones en suelos con presencia de gravas y gravillas.

Estas exploraciones fueron realizadas entre los puntos de las calicatas, tratando de cubrir el área de estudio o en los lugares donde no existía información geotécnica y de este modo, obtener datos para una mejor zonificación de los suelos de la ciudad de Castilla. En la Tabla 7, se muestran los resultados obtenidos y para detalle, en los Anexos se presenta sus fichas.

Tabla 7: Ubicación de posteos y clasificación de suelos SUCS (NP, no presenta datos).

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPOS DE SUELO	NIVEL FREÁTICO ENCONTRADO A (m)
POST-01	541912	9426002	39	0.90	SP	NP
POST-02	543629	9426295	35	0.50	SP	NP
POST-03	545869	9426283	37	2.50	SP	NP
POST-04	545398	9427145	49	1.50	SP	NP
POST-05	543931	9425944	40	1.39	SP-SM	NP
POST-06	543289	9425946	41	2.20	SP	NP
POST-07	542809	9429147	53	2.10	SP	NP
POST-08	541932	9424733	54	0.30	SP	NP
POST-09	541294	9422827	44	1.50	SP-SM	NP

Es importante indicar que la identificación del tipo de suelo se realizó de manera visual y hasta una profundidad promedio de 1.50 m., ya que no se encontró el nivel freático y las arenas tenían un grado de compactación alta.

5.4. Ensayo de penetración dinámica ligera (Norma DIN4094)

Es un equipo de campo de registro continuo dónde se contabiliza y registra el “N”, que es el número de golpes dados por un martillo de 10 Kg. dejándolo caer por gravedad desde una altura de 0.50 m., en la parte superior del tambor de acero, para profundizar tramos cada 10 cm. a través de una punta cónica de 60° que se encuentra en el extremo inferior. Este ensayo permite estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, a fin de calcular, mediante fórmulas empíricas, la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos en Kg/cm²; además, se puede conocer las propiedades de compacidad y consistencia de los suelos. La ventaja del instrumento es que es un equipo muy práctico y se puede transportar fácilmente.

Este tipo de ensayo se aplica en terrenos arenosos, arcillosos y limo-arenosos, no es recomendable utilizarlo en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos. El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Los ensayos de DPL deben ser ubicados a inmediaciones de una o dos calicatas donde se tienen suelos conocidos con la finalidad de conocer la resistencia al corte de los distintos estratos.

En la Tabla 8, se indica la ubicación de los ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL) realizados en las inmediaciones de la ciudad de Castilla, registrándose el número de golpes y el ángulo de fricción interna calculado en base a los parámetros de compacidad y densidad relativa según la fórmula de Meyerhof (1956). La ficha del ensayo se adjunta en los Anexos. En los ensayos de DPL se ha logrado alcanzar profundidades variadas entre 0.06 y 3.50 m.

Tabla 8: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos (Φ = Ángulo de fricción obtenida).

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.n.s.m)	PROFUNDIDAD (m)	NÚMERO DE GOLPES	ϕ
DPL-01	540828	9422124	32	0.10/0.15	28	37.5
DPL-02	542077	9423447	38	0.06/0.06	40	34.8
DPL-03	541577	9424661	46	3.50/3.50	30	34.8
DPL-04	545834	9426500	40	2.50/2.50	44	37.9
DPL-05	545665	9427385	50	1.20/1.20	38	36.3
DPL-06	543365	9426790	38	0.09/0.09	42	37
DPL-07	543622	9426298	40	1.90/1.90	26	37.2
DPL-08	541897	9425799	45	0.40/0.40	40	36.6
DPL-09	542026	9427056	44	0.90/0.90	35	35.7
DPL-10	542746	9429382	52	0.80/0.80	44	37.4

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

El ensayo DPL no cuenta con correcciones normadas para la obtención del ángulo de fricción interna, es por ello que, los valores obtenidos del número de golpes del ensayo DPL (N_{DPL}) fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_{SPT}), a fin de determinar el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente, calcular la capacidad de carga admisible.

Para la correlación de número de golpes del ensayo DPL y SPT, en base a las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), se utilizó una fórmula empírica que relaciona los parámetros de los equipos DPL y SPT, tales como: peso del martillo, altura de caída del martillo, área de la punta cónica, el espesor de la hincia y el número 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:

N_1 = Número de golpes equivalente en SPT

N_2 = Número de golpes obtenidos en DPL

W_1 = Peso del martillo del DPL

W_2 = Peso del martillo SPT

H_1 = Altura de caída de DPL

H_2 = Altura de caída del SPT

A_1 = Área de la punta cónica del DPL

A_2 = Área de la punta cónica del SPT

e_1 = Espesor de la hinca del DPL

e_2 = Espesor de la hinca del SPT

Una vez calculado los valores de golpes con el SPT (N_{SPT}), se realizaron las siguientes 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 procede a estimar el ángulo de fricción interna de los suelos.

5.4.2. Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del “N” SPT

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

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

ENSAYO	N_{SPT} Corregido	Ángulo de Fricción Interna (ϕ'_{NSPT})	N_{SPT} Corregido	Ángulo de Fricción Interna (ϕ'_{NSPT})
DPL-03	1.27	20°	11.28	30°
DPL-05	7.08	26.9°	8.46	28°
DPL-06	12.6	30.9°	-	-
DPL-08	9.32	28.7°	9.15	28.5°
DPL-10	23.31	36.6°	-	-
DPL-11	3.11	22.9°	18.13	34°
DPL-13	3.63	23.5°	5.18	25.2°
DPL-14	12.78	31°	19.86	34.9°
Profundidad del Ensayo	1.00- 1.20m		1.30-1.50 m	

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

COMPACIDAD RELATIVA DE SUELOS GRANULARES			CONSISTENCIA DE SUELOS COHESIVOS SATURADOS		
Valor de N_{spt}	Compacidad relativa	Ángulo de fricción interna (ϕ)	Valor de N_{spt}	Consistencia	Ángulo de fricción interna (ϕ)
0-4	Muy compacta	< 28°	<2	Muy blanda	0°
4-10	Suelta	28°-30°	2-4	Blanda	0°-2°
10-30	Media	30°-36°	4-8	Media	2°-4°
30-50	Compacta	36°-41°	8-15	Compacta	4°-6°
> 50	Muy compacta	>41°	15-30	Muy compacta	6°-12°
			>30	Dura	>14°

De acuerdo a los datos de las tablas 9 y 10 los suelos de la ciudad de Castilla son gravas pobremente graduadas tienen una compacidad media, presentan un ángulo de fricción menor a 36° a profundidades de 1.00 y 1.20 m; y los suelos mixtos de arenas pobremente graduadas, arenas limosas con arcillas arenosas presentan una consistencia media a compacta en estado seco y su ángulo de fricción menor a 35° a profundidad 1.30 y 1.50 m. En los Anexos se adjunta, las fichas resumen de los ensayos y valores del ángulo de fricción interna.

5.5. Clasificación SUCS para Suelos

En base a la información geotécnica recopilada de estudios anteriores, así como de las calicatas, posteos y DPL, realizados en la ciudad de Castilla, los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad, han permitido identificar 2 tipos de suelos, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y en este caso para una profundidad de 1.00 – 1.20m., ver Tabla 11 y Figura 28.

Suelo tipo SP: Este suelo está conformado por arenas finas de origen aluvial, mal graduadas y de colores grises. Este suelo se encontró al inspeccionar las calicatas C-Ca-01, C-ca-02, C-ca-03, C-ca-04 C-ca-07: AA.HH. Madre Teresa de Calcuta, Nuevo Horizonte; Parque 15 de Setiembre, Campo Papal y Parque Idepum.

Suelo tipo SP-SM: Este suelo está conformado por arenas limosas de origen aluvial de color, beige y gris presentan gravas subangulosas > 10 cm de diámetro. Estos suelos fueron identificados en las calicatas C-ca-05, C-ca-06, C-ca-08, C-Ca-09: Caserío Miraflores, Chiclayito Cuadra 30, Av. Progreso, Av. Tacna y Parque José Abelardo Quiñones.

Tabla 11: Clasificación SUCS para suelos presentes en la ciudad de Castilla.

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
C-Ca-01	3.00	N.P.	0	98.9	1.10	N.P.	N.P.	N.P.	2.30	SP	Arena fina mal gradada
C-Ca-02	3.00	N.P.	0.7	98.0	1.23	N.P.	N.P.	N.P.	1.20	SP	Arena fina mal gradada
C-Ca-03	3.00	N.P.	0.5	96.1	3.38	N.P.	N.P.	N.P.	2.70	SP	Arena fina mal gradada
C-Ca-04	2.60	N.P.	43.2	56.3	0.48	N.P.	N.P.	N.P.	3.32	SP	Arena fina mal gradada
C-Ca-05	3.00	N.P.	6.8	83.7	9.54	N.P.	N.P.	N.P.	9.00	SP-SM	Arena limosa
C-Ca-06	3.00	N.P.	0	63.10	36.90	N.P.	N.P.	N.P.	3.50	SP-SM	Arena limosa
C-Ca-07	2.60	N.P.	0.1	97.2	2.73	N.P.	N.P.	N.P.	12.60	SP	Arena fina mal gradada
C-Ca-08	2.90	N.P.	0	95.1	4.90	N.P.	N.P.	N.P.	3.40	SP-SM	Arena limosa
C-Ca-09	2.60	N.P.	0.3	90.9	8.77	N.P.	N.P.	N.P.	3.80	SP-SM	Arena limosa

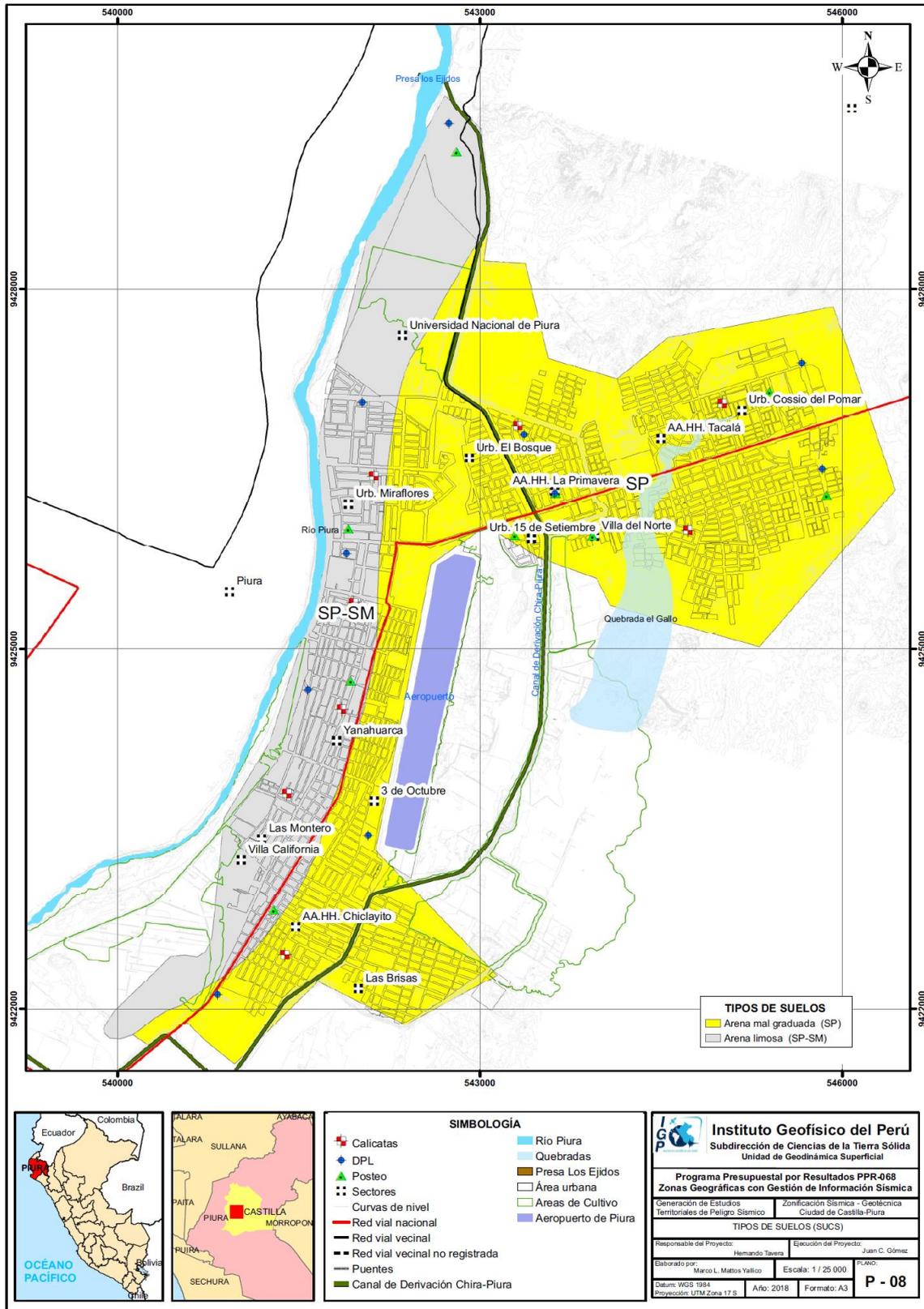


Figura 28: Mapa de clasificación SUCS para suelos de la ciudad de Castilla y alrededores.

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

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo 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).

Los valores obtenidos preliminarmente de capacidad portante de los suelos en la ciudad de Castilla han sido basados en datos teóricos de los parámetros de fricción y cohesión con respecto a la información de DPL realizados en campo, haciendo uso las fórmulas de falla general o local según el tipo de suelo.

5.7. Capacidad de carga admisible

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

Los resultados de capacidad de carga admisible para las 9 muestras de suelos extraídas en la ciudad de Castilla se presentan en la Tabla 12.

Según los valores del ángulo de fricción corregido a partir de la correlación del “N” del DPL en función al del SPT y los datos de cohesión, los valores de capacidad portante para la ciudad de Castilla obtenidos solo con DLP son los que se presentan en la Tabla 13 y Figura 29.

Tabla 12: Capacidad de carga admisible de 9 muestras extraídas en la ciudad de Castilla.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte
C-CA-01	3.29	1.10		-	-	-
C-CA-02	3.22	1.07		-	-	-
C-CA-03	3.46	1.15		-	-	-
C-CA-04	3.42	1.14		-	-	-
C-CA-05	3.14	1.05		-	-	-
C-CA-06	3.56	1.19		-	-	-
C-CA-07	3.23	1.08		-	-	-
C-CA-08	3.03	1.01		-	-	-
C-CA-09	3.41	1.14		-	-	-
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00m			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00m		

Tabla 13: Capacidad de carga admisible (criterio de falla general y local) en base a los ensayos de DPL en el distrito de Castilla.

ENSAYO	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de corte	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de corte
Dpl - 03	2.93	0.98	Falla local	-	-	-
Dpl - 04	2.89	0.96	Falla local	-	-	-
Dpl - 05	2.86	0.95	Falla local	-	-	-
Dpl - 07	3.11	1.04	Falla local	-	-	-
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00		

Los valores de la Tabla 13 fueron obtenidos tomando como referencia los rangos indicados en la Tabla 14.

Tabla 14: Rango de capacidad de carga admisible.

CAPACIDAD CARGA ADMISIBLE (kg/cm ²)	DENOMINACION
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

5.7.1. Carga última

Es la presión máxima ejercida por el área de una cimentación soportada por el suelo hasta producir una falla por corte (Sin factor de seguridad, Norma E.050).

Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo y en base al NSPT (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usaran para determinar la capacidad portante última mediante las fórmulas por corte general y local de Terzaghi (1943), según sea el suelo a ensayar, a través de las siguientes expresiones:

Formula para falla por corte general:

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

Formula para falla por corte local:

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

C: cohesión

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

N_c, N_q, N_γ : Factores de carga, Tabla 15.

Tabla 15: Factores de cohesión, carga y volumen aplicados para la falla por Corte General propuesto por Terzaghi y Kumbhojkar (1993) y para Falla por Corte Local (Modificado por Terzaghi).

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

5.7.2. Tipos de capacidad de carga admisible

En base a los resultados de la carga última (q_u) se calculó la capacidad de admisible para la ciudad de Castilla.

- a) **Capacidad de carga admisible muy baja:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.0 – 2.0 kg/cm², corresponde a dos tipos de suelos arenosos mal graduados (SP) y arena limosa (SP-SM) hasta una profundidad de 1.00 m. todo el distrito de Castilla se encuentra sobre este tipo de suelo (Figura 29).

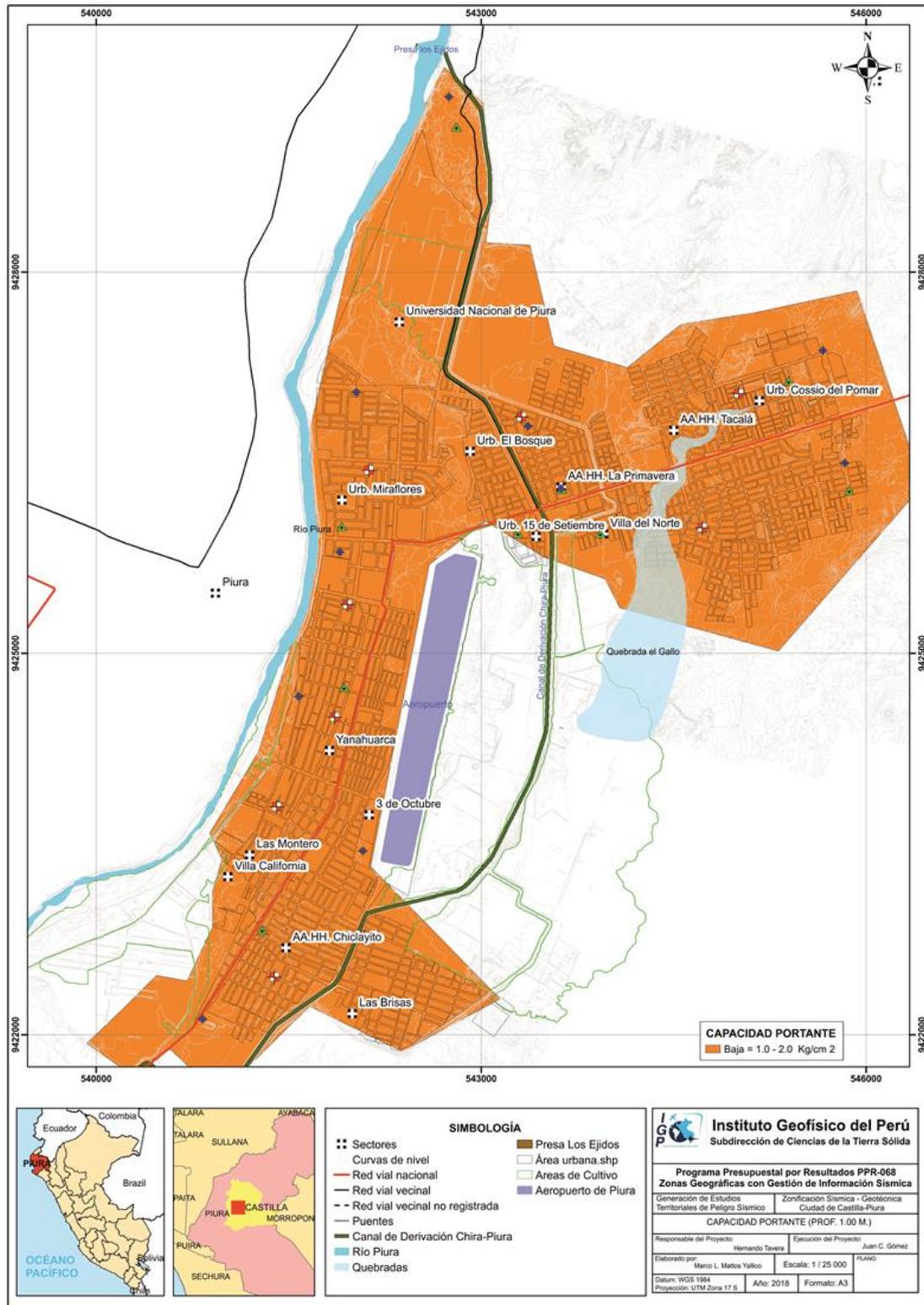


Figura 29: Mapa de capacidad de carga admisible de la ciudad de Castilla y alrededores.

CONCLUSIONES

-En la ciudad de Castilla se han identificado 5 unidades geomorfológicas: Lecho fluvial, Llanura de Inundación, cuenca ciega y Terraza aluvial (sobre la cual se asienta la mayor parte de las zonas urbanas del distrito de Castilla) y Lomas (sobre esta unidad se asientan las zonas de expansión urbana, entre ellos los AA.HH. Madre Teresa de Calcuta y Las Pampas de Castilla, ubicadas al nor-este del distrito de Castilla).

-El 80% de las zonas urbanas del distrito de Castilla, se asientan entre los 27 y 34 metros sobre el nivel del mar, con pendientes menores a 10° grados, lo que nos indica que no están expuestas a movimientos en masa (deslizamientos de tierra, entre otros). Sin embargo, en la Urb. Cossío del Pomar podrían estar expuestos a flujos de lodo en periodos de precipitación por la quebrada el Gallo.

-El sustrato rocoso está conformado por la Formación Zapallal constituida por areniscas arcósicas con intercalaciones de capas de arcillas y limos, reconocidas en la margen izquierda del río Piura, la cual está cubierta por depósitos Cuaternarios conformados por materiales fluviales, aluviales y su gran mayoría eólicos, (arenas de grano fino a medio). También se reconoció en los trabajos de campo rocas de la Formación Miramar en el A.H. Pampas de Castilla.

-Los eventos geodinámicos delimitados en la ciudad de Castilla corresponden a inundaciones pluviales y fluviales (río Piura) que azotan todo el distrito, principalmente en épocas de precipitaciones extraordinarias y junto a ellos flujos de lodo por la activación de la quebrada el Gallo.

-Se han determinado dos tipos de suelo en el distrito de Castilla que corresponden: a) Suelos tipo (SP-SM) arenas limosas, que afloran ampliamente en la margen izquierda del río de Piura. b) suelos (SP) que afloran en las zonas de expansión urbana: AA.HH. Madre Teresa, Nuevo Horizonte, 15 de Setiembre, Chiclayito, Calcuta, Urb. Cossio del Pomar, Las Brisas, El Indio, 3 de Octubre y Yahuarhuaca.

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA Y GEOFÍSICA DE LA CIUDAD DE CASTILLA

CONTENIDO

1. METODLOGÍA

- 1.1. Razones Espectrales H/V
- 1.2. Adquisición de datos
- 1.3. Procesamiento de datos
- 1.4. Análisis y resultados

2. Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW

- 2.1. Adquisición de datos
- 2.2. Procesamiento de datos
- 2.3. Análisis y resultados

3. Tomografía de Resistividad Eléctrica ERT

- 3.1. Adquisición de datos
- 3.2. Procesamiento de datos
- 3.3. Análisis y resultados

4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA- GEOTÉCNICA

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

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

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

1.1. Razones Espectrales H/V

El método de razones espectrales (H/V) descrito por Nakamura (1989), permite caracterizar la respuesta dinámica del sitio y estimar la amplificación sísmica.

Para la aplicación de esta técnica se obtiene registros de vibración ambiental y se procede a construir las razones espectrales H/V que consiste en obtener el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical (Nakamura, 1989), a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones máximas relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio, ver Figura 1. Estas características son definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas y dinámicas del suelo.



Figura 1: Registro de vibración ambiental.

1.2. Adquisición de datos

Los registros de vibración ambiental son obtenidos con equipos sísmicos compuesto por un registrador tipo CityShark y sensores de tres componentes tipo Lennartz, ver Figura 2.



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

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral del área urbana de Castilla, a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica del área 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 información para su posterior análisis. En el área urbana de Castilla, se consideró 228 registros de vibración ambiental obtenidos de manera puntual, distribuidos según la Figura 3.

En la Figura 4, 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 CS-176 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CS-107, 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.

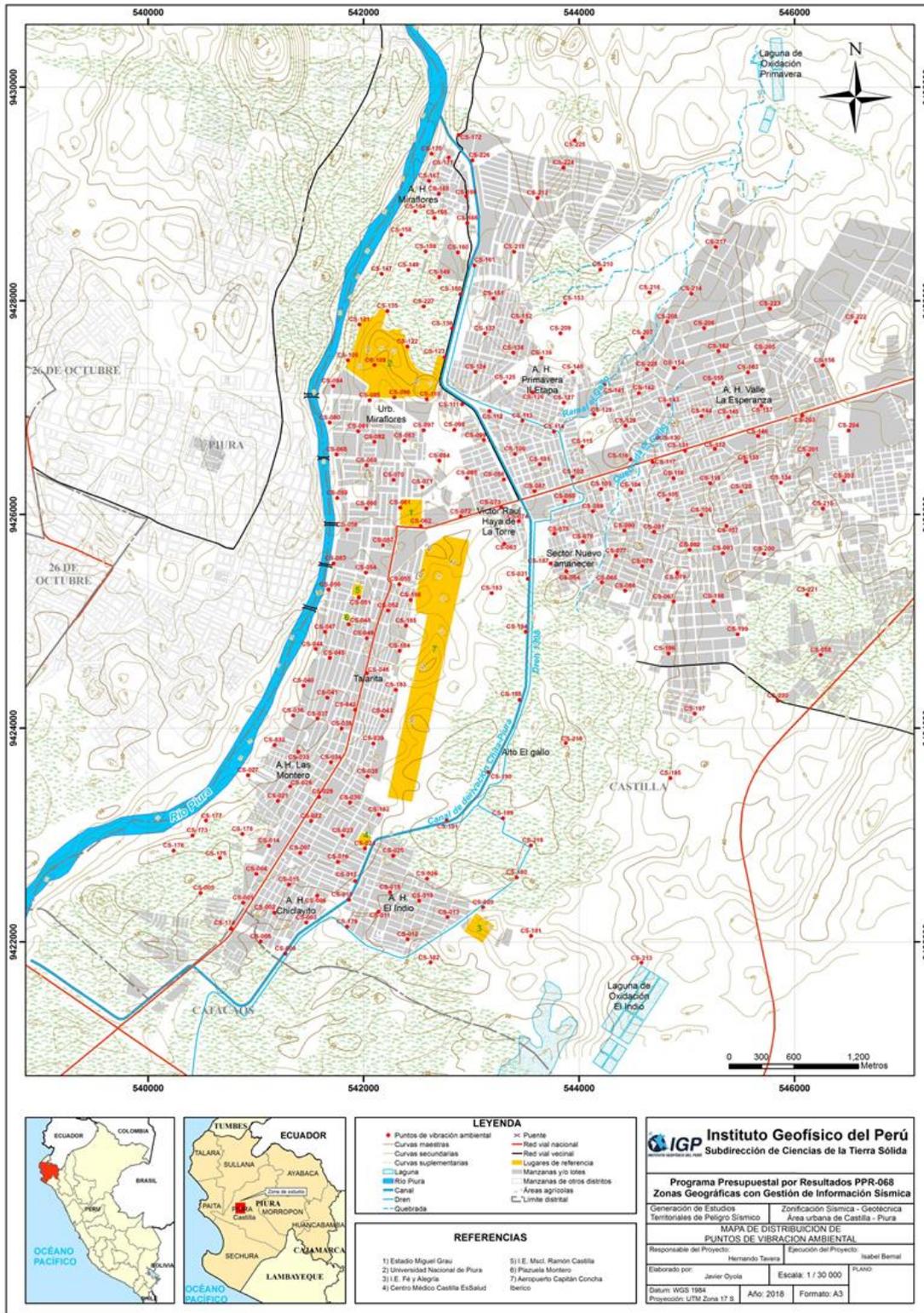


Figura 3: Mapa catastral del área urbana de Castilla y la distribución de puntos donde se tomaron los registros de vibración ambiental HV.

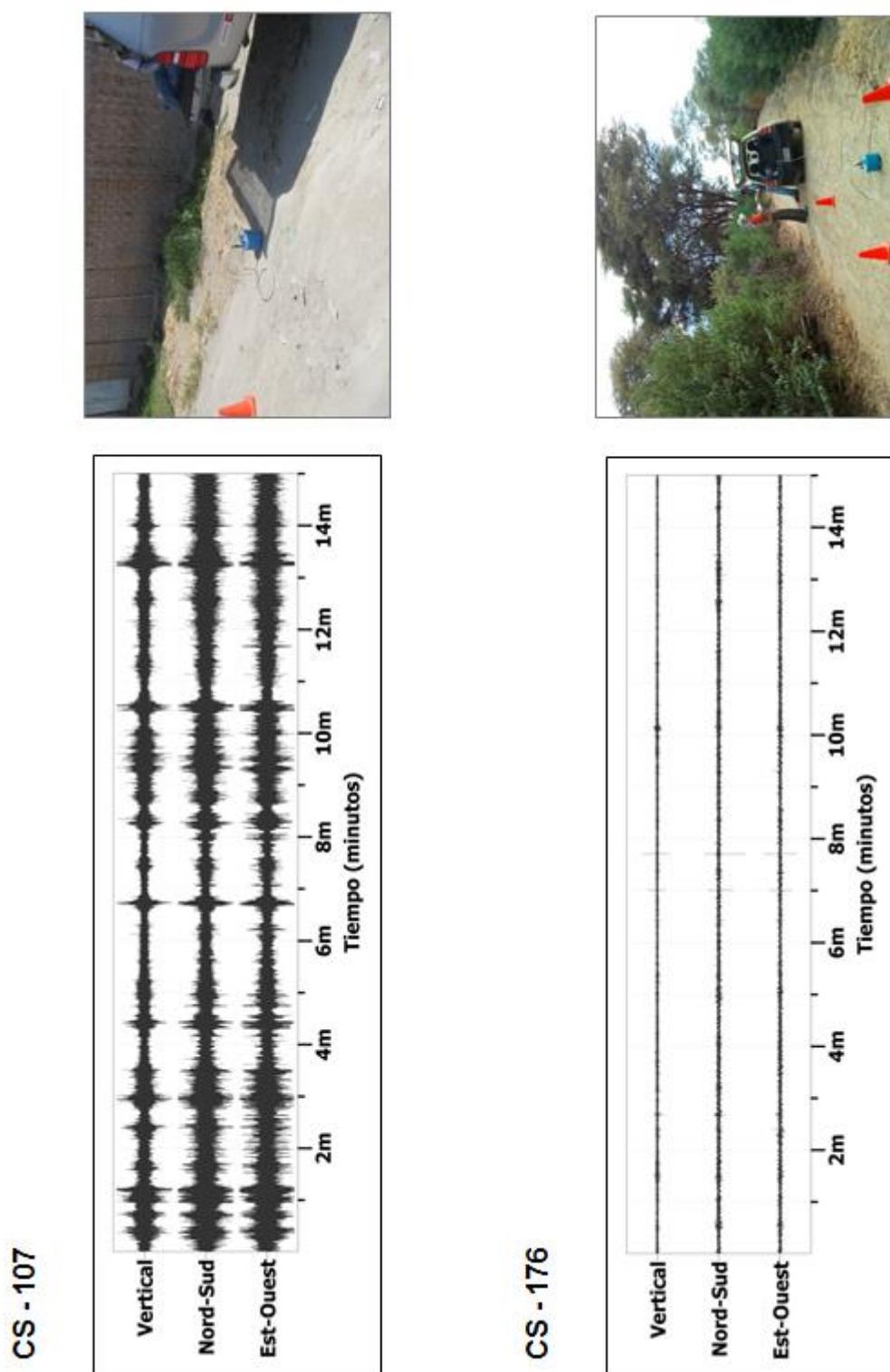


Figura 4: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (CS-107) y otro con ruido de fondo constante (CS-176). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

1.3. Procesamiento de datos

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).

El procesamiento de la información se ha realizado con el programa computacional GEOPSY. En la Figura 5, se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el total de la información obtenida en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O), seguidamente la curva H/V, en la cual la curva continua negra es el promedio del cociente H/V; 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.

Para la interpretación de los resultados se dispone de mapas geológicos, geomorfológicos a fin de correlacionar resultados; en el análisis de la información se debe considerar: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y 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).

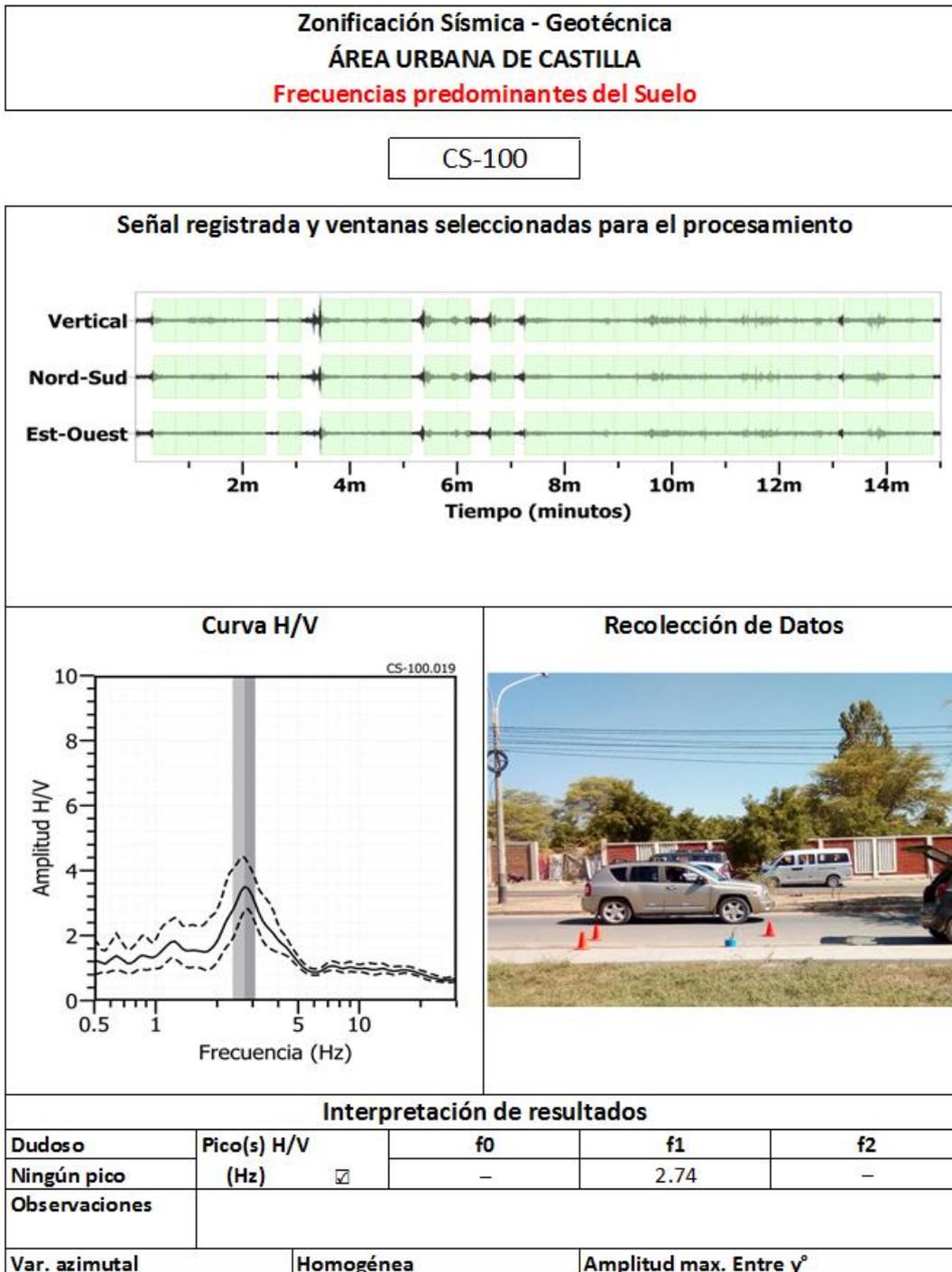


Figura 5: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CS-100 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua y Abajo; resultados.

1.4. Análisis y resultados

A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permitió definir dos rangos de frecuencias F0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F1 ($F > 2.0$ Hz), mostrando un pico de frecuencia bien definido. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en el área urbana de Castilla.

- Frecuencia predominante F_0 : En la Figura 6, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F_0 , en la cual predominan valores entre 1.0 y 1.8 Hz. Estos están presentes de manera aleatoria hacia el extremo oeste de la ciudad, por Víctor Raúl Haya de la Torre, Alto el Gallo y al sur del A. H. Miraflores. Estas frecuencias evidencian la existencia de una capa sedimentaria de gran espesor.

En la Figura 7, se muestra ejemplos de razones espectrales para los CS-156(D), CS-195(H) y CS-215(I), ubicados el primero y tercero por el A.H. Valle La Esperanza y el segundo, por Alto el Gallo. Todos presentan un pico bien definido con frecuencias de 1.22, 1.20 y 1.24 Hz y amplificaciones de 4.1, 3.6 y 2.6 veces respectivamente.

Asimismo, las razones (H/V) obtenidas para los puntos CS-122(A), CS-123 (B) y CS-149(C), ubicadas los dos primeros por la universidad Nacional de Piura y el tercero hacia el A.H. Miraflores. En todas se observa un pico bien definido con frecuencias de 1.55, 1.59 y 1.51 Hz y amplificaciones de 3.7, 3.8 y 4.3 veces respectivamente.

Los puntos CS-179(E), CS-181(F) y CS-190(G), ubicados al sur, por el A.H. El Indio, responden a frecuencias predominantes entre 1.25, 1.18 y 1.40 Hz; sin embargo, el primer y segundo punto ubicado más al sur, responden a un segundo rango de frecuencias entre 2.70 y 2.66 Hz, con amplificaciones menores a 3 veces.

Los resultados muestran la existencia de una capa sedimentaria de gran espesor estas zonas; de un segundo pico de frecuencia (CS-179 y CS-181) evidencia mayor complejidad en la respuesta de los suelos a pesar de presentar baja amplificación.

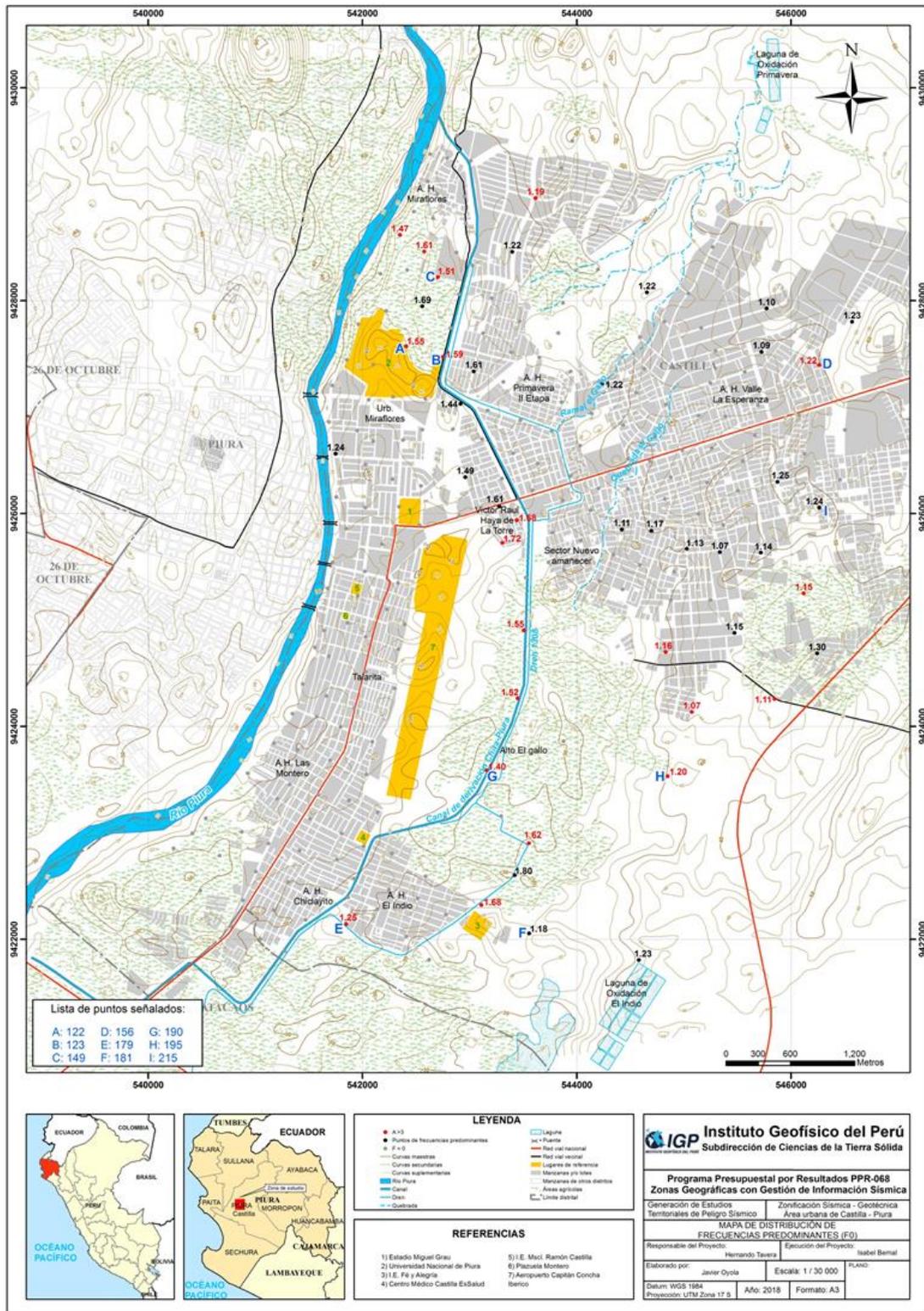
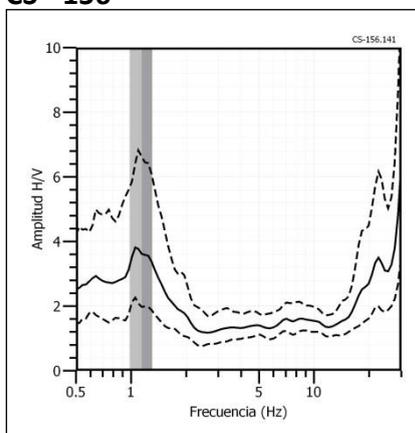
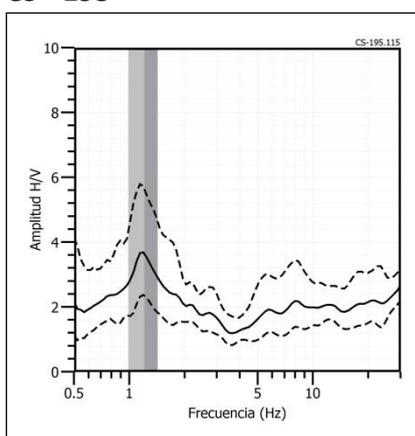


Figura 6: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F_0 \leq 2.0\text{Hz}$) definidas en cada punto. Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 7, como característicos de este rango.

CS - 156



CS - 195



CS - 215

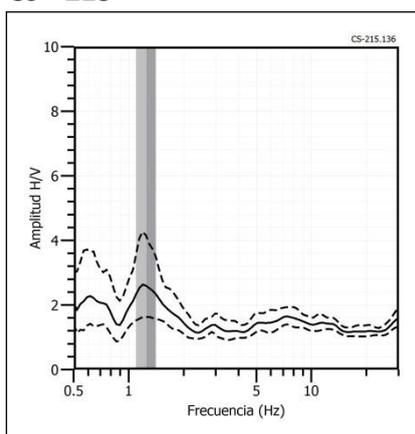
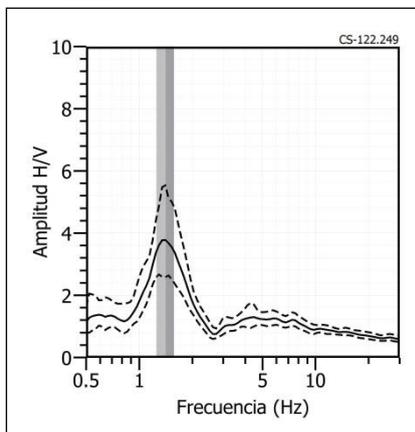
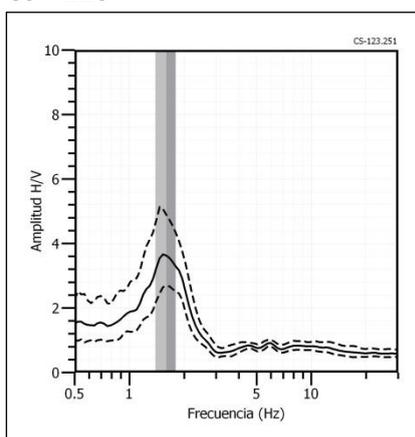


Figura 7: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$): puntos CS-156(D), CS-195 (H) y CS-215(I) ubicados, el primero y tercero por el AA. HH. Valle La Esperanza y el segundo, por Alto el Gallo. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CS - 122



CS - 123



CS - 149

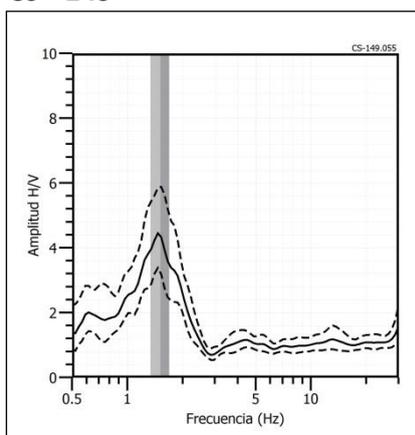
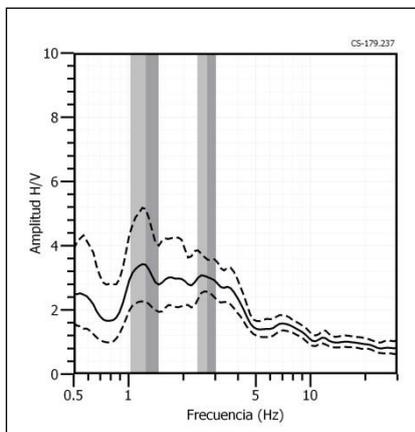
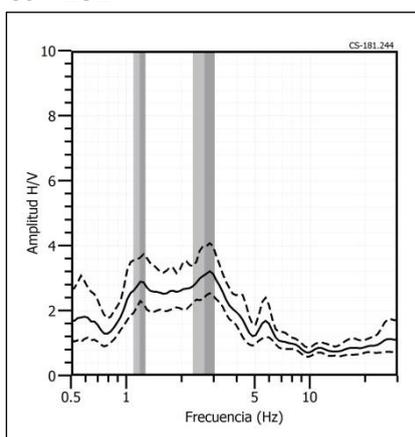


Figura 7: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$): puntos CS-122(A), CS-123 (B) y CS-149(C), ubicados los dos primeros por la Universidad Nacional de Piura y el tercero hacia el AA..HH. Miraflores. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CS - 179



CS - 181



CS - 190

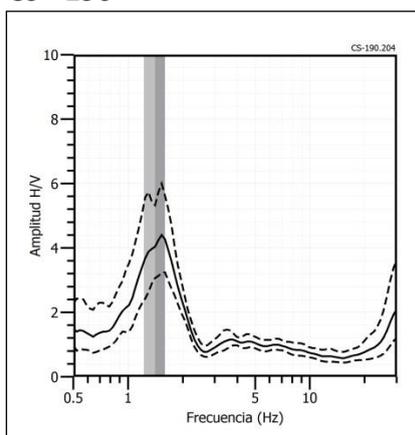


Figura 7: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$): puntos CS-179(E), CS-181(F) y CS-190(G), ubicados al sur, por el A. H. El Indio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencia predominante F1:** En la Figura 8, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ($F > 2.0\text{Hz}$), con el predominio de frecuencias entre 2.0 a 4.5 Hz obtenidos de manera uniforme en toda la ciudad. En la Figura 9, se muestra ejemplos de los gráficos de razones espectrales que caracterizan los suelos de esta ciudad para este rango de frecuencias.

Las razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos SC-47(C), SC-94(E) y SC-170(M), ubicados en la margen izquierda del río Piura, el primero cerca a la plazuela Montero, el segundo frente al centro comercial Open Plaza y el tercero en el A.H. Miraflores, presentan un pico bien definido con frecuencias predominantes de 3.03, 2.23 y 3.09 Hz y amplificaciones de 2.92, 2.23 y 2.75 respectivamente. Así mismo los puntos SC-02(A), SC-23(B) y SC-185(N), ubicados el primero en el A.H. Chiclayito, el segundo por Essalud Castilla y el tercero por la Urb. Talarita, presentan frecuencias predominantes similares entre 2.51, 2.53 y 2.45 Hz con amplificaciones de 2.53, 2.44 y 2.23 veces respectivamente. Estos valores de frecuencias sugieren la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor.

Los puntos SC-75(D), SC-113(G) y SC-121(I), ubicados el primero en Víctor Raúl Haya de la Torre, el segundo en el A.H. Primavera II etapa y el tercero por la Universidad Nacional de Piura, muestran el predominio de un pico con frecuencias de 2.66, 3.71 y 3.73 Hz, y amplificaciones relativas mayores a 3 veces. Estos valores de frecuencia evidencian la existencia de una capa sedimentaria; pero con suelos más flexible que el resto de la ciudad.

Por otro lado, los puntos SC-103(F), SC-120(H) y SC-163(L), ubicados en el A.H. Valle la Esperanza, responden a frecuencias predominantes de 3.38, 3.15 y 3.04 Hz con amplificaciones mínimas (menores a 2 veces). En este sector existen zonas donde los suelos no responden a alguna frecuencia predominante como los puntos SC-132(J), SC-155(K) y SC-204(O), lo cual evidencia la presencia los suelos mejor consolidados y/o compactados.

Según estos resultados, en el 78% de área de la ciudad de Castilla, los suelos responden a frecuencias (F1) con amplificaciones menores a 2 veces en algunos sectores y con amplificaciones mayores en otros sectores más localizados. El 7% del área de estudio no responde alguna frecuencia, principalmente en suelos ubicados en dirección oeste (Figura 8).

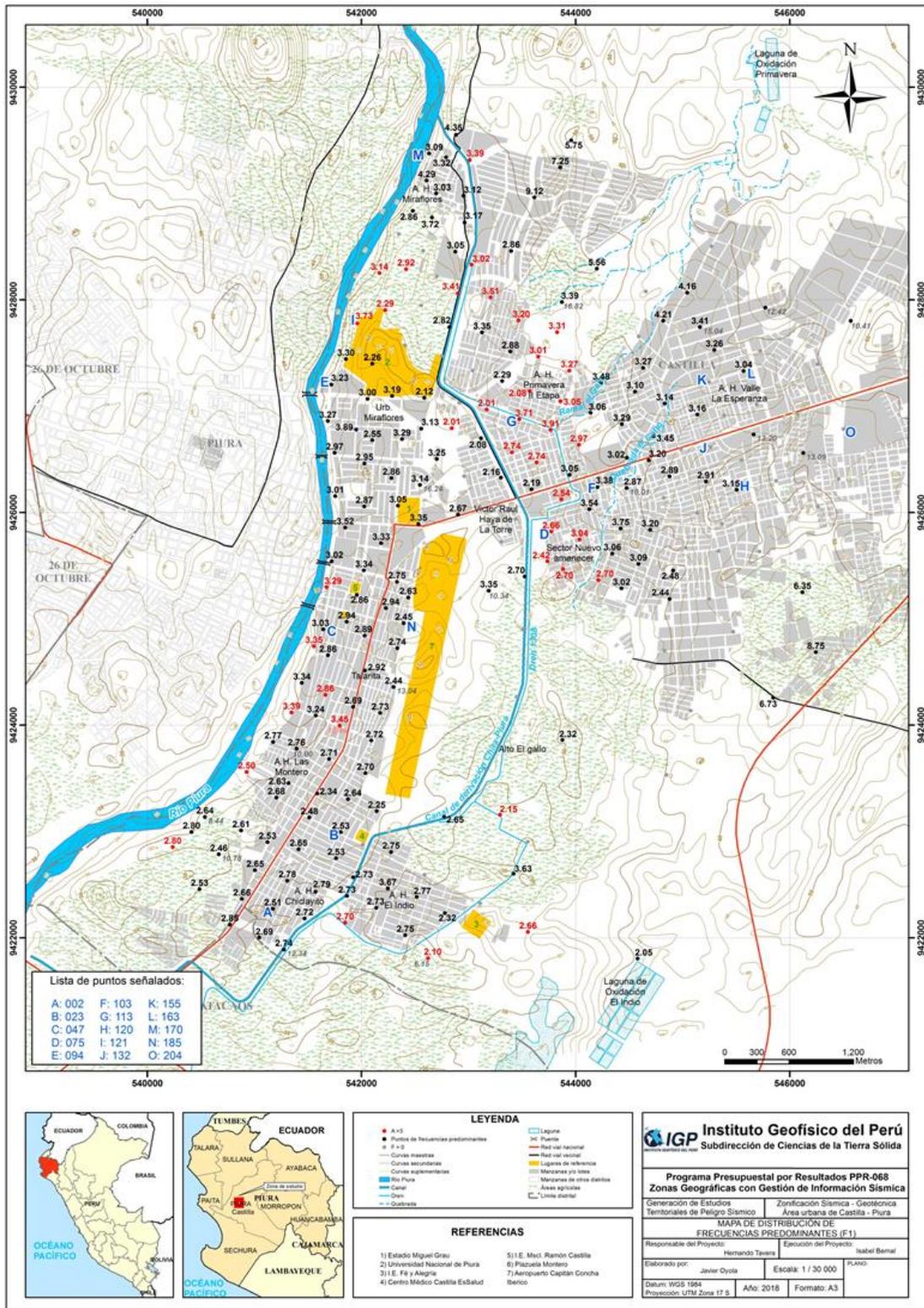
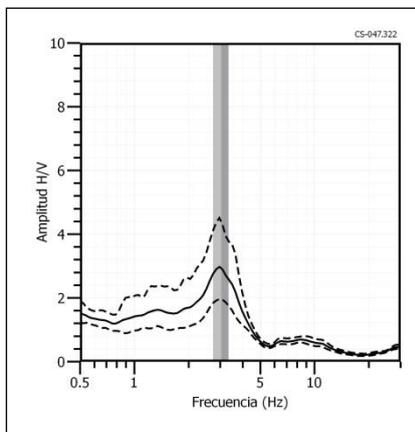
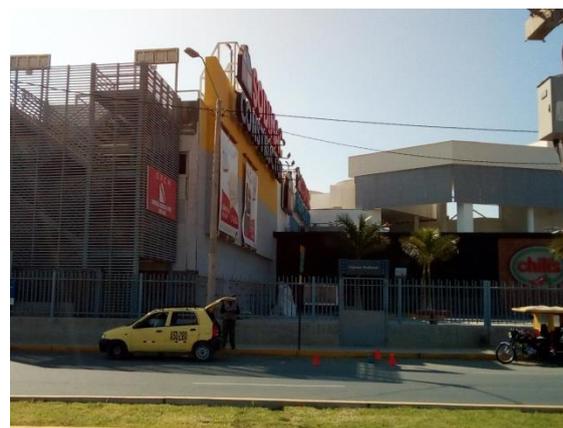
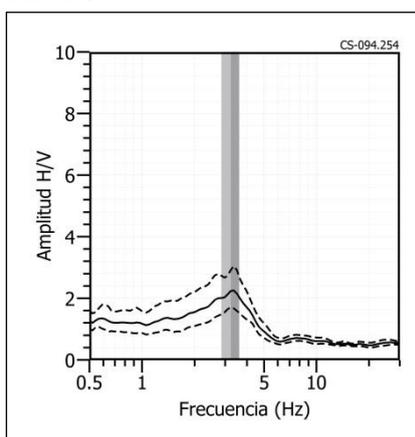


Figura 8: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 9 como característicos de este rango.

SC- 47



SC - 94



SC - 170

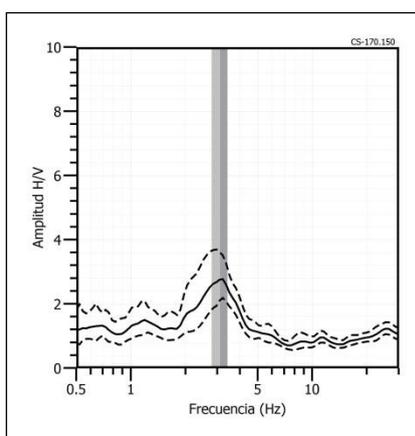
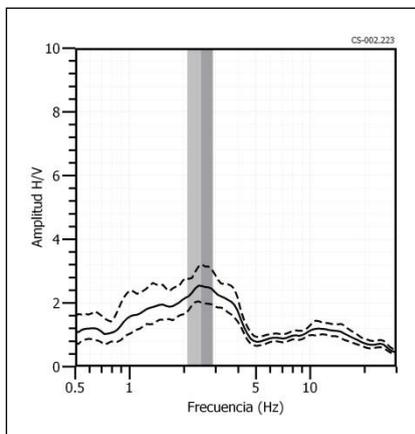
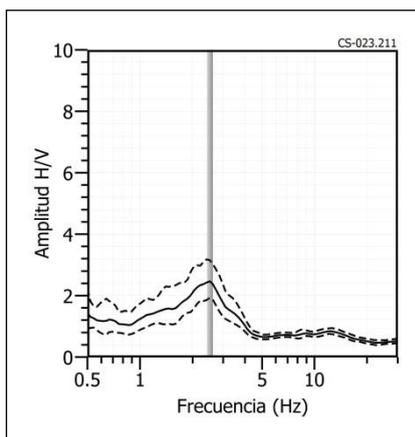


Figura 9: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Puntos SC-47(C), SC-94(E) y SC-170(M), ubicados cerca al río Piura, el primero cerca a la plazuela Montero, el segundo frente al CC Open Plaza y el tercero en el A.H. Miraflores . Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SC- 02



SC - 23



SC - 185

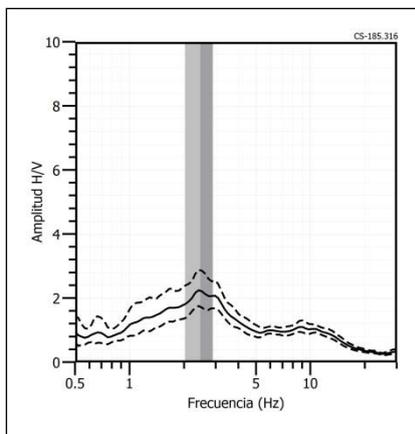
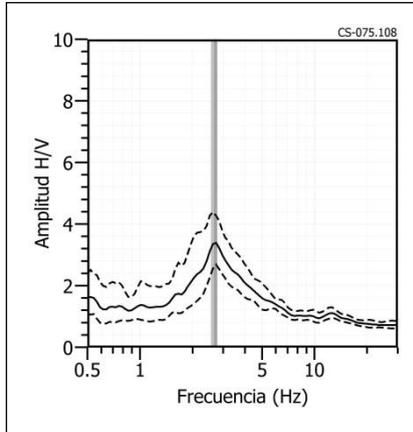
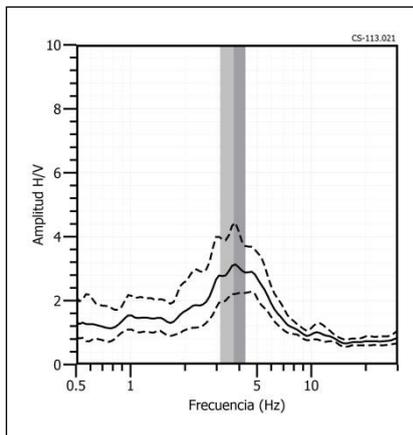


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Puntos SC-02(A), SC-23(B) y SC-185(N), ubicados el primero en el A.H. Chiclayito, el segundo por Essalud Castilla y el tercero por Talarita. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SC- 75



SC - 113



SC - 121

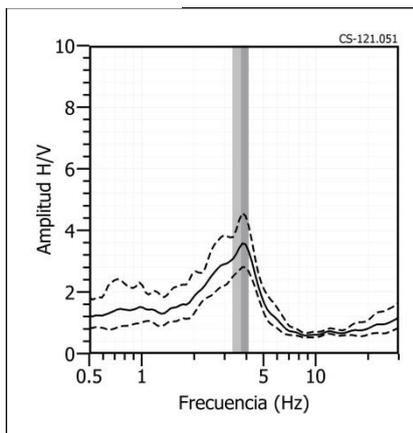
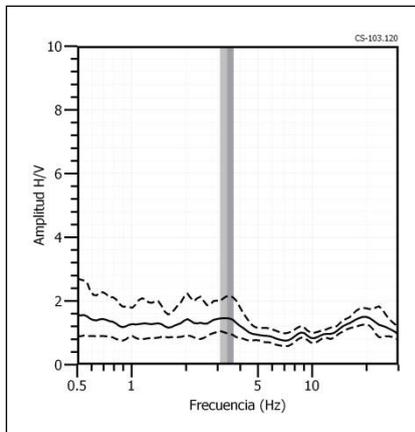
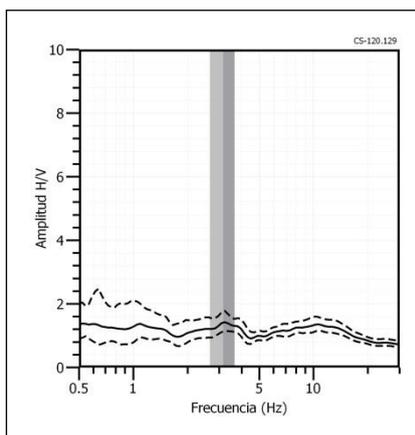


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Puntos SC-75 (D), SC-113(G) y SC-121(I), ubicados el primero en Víctor Raúl Haya de la Torre, el segundo en los A.H. Primavera II etapa y el tercero por la Universidad Nacional de Piura. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SC- 103



SC - 120



SC - 163

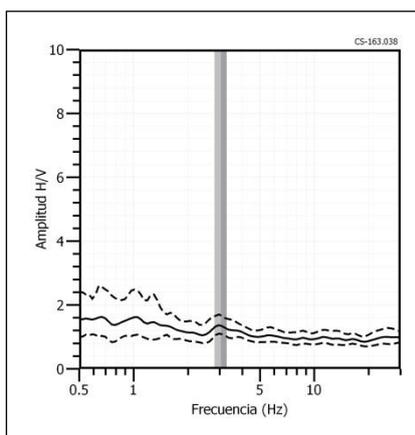
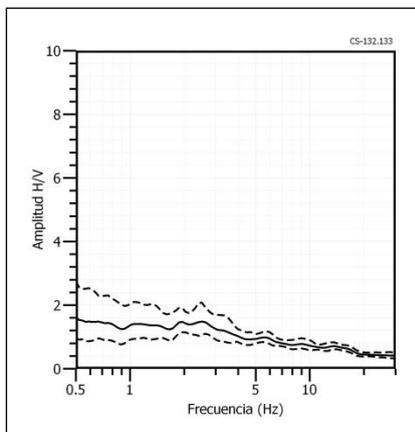
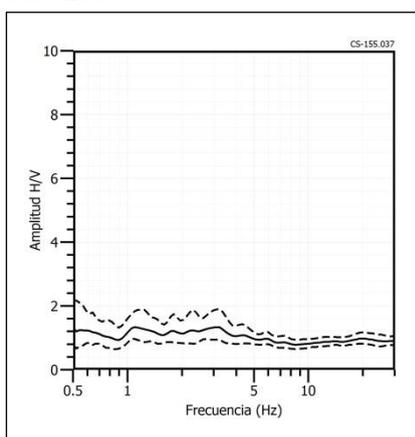


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Puntos SC-103(F), SC-120(H) y SC-163(L), ubicados en el A.H. Valle la Esperanza. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SC- 132



SC - 155



SC - 204

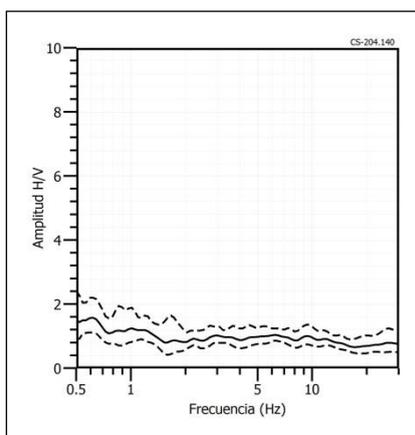


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Puntos SC-132(J), SC-155(K) y SC-204(O) por el A.H. Valle la Esperanza. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

El análisis de razones espectrales H/V en el área urbana de Castilla, ha permitido observar dos rangos de frecuencias: F0 (≤ 2.0 Hz) y F1 (> 2.0 Hz). El primer rango se presenta de manera dispersa en el área de estudio, principalmente por la urb. Alto el Gallo, Víctor Raúl Haya de la Torre, al sur del A.H. Valle la Esperanza y de manera localizada en el A.H. Miraflores.

Los rangos de frecuencias F1, predominan de manera uniforme en toda la zona estudiada. Asimismo, para este rango de frecuencias se observa amplificaciones mayores a 3 veces en el sector Nuevo Amanecer, A.H. Primavera II etapa y al norte de la Universidad Nacional de Piura, lo cual sugiere la presencia de suelos flexibles a diferencia del resto del área de estudio.

Finalmente, los suelos del área urbana de Castilla responden a frecuencias entre 2.0 y 4.5 Hz, valores que están asociados a la presencia de una capa sedimentaria superficial de gran espesor.

2. Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW

El arreglo lineal MASW es un método indirecto que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, permite conocer la velocidad de propagación de las ondas de Corte Vs en el subsuelo, a partir del análisis de la dispersión de ondas Superficiales (ondas Rayleigh), generados por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como se muestra en la Figura 10.

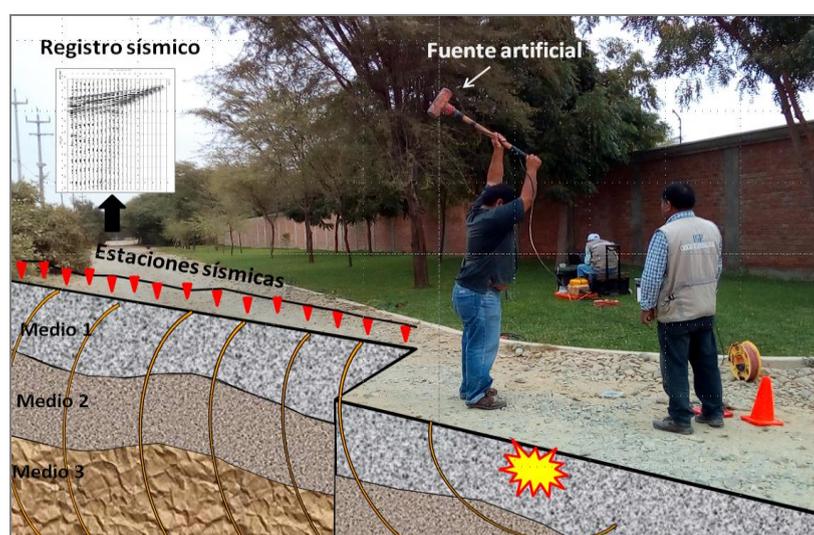


Figura 10: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

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

2.1. Adquisición de datos

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 11. 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 11: Equipo sísmico para la toma de datos de MASW en el A.H. Los Algarrobos.

En el distrito de Castilla se realizaron 11 arreglos lineales MASW, cuyas coordenadas (UTM -WGS84) se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 12 su distribución espacial codificadas como: LS01-CS,....., LS11-CS.

Tabla 1: Coordenadas y características de los arreglos lineales MASW realizados en Castilla.

Arreglo lineal MASW	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-CS	542708	9429177	49	4	92
	542796	9429146	51		
LS02-CS	542641	9428241	44	4	92
	542730	9428219	44		
LS03-CS	542136	9427060	57	4	92
	542220	9427032	57		
LS04-CS	543794	9426960	34	4	92
	543813	9427045	34		
LS05-CS	545483	9426947	56	4	92
	545453	9427037	54		
LS06-CS	543963	9425501	37	4	92
	543873	9425478	37		
LS07-CS	543583	9423950	38	4	84
	543501	9423987	37		
LS08-CS	543257	9422163	42	4	92
	543175	9422204	43		
LS09-CS	541153	9422257	42	4	92
	541196	9422340	42		
LS10-CS	541142	9423485	38	4	92
	541084	9423416	48		
LS11-CS	541909	9425343	41	4	84
	541887	9425264	41		

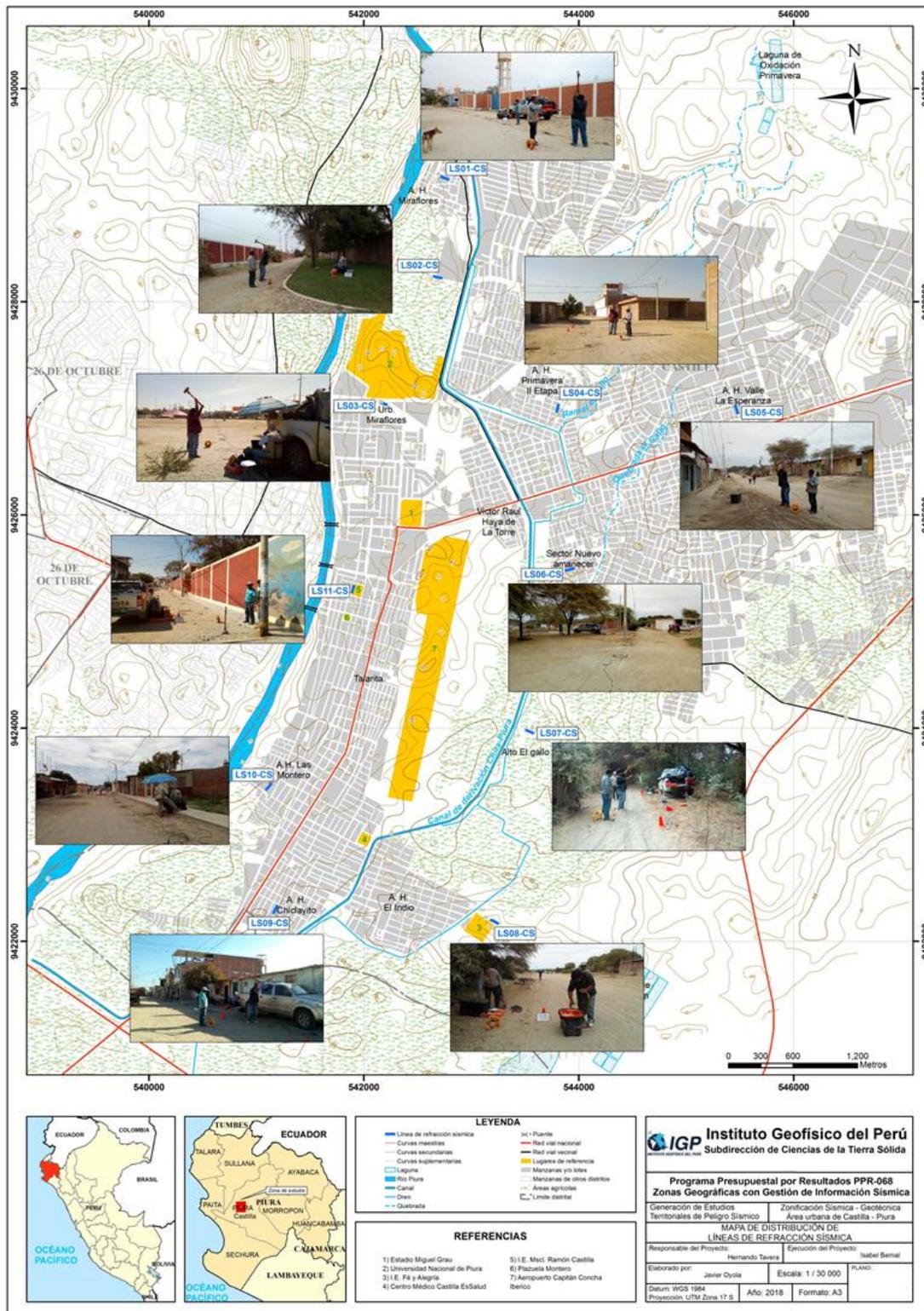


Figura 12: Mapa del área urbana del distrito de Castilla y distribución espacial de los arreglos lineales MASW codificados como: LS01-CS, ..., LS11-CS.

Durante la adquisición de datos se visualiza los sismogramas, a fin de verificar su calidad y el nivel de ruido registrado, tal como se observa en la Figura 13. Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (sumatoria de registros sísmicos), realizando de cuatro a cinco golpes en cada punto “shot”. Finalmente, se realiza el procesamiento preliminar para determinar si la profundidad y la velocidad sísmica obtenida tienen sentido geológico y completan la finalidad del estudio.

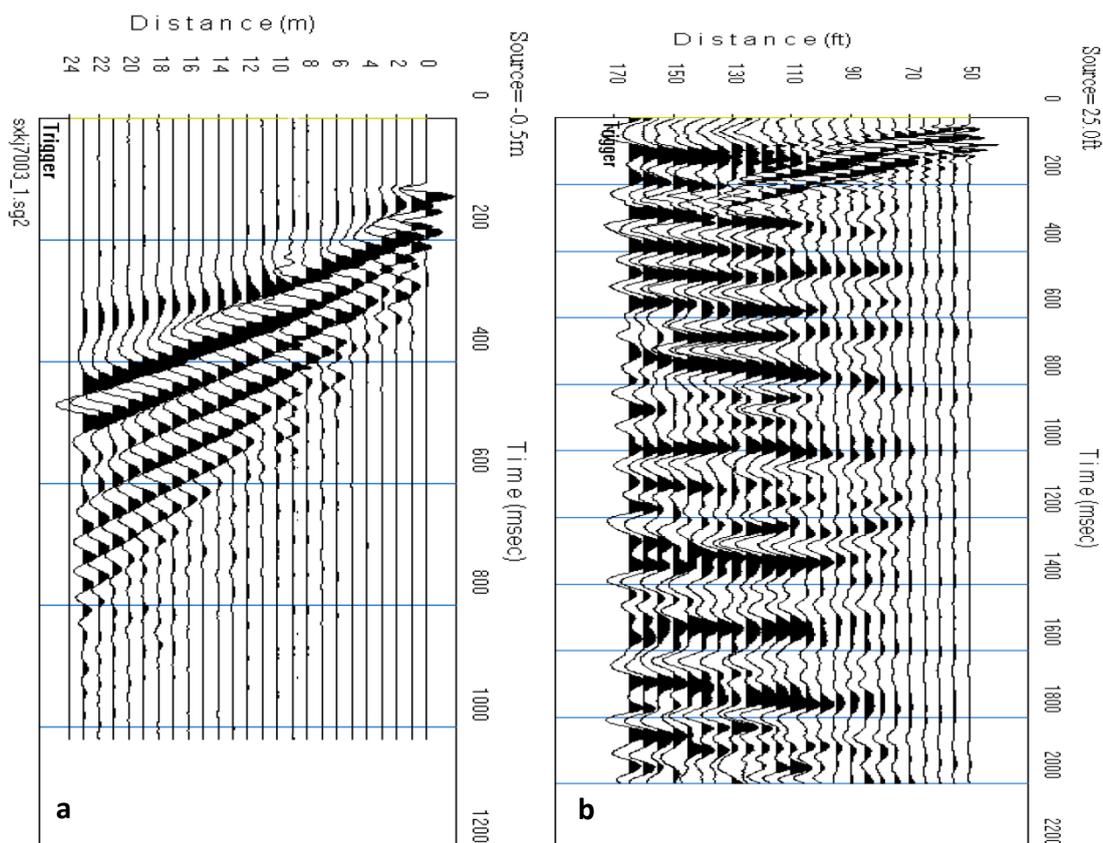


Figura 13: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental, es decir, alta calidad. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 14, como ejemplo se muestra la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS08-CS, ubicada en el frontis de la I.E. Fé y Alegría. 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 3 metros al final de la línea sísmica.

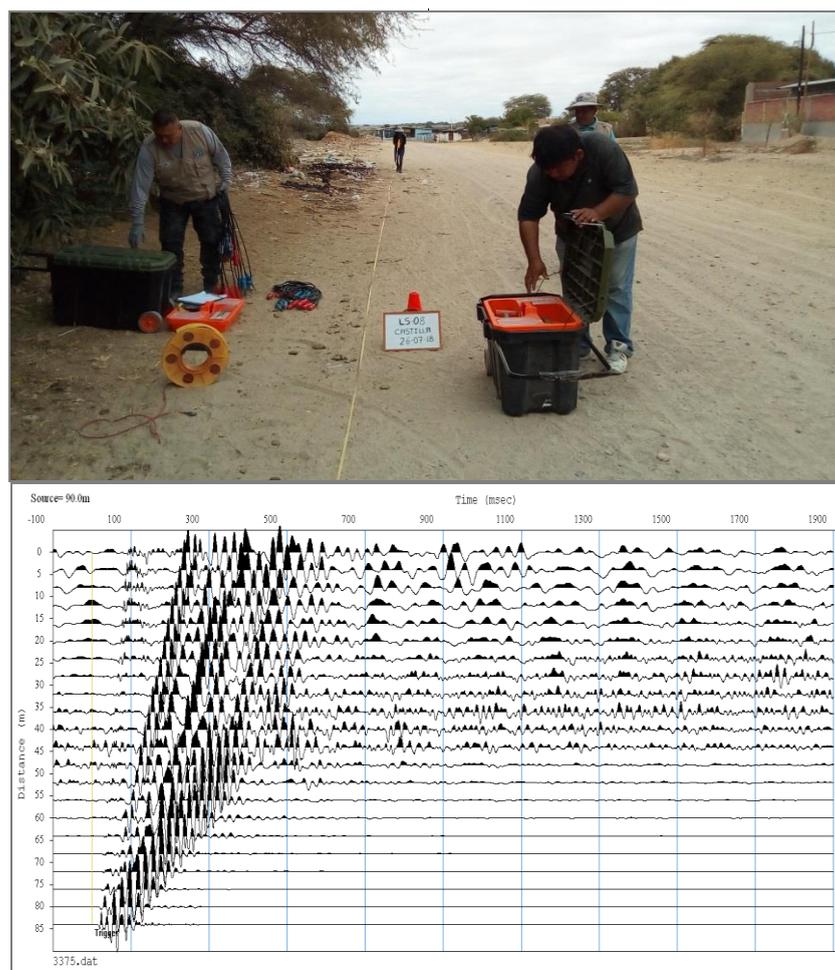


Figura 14: Disposición del equipo de adquisición por el método de MASW y el registro sísmico obtenido.

2.2. Procesamiento de datos

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 y 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 arreglo MASW son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles V_s en una dimensión (1D), para ello se considera como parámetros de entrada la profundidad (30 m) y el número de capas (15 capas). Finalmente, los perfiles V_s son promediados obteniendo un perfil unidimensional final para cada línea sísmica. Todo este procedimiento permite a través de una línea sísmica obtener un perfil 1D ubicada en la parte media de dicha línea. Los resultados al ser analizados proporcionan información útil sobre las características físicas del subsuelo (Park, 2014; Roma, 2010;

Socco et al., 2008). El procesamiento fue realizado en el programa de computación SeisImager.

En la Figura 15, se muestra un ejemplo de los resultados que se obtiene a partir del arreglo MASW. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y a la derecha el perfil de velocidad de ondas de corte V_s (línea verde). En esta último, se considera 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 a profundidad). Esta curva permite verificar el nivel de confiabilidad o la profundidad mínima y máxima de investigación (área sombreada), en este caso; el perfil presenta una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad es de 2 a 30 metros de profundidad.

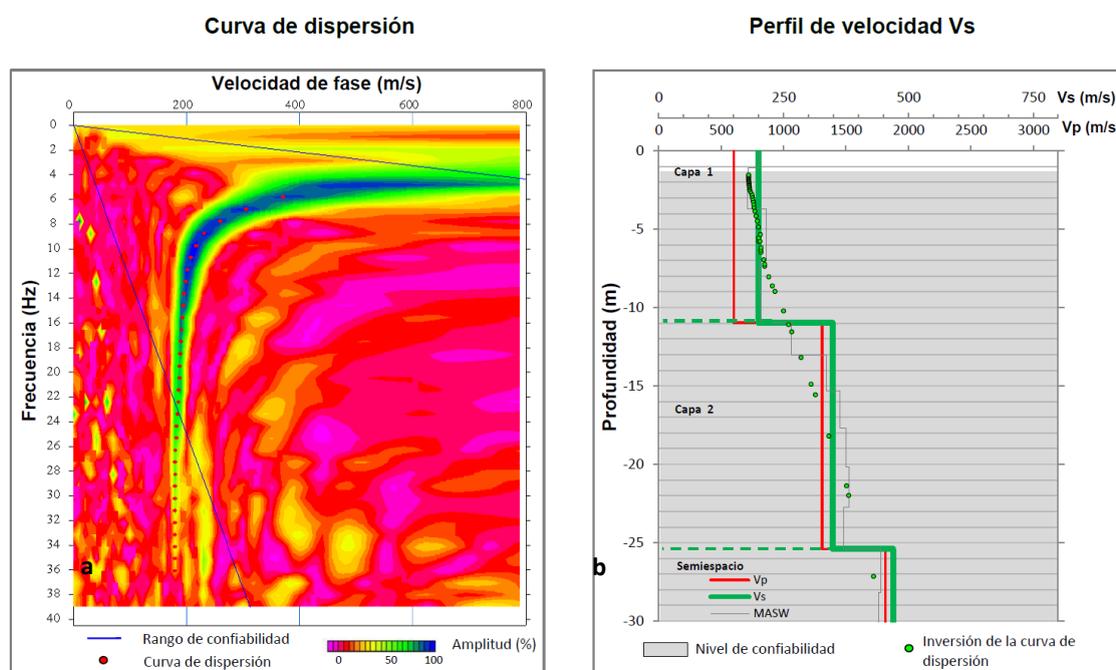


Figura 15: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir de la técnica de MASW.

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este ítem se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030-2018. En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionalmente. Asimismo, esta nueva clasificación del perfil del suelo es representado con colores (Tabla 2).

Tabla 2: 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	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	Roca dura

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

2.3. Análisis y resultados

Los modelos de velocidad de propagación (Vs) es información muy útil para el desarrollo de riesgo sísmico y reconocimiento general de la estructura y naturaleza del subsuelo. El procesamiento de los registros sísmicos permitió llegar a profundidades hasta los 30 metros para cada línea sísmica. A continuación se describe los resultados obtenidos para cada línea, agrupadas según similitud de valores de velocidad Vs y ubicación geográfica.

Líneas sísmicas LS03-CS, LS09-CS, LS10-CS y LS11-CS: Registrados en la Urb. Miraflores (LS03), en los AA.HH. Chiclayito (LS09), Las Montero (LS10) y al frente de la I.E. Ramón Castilla (LS11) (Figura 12). En todos ellos se identifica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 2 a 7 metros de espesor y velocidades Vs entre 182 a 215 m/s; la segunda capa, con 12 a 16 metros de espesor y velocidades Vs varían entre 265 a 322 m/s; ambas capas presentaron suelos moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs > 387 m/s, lo cual sugieren la presencia de suelos rígidos.

Línea sísmica LS01-CS: Realizada al norte en el A.H. Miraflores (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 260 m/s y la segunda capa de 12 metros de espesor y velocidades Vs de 335 m/s; en ambas capas existirían suelos moderadamente rígidos.

La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 473$ m/s, lo cual sugieren la presencia de suelos rígidos.

Línea sísmica LS02-CS: Realizada en el A.H. Miraflores (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por una capa sísmica de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 188 m/s; que junto a la superficie de contacto con el semiespacio ($V_s > 275$ m/s), sugieren la presencia de suelos moderadamente rígidos.

Líneas sísmicas LS04-CS y LS06-CS: Distribuida en el A.H. Primavera (LS04) y en el sector Nuevo Amanecer (LS06) (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 9 a 11 metros de espesor y velocidades V_s entre 192 a 199 m/s; la segunda de 11 a 14 metros de espesor y velocidades V_s entre 304 a 348 m/s; ambas capas presentan suelos moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 425$ m/s, lo cual consideran suelos rígidos.

Líneas sísmicas LS07-CS y LS08-CS: Realizadas en el sector Alto el Gallo (LS07) y al frente de la I.E. Fe y Alegría (LS08), (Figura 12). Indican la presencia de suelos conformados por una capa sísmica de 5 a 7 metros de espesor y velocidades V_s entre 195 a 280 m/s, que junto a la superficie de contacto con el semiespacio ($V_s > 233$ m/s), sugieren la presencia de suelos moderadamente rígidos.

Línea sísmica LS05-CS: Realizadas en el A.H. Valle la Esperanza (Figura 12). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 9 metros de espesor y velocidades V_s de 209 m/s que corresponden a suelos moderadamente rígidos y la segunda 14 metros de espesor y velocidades V_s de 359 m/s que sugiere la presencia de suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio con velocidad de $V_s > 531$ m/s que correspondería a suelos muy rígidos.

En la Tabla 3, se resume los valores de velocidades de ondas de corte (V_s) obtenidas para los distintos tipos de suelo y en la Figura 16, los resultados obtenidos para la línea sísmica LS01. Para las otras líneas, ver Anexos.

Tabla 3: Valores de espesor y Vs de los perfiles sísmicos obtenidos para el área urbana de Castilla mediante el arreglo lineal 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-CS	260	4	335	12	473	-	364
LS02-CS	188	4	275	-	-	-	257
LS03-CS	215	7	322	13	472	-	307
LS04-CS	192	9	304	11	425	-	279
LS05-CS	209	9	359	14	531	-	303
LS06-CS	199	11	348	14	470	-	282
LS07-CS	195	5	270	-	-	-	243
LS08-CS	280	7	233	-	-	-	234
LS09-CS	182	2	304	15	412	-	315
LS10-CS	200	4	265	12	387	-	292
LS11-CS	197	4	278	16	449	-	298

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

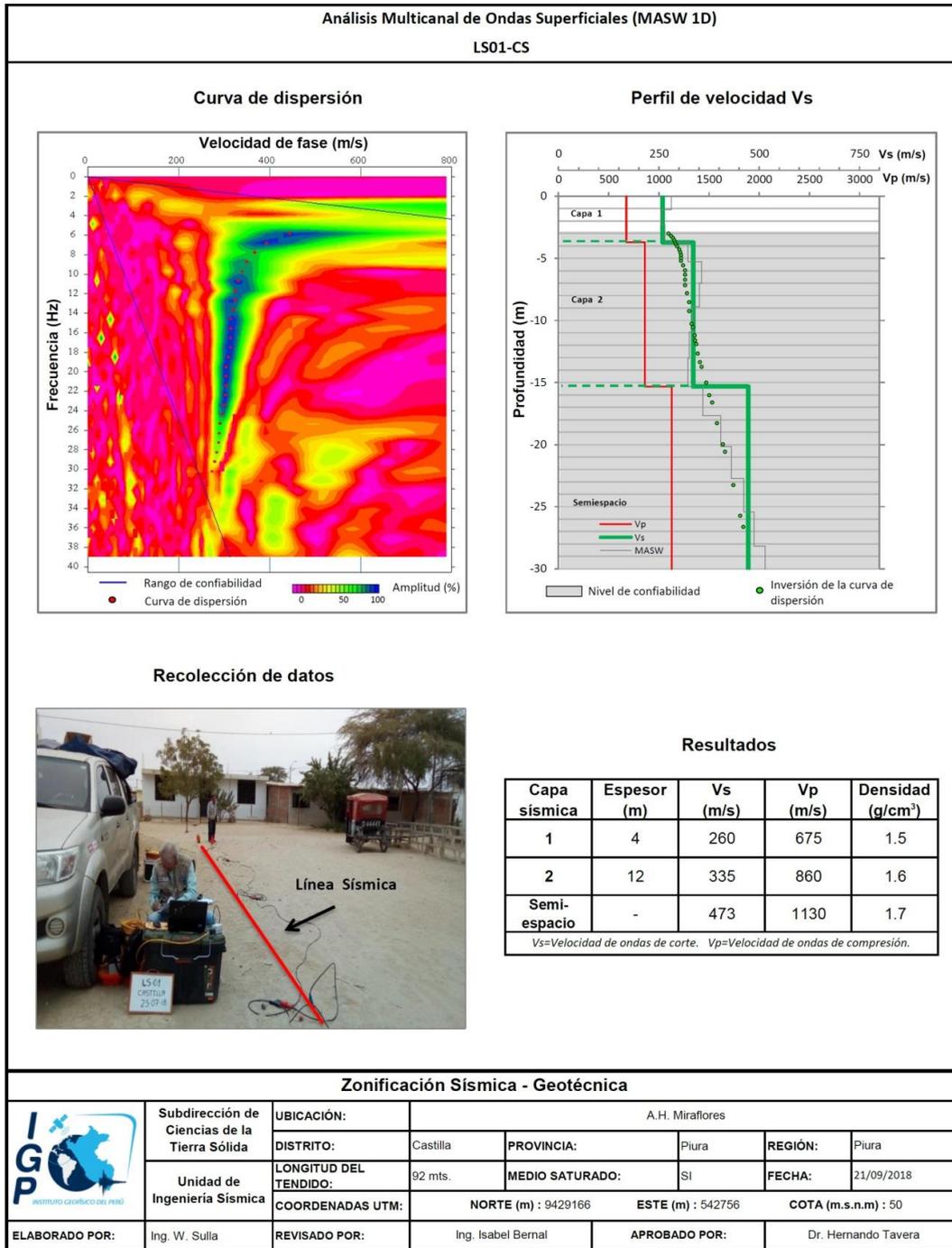


Figura 16: Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico LS01-CS.

En general, los resultados obtenidos definen principalmente la existencia de 2 capas sísmicas y un semiespacio (Tabla 3) y su correlación con la geología local descrita a continuación:

El área de estudio, ubicada en la margen izquierda del río Piura, presenta suelos moderadamente rígidos superficiales conformados por uno o dos capas sísmicas de gran espesor conformadas en algunos sectores superan los 30 metros.

En los sectores próximos y a lo largo del río Piura (Figura 17), los suelos presentan espesores que varían entre 16 a 30 metros, estando los de mayor espesor en el extremo noroeste (LS02). Conforme se avanza a la parte central del distrito (Cercado), el espesor de estos suelos varía entre los 20 a 25 metros y hacia el sector sur (Alto el Gallo y por el A.H. el Indio), los suelos superan los 30 metros de espesor. Por otro lado, hacia la dirección del A.H. Valle la Esperanza, el espesor de las capas decrece hasta los 9 metros.

Por debajo de la capa superficial, los suelos rígidos (V_s 359 a 472 m/s) estos emplazados en toda el área de estudio, siendo en el Sector Alto el Gallo y el A.H. El Indio donde alcanza mayores profundidades (>30 metros). Por otro lado, los suelos rígidos son más superficiales hacia el A.H. Valle la Esperanza, ver Figura 17.

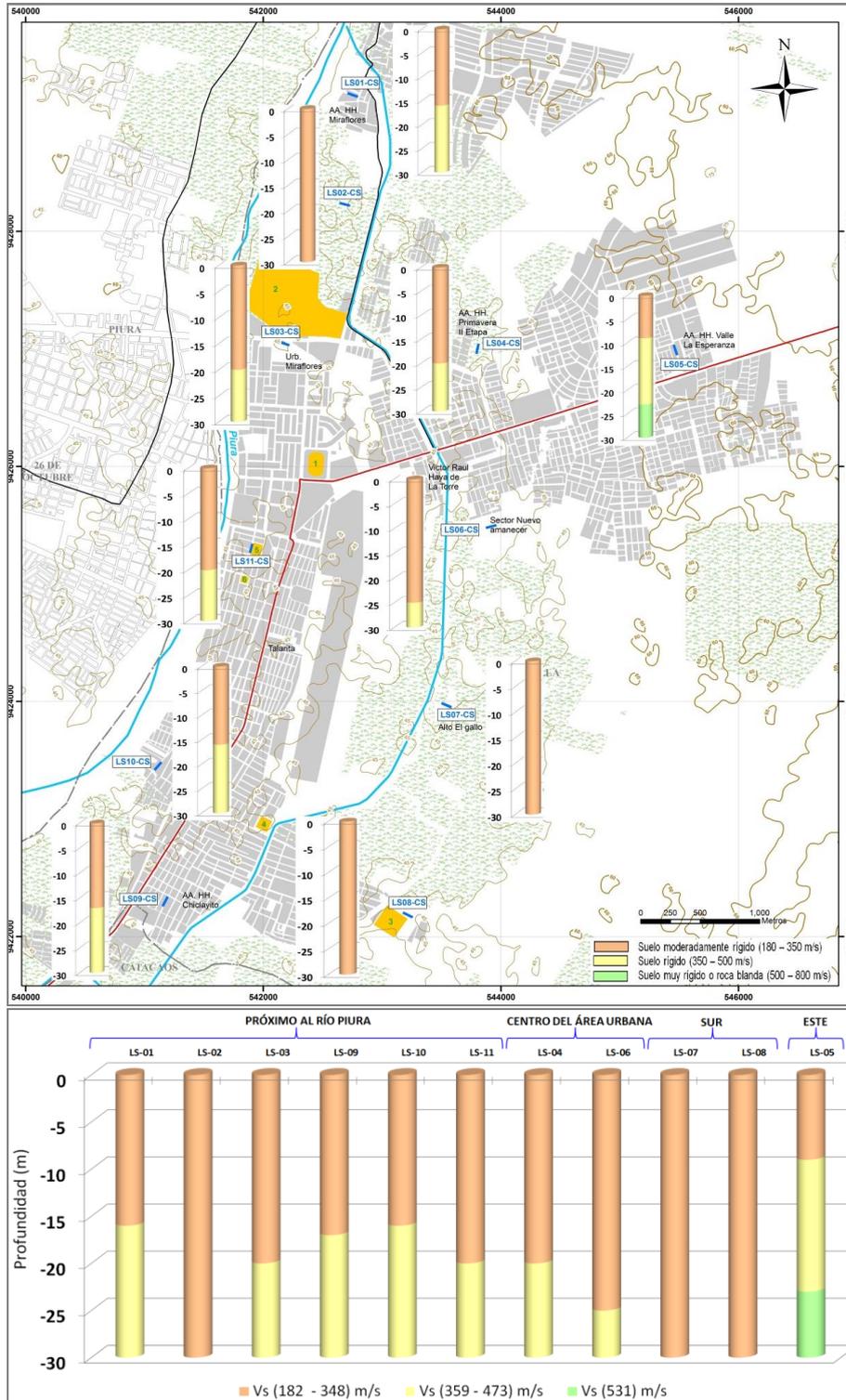


Figura 17: Variación de espesores de los suelos moderadamente rígidos en el área urbana de Castilla.

Geológicamente, en toda el área de estudio existe la presencia de depósitos de arenas eólicas (Figura 18) y depósitos fluviales distribuidos mayormente próximos al río Piura. Se presume que ambos depósitos se encuentran emplazados sobre rocas de tipo areniscas que corresponden a la Formación Zapallal. Esta última aflora al norte del área de estudio y la poca profundidad en el A.H. Valle la Esperanza.



Figura 18: Suelos constituidos de depósitos de arenas (Urb. Miraflores).

3. Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua, sales disueltas presentes en las fracturas de las rocas y en la porosidad del suelo.

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), que están conectados a un milivoltímetro donde se medirá, cual es la diferencia de potencial eléctrica ΔV entre esos dos puntos (Figura 19).

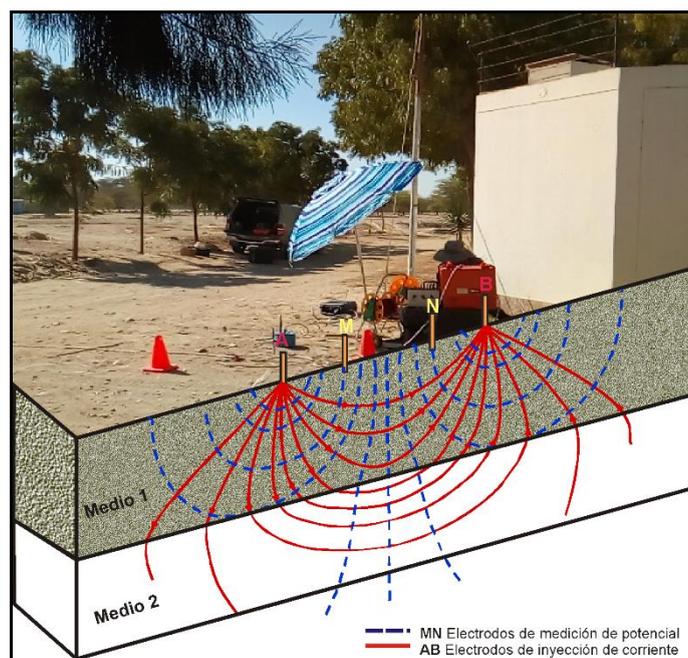


Figura 19: Principio del método de resistividad (LE01-CS).

En general, la profundidad de investigación depende de la separación entre electrodos. Por ejemplo, con una separación de electrodos de 1 metro, se tendríamos una profundidad de observación 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.

3.1. Adquisición de datos

Para el registro de información se utilizó un equipo de Resistividad/IP Syscal Pro de marca Iris Instruments, cables y accesorios. En el área de estudio se han realizado 10 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 30 electrodos (Figura 20). Para cada línea se consideró el espaciamiento de 10 metros entre electrodo, sobre un tendido longitudinal que variaba de 170 y 290 metros; lo cual permitió tener un alcance en profundidad, del orden de los 39 metros.

En la Tabla 4, se muestra las coordenadas UTM (WGS84) de cada línea eléctrica para los puntos extremos.

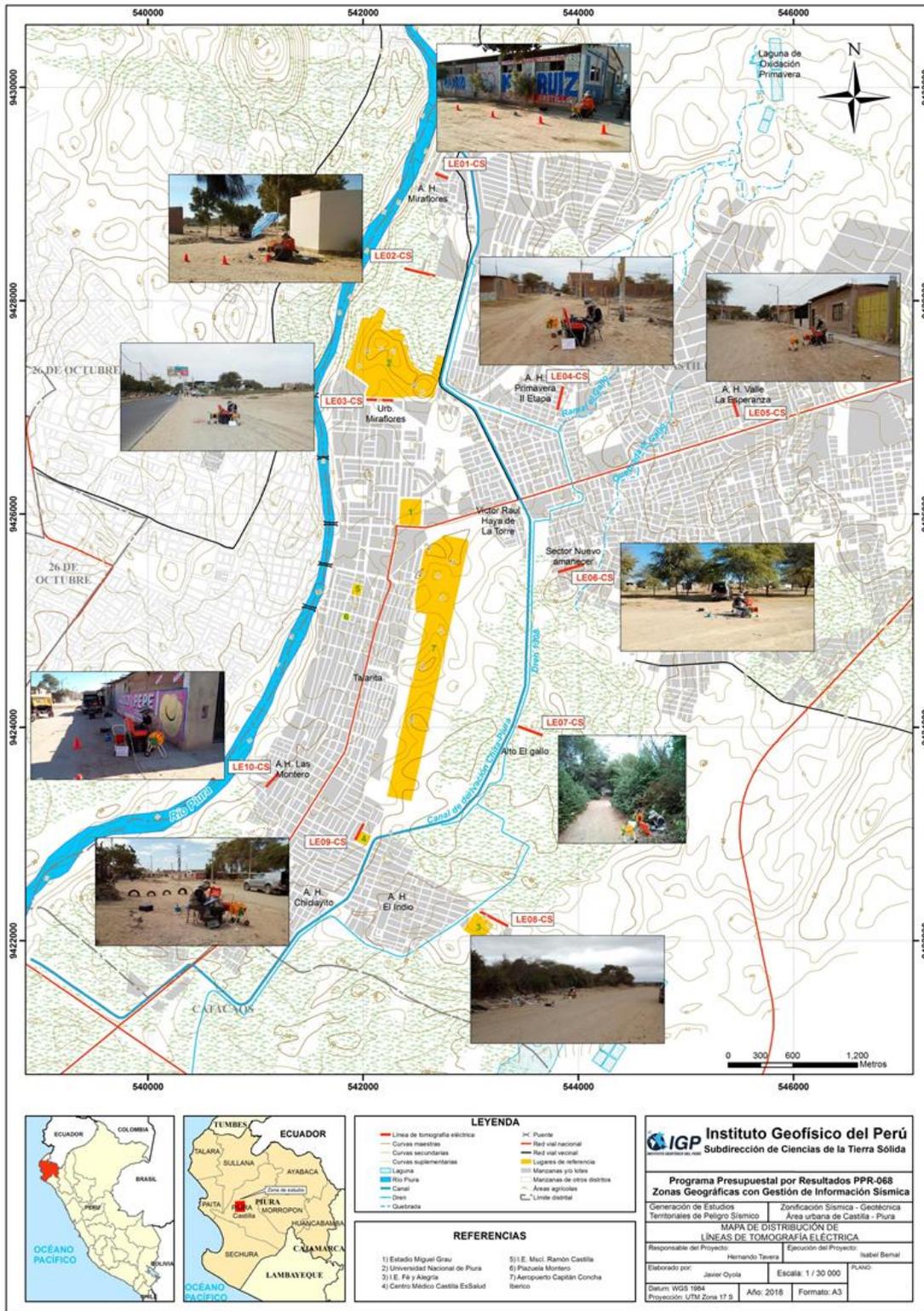


Figura 20: Mapa de la ciudad de Castilla y distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-CS,... LE10-CS.

Tabla 4: Coordenadas de las Líneas eléctricas (LE) realizados en la ciudad de Castilla.

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01- CS	542670	9429192	37	10	120
	542789	9429146	39		
LE02- CS	542382	9428304	32	10	290
	542668	9428232	31		
LE03- CS	542029	9427074	36	10	240
	542279	9427065	34		
LE04- CS	543858	9427198	31	10	240
	543806	9426977	31		
LE05- CS	545431	9427088	41	10	170
	545487	9426911	44		
LE06- CS	544053	9425529	29	10	240
	543810	9425456	30		
LE07- CS	543436	9424011	35	10	240
	543668	9423926	32		
LE08- CS	543085	9422275	32	10	290
	543348	9422136	34		
LE09- CS	542005	9423099	32	10	160
	541926	9422944	33		
LE10- CS	541212	9423573	29	10	170
	541096	9423440	30		

La calidad de la señal eléctrica en cada registro, fue evaluada mediante un test de resistencia de contacto entre los electros y el terreno, garantizando de este modo, la obtención de datos confiables para el procesamiento. Se busca mejorar las imágenes con el uso de filtros que disminuyen 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 de los datos mediante la comparativa de los dos valores de resistividad, siendo los más fiables aquellos con menores diferencias. Se consideran los siguientes criterios:

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

En la Figura 21, se muestra la disposición del equipo eléctrico en campo, así como un ejemplo del análisis preliminar realizado al registro obtenido.

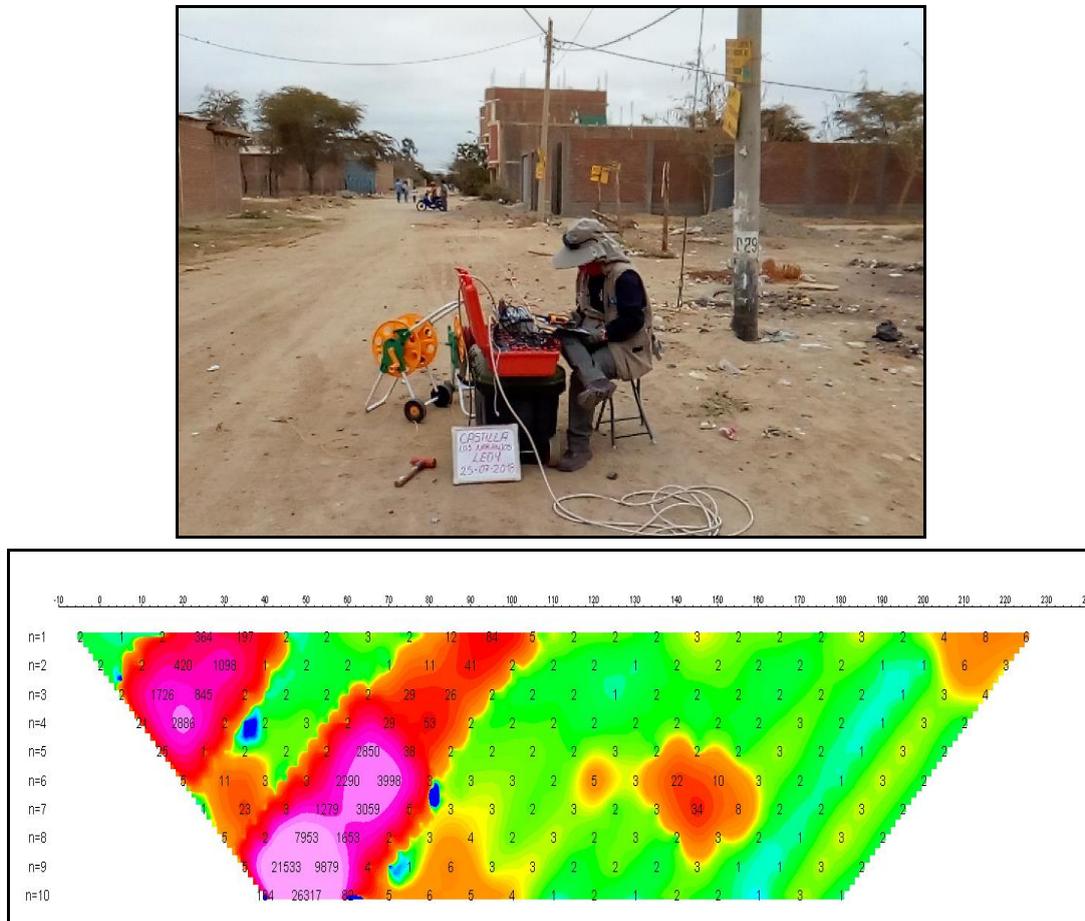


Figura 21: Adquisición de datos para la línea LE04-CS. Arriba esta la disposición del equipo de resistividad en el A.H. Primavera II etapa. Abajo, el registro obtenido de campo.

3.2. Procesamiento de datos

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

Finalmente, los resultados son presentados en Secciones de Resistividad 2D (Resistividad) para relacionar 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. Para el procesamiento de la información se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ.

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

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

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

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

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

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

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

Para el presente estudio, los rangos de resistividades han sido resumidos, según la Tabla 5.

Tabla 5: Rango de Resistividades

Rango de resistividades	ohm.m	Tipo de suelo	
Material muy resistivo	> 1500	Suelo desértico o roca	
Material resistivo	500 a 1500	Suelo seco	
Material medianamente resistivo	100 a 500	Húmedo	
Material bajo resistivo	20 a 100	Parcialmente saturado	
Material muy bajo resistivo	< 20	Saturado y/o presencia de sal	

Dado la estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible ubicar las áreas de filtración y las zonas saturadas del subsuelo. En tal sentido, se puede decir que al haber incrementos de fluidos en el terreno, estos se verán reflejados por una disminución en valores de resistividad.

3.3. Análisis y resultados

Los valores de resistividad del suelo son una información muy útil puesto que permite identificar aquellos suelos que presentan alto contenido de humedad y la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático. En este estudio realizaron 10 líneas de tomografía eléctrica distribuidas según la Figura 20. El procesamiento de la información permitió llegar desde el nivel superficial hasta una profundidad de 40 metros.

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada línea de tomografía eléctrica realizadas en el área urbana de Castilla.

Las líneas eléctricas LE01-CS y LE03-CS, realizadas por la Plazuela Montero presentan predominio de valores muy bajo resistivos ($<20 \Omega.m$), asociados a la presencia de depósitos fluviales saturados por la influencia del río Piura y por el canal de derivación Chira –Piura. Ambas fuentes se encuentran en los extremos de las líneas. Asimismo, esta la presencia de terrenos agrícolas en las cercanías (Figura 22).

Las línea eléctrica LE02-CS, realizada cerca de la Plazuela Montero presenta valores medianamente resistivos ($>100 \Omega.m$) en superficie asociados a la mayor compactación de las arenas y limos; y por ende la ausencia de humedad. A mayor profundidad, los suelos se encuentran saturados.

Las líneas eléctricas LE04-CS, LE05-CS y LE06-CS, realizadas al este de la Plazuela Montero: A.H. Primavera II Etapa, Valle La Esperanza y Nuevo Amanecer (Figura 20).

- LE04-CS y LE05-CS, realizadas sobre depósitos eólicos, presentan predominio de valores muy bajo resistivos ($<20 \Omega.m$), asociados a la proximidad del Dren 1308 y las zonas de inundación (Figura 23).

- LE06-CS, presenta valores medianamente resistivos ($>100 \Omega.m$) en la parte superior asociados a material de relleno presente en la zona. Por debajo de esta capa, se identifica la presencia de materiales saturados ($<20 \Omega.m$), debido a su proximidad al Dren 1308 (Figura 23).

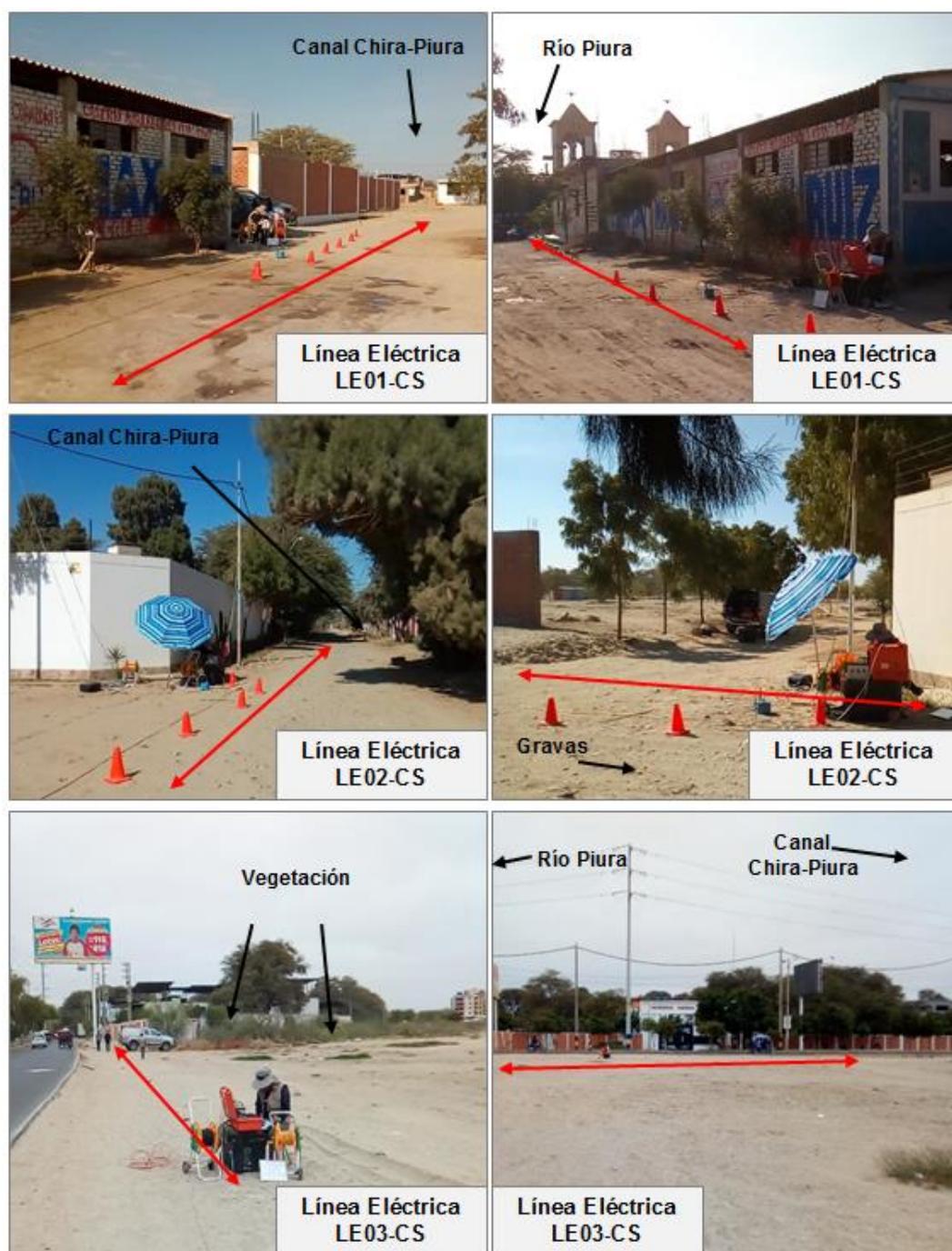


Figura 22: Vista de la línea eléctrica LE01-CS, LE02-CS y LE03-CS.

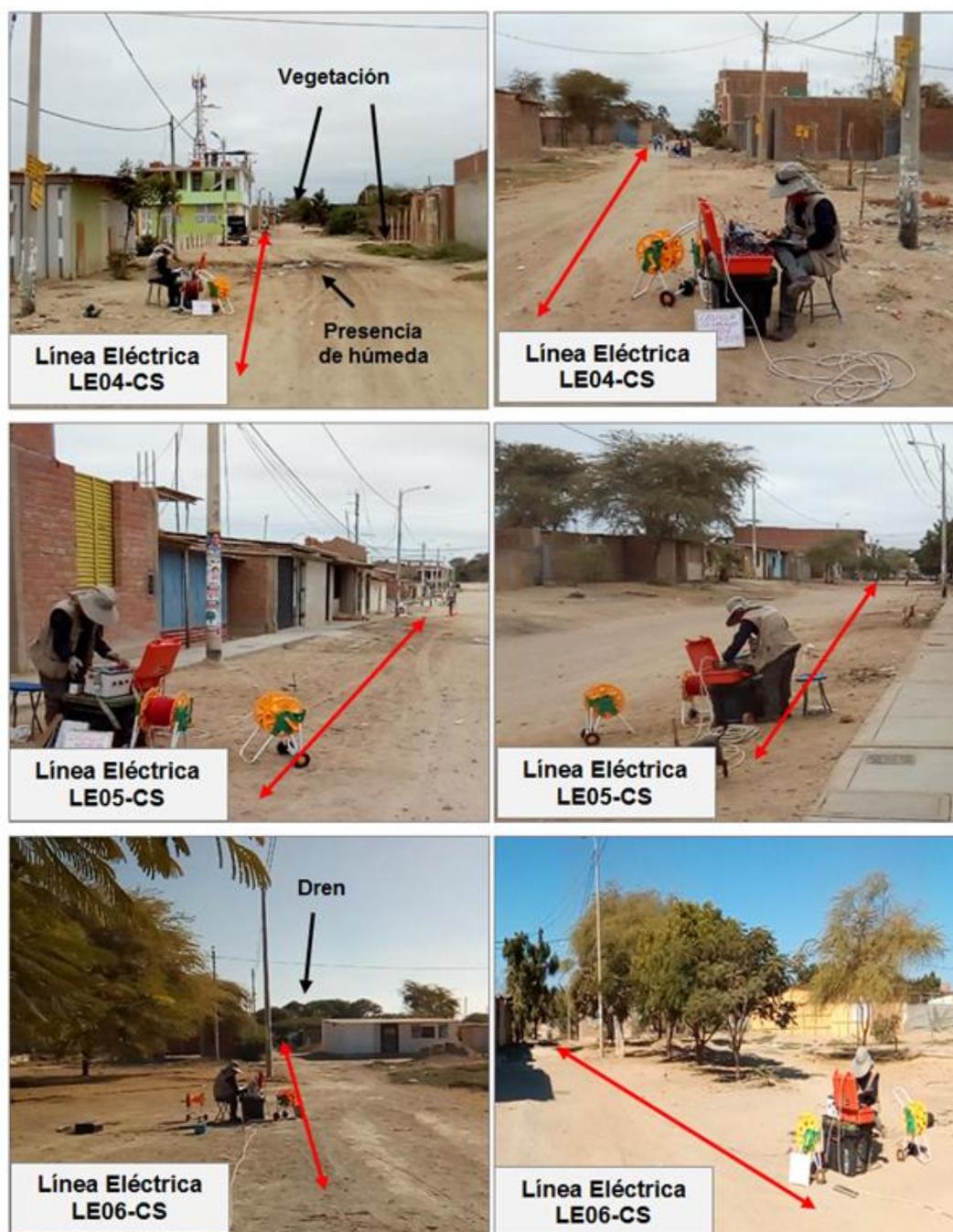


Figura 23: Vista de las líneas eléctrica LE04-CS, LE05-CS y LE06-CS.

La Línea eléctrica LE10-CS, realizada en el A.H. Las Montero, predominan valores muy bajo resistivos ($<20 \Omega.m$) debido a la presencia de arenas y limos saturados por su proximidad al río Piura. Esta zona es afectada frecuentemente por inundaciones, (Figura 24).

Las líneas eléctricas LE07-CS, LE08-CS y LE09-CS, realizadas al sureste de la Plazuela Montero (Figura 20), Alto el Gallo, frontis del colegio Fe y Alegría y en la calle Quiñones (costado del centro médico de Castilla).

- LE07-CS y LE09-CS, sugieren el predominio de valores muy bajo resistivos ($<20 \Omega.m$). En el caso de la primera línea, los valores están asociados a la presencia de arenas saturadas debido a su proximidad con el Dren 1308 y a terrenos de cultivo. En la segunda línea, se tiene valores asociados a su proximidad al canal de derivación Chira-Piura, que hace que los limos y arcillas presentes en esta zona tengan gran contenido de humedad (Figura 25).

- LE08-CS, presenta valores medianamente resistivos ($>100 \Omega.m$) al nivel de la superficie asociados a la compactación del suelo y a la ausencia de saturación para los primeros 10 metros. En profundidad, se tiene presencia de materiales saturados debido a la filtración del Dren 1308 (Figura 25).

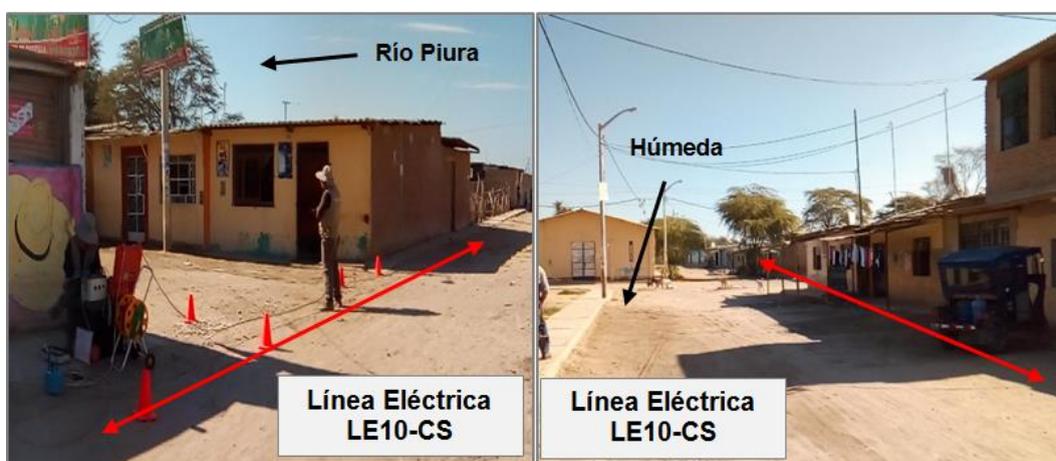


Figura 24: Vista de la línea eléctrica LE10-CS.



Figura 25: Vista de las líneas eléctrica LE07-CS, LE08-CS y LE09-CS.

En la Tabla 6, se muestra los valores de profundidad de saturación del medio y en la Figura 26, los resultados obtenidos para la línea LE01–CS. Para las líneas restantes, ver Anexos.

Tabla 6: Profundidad del medio saturado en el área urbana de Castilla.

Línea Eléctrica	Profundidad de saturación (m)	Material
LE01-CS	3	Arena mal graduada con limo
LE02- CS	10	Arena limosa
LE03- CS	3	Arena mal graduada con limo
LE04- CS	3	Arena mal graduada
LE05- CS	3	Arena mal graduada
LE06- CS	10	Arena mal graduada
LE07- CS	3	Arena mal graduada
LE08- CS	10	Arena mal graduada
LE09- CS	3	Arena arcillosa con limo
LE10- CS	3	Arena mal graduada con limo

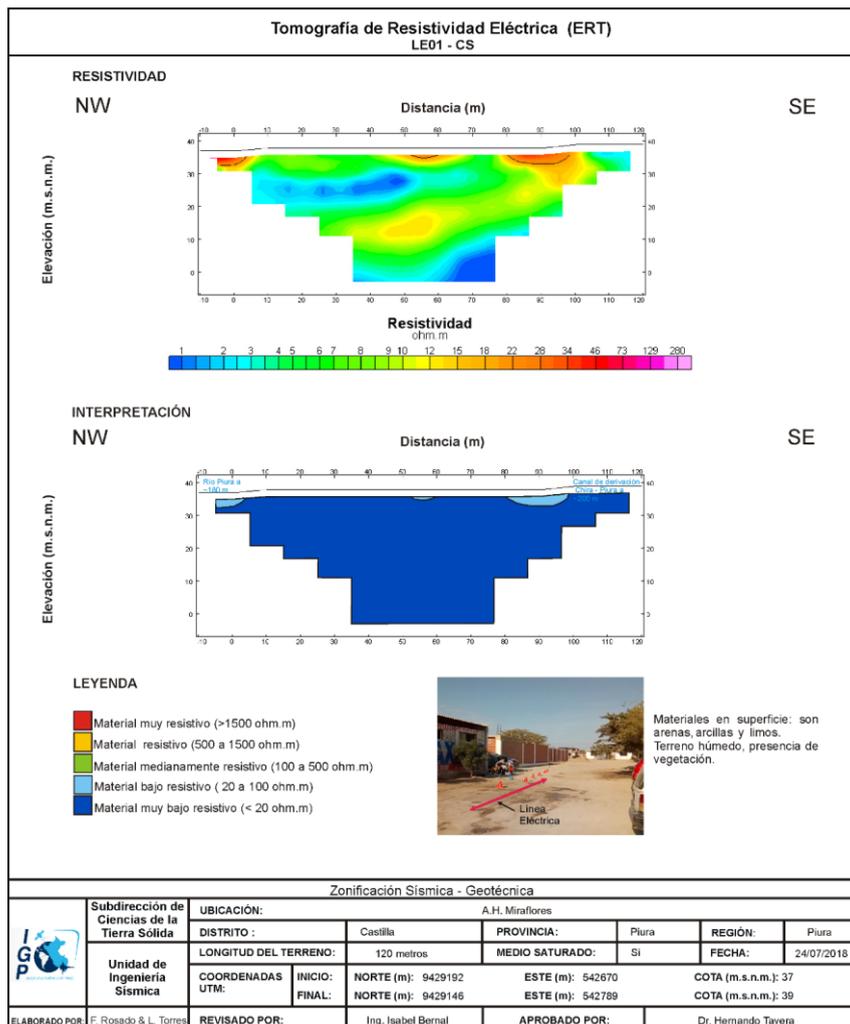


Figura 26: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-CS

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el área urbana de Castilla predominan los medios saturados debido a la influencia del río Piura, al canal de derivación Chira-Piura y a la presencia de Drenes. Asimismo, es continua la presencia de zonas inundables debido a la falta de sistema de drenaje.

En las direcciones norte, noreste y sureste de la plazuela Montero (LE02-CS, LE06-CS y LE08-CS), los medios saturados se presentan a 10 metros de profundidad; a diferencia del resto de la ciudad donde son más superficiales (3 metros). Esta diferencia se debe a que los suelos en estas líneas son más compactos en superficie (LE02-CS, LE08-CS) y la presencia de materiales de relleno (LE06-CS).

Geológicamente, la ciudad de Castilla se encuentra sobre depósitos aluviales, fluviales y eólicos que por sus características (material no consolidado), pueden almacenar agua subterránea.

Según estudios realizados por INDECI y OEA (2009), en la ciudad de Castilla, los suelos saturados predominan a partir de los 3 metros, resultados coherentes con los obtenidos en este estudio.

4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA- GEOTÉCNICA

El mapa de zonificación sísmica - geotécnica se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos con los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, contenidos en el presente informe. Asimismo, se considera los aportes de la Norma de Construcción Sismorresistente E.030.

4.1. Integración de resultados

El área urbana de Castilla se emplaza sobre una superficie casi plana debido a la presencia de ligeras ondulaciones en algunos sectores. Las áreas con cota mayor a 40 m.s.n.m. se encuentran distribuidas hacia su extremo noreste (A.H. Valle la Esperanza) y las menores cotas emplazadas principalmente hacia el oeste (próximo al río Piura). Algunas depresiones principales se identificaron al sureste del aeropuerto y al norte de la Universidad Nacional de Piura.

*- **Periodos Dominantes:** 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 27, se muestra la distribución espacial de los valores de periodos para el área urbana de Castilla.*

En dirección norte se presentan, de manera local, periodos de 0.1 y 0.2 segundos en algunos puntos; sin embargo, los periodos dominantes en la zona de estudio son de 0.3 y 0.4 segundos. Periodos de 0.5 segundos se presentan de manera aislada por el A.H. Primavera II etapa. Asimismo, el 19% de la zona de estudio presenta sensibilidad a periodos de 0.6 a 0.8 segundos, principalmente en dirección este y sureste. Las mayores amplificaciones en ambos grupos, se presentan por el sector Nuevo Amanecer, A.H. Primavera II Etapa y al norte de la Universidad Nacional de Piura.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de Castilla, están relacionados con sus condiciones físico-dinámicas a través de la relación $To=4H/Vs$, donde To es el periodo dominante, (H) el espesor del estrato y (Vs) es la velocidad de onda de corte. Asumiendo, velocidades de 300 m/s y 350 m/s

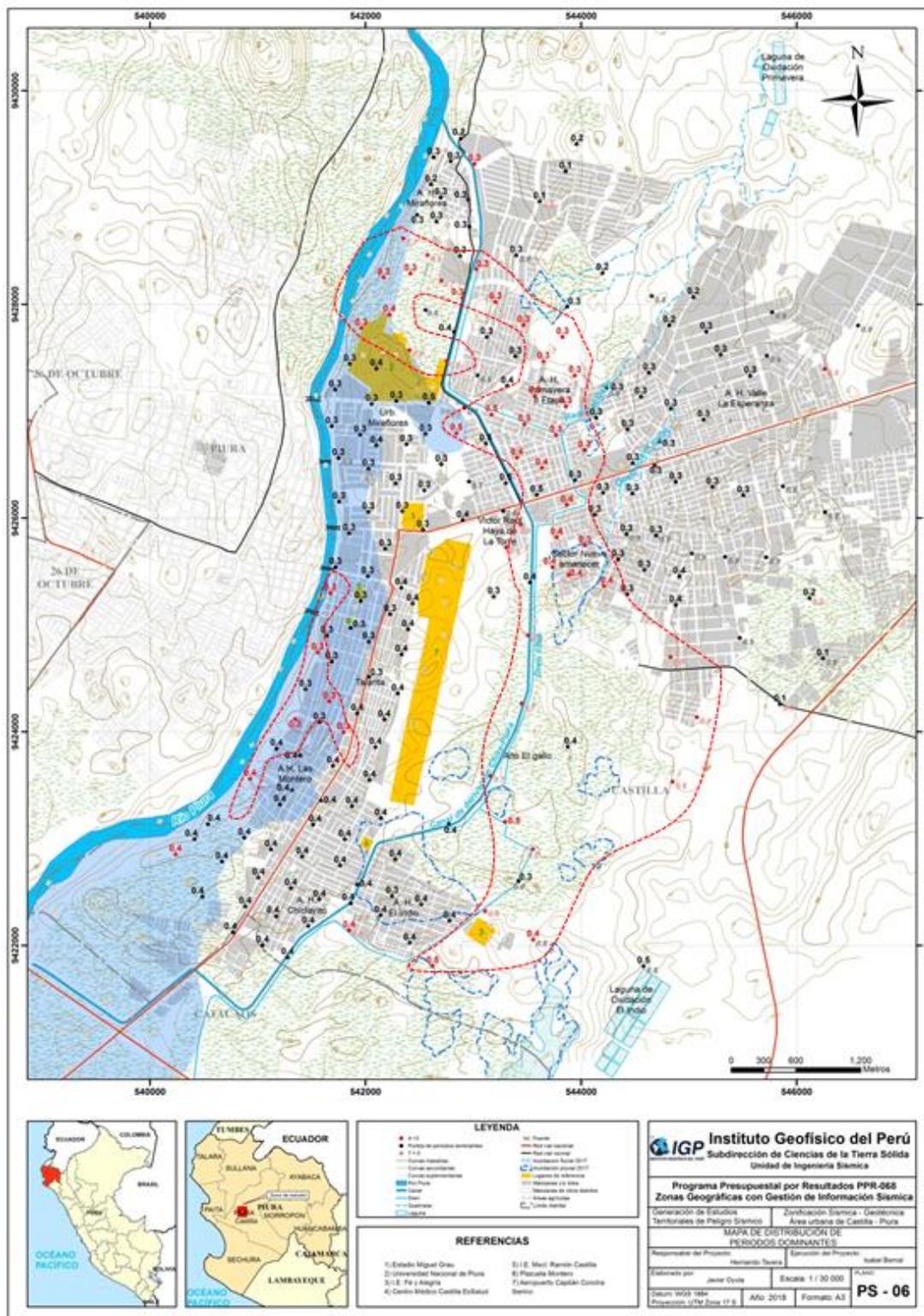


Figura 27: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 y 0.4 segundos, se estima la existencia de una capa superficial con espesores de 25 a 30 metros, evidenciándose los mayores espesores hacia el sur y sur oeste del área de estudio. Además, se identifica la presencia de mayores espesores para capa sedimentaria (60m), donde hay presencia de periodos largos (0.6 y 0.8s). Estos espesores no han sido confirmados con los modelos de velocidad obtenidos con los arreglos sísmicos, por ser muy profundos.

En la Figura 28, se compara dos imágenes satelitales obtenidos en años 2005 y 2018 para el área urbana de Castilla. Inicialmente es importante observar que el área urbana está rodeada de campos de cultivo, escenario que cambio con la presencia del A.H. Primavera. En estas áreas los suelos presentan gran amplificación (Figura 27).

Según el comportamiento dinámico del suelo (periodos dominantes), en la ciudad de Castilla existe una capa superficial 15 a 25 metros de espesor compuesto por suelos moderadamente rígidos. Por debajo, estarían presentes suelos rígidos cuyos espesores superan la profundidad investigada (30 metros). Por otro lado, la presencia de medios saturados predomina en el área de estudio a partir de los 3 metros de profundidad, esto es debido a la influencia del río Piura y en épocas de lluvia, por la activación de la quebrada El Gallo y sus ramales (Figura 27). En escenarios críticos las zonas con depresión llegan a inundarse y la topográfica no facilita el drenaje, provoca que la húmeda se conserve en el lugar.

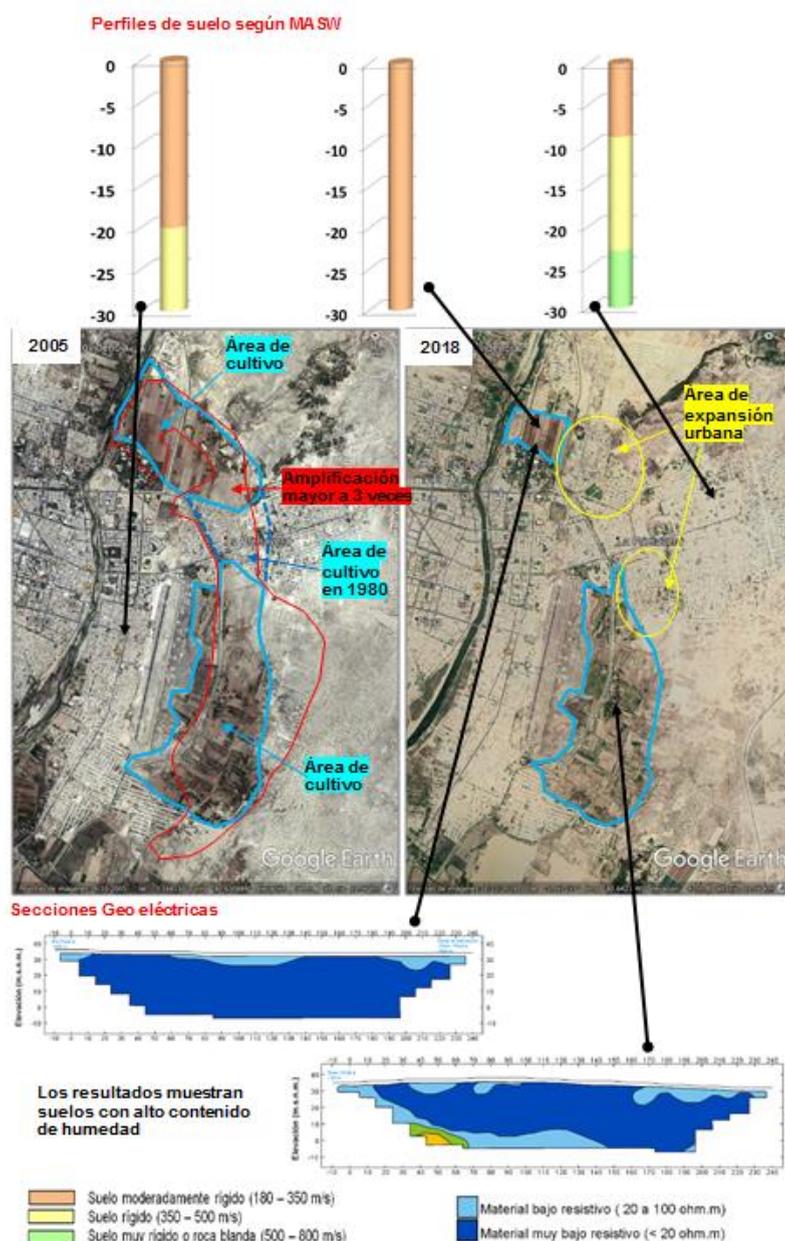


Figura 28: Área de cultivo observado en las imágenes de satélite para los años 2005 y 2018.

En el área de estudio, también se identifica áreas cuyos suelos responden a periodos largos con valores que fluctúan entre 0.5, 0.6 y 0.8 segundos: Universidad de Piura, A.H. Miraflores, los sectores próximos al canal de derivación Chira – Piura, al Dren 1308, por el sector Alto El Gallo y al este del A.H. El Indio (Figura 27). En estas áreas, por estar cerca al canal y Dren, presentaran variados niveles de contenido de humedad.

El análisis de amplificación sísmica del suelo es valioso puesto que, durante la ocurrencia de un evento sísmico, es el efecto de sitio de mayor importancia. Dentro de

este contexto en las Figuras 27 y 28 se muestran los periodos predominantes con amplificaciones mayores a 3 veces (color rojo), entonces los mayores sacudimientos de suelos durante un sismo son: Universidad de Piura y los AA.HH. Miraflores, Primavera, sectores Víctor Raúl Haya de la Torre y Nuevo Amanecer, de manera local en sector El Gallo, al este del A.H. El Indio y próximo al río Piura (sector Talarita).

La caracterización física y dinámica del suelo permitió identificar su complejidad; es decir, al estar el suelo constituido por arenas poco consolidadas y a la existencia del nivel freático en superficie debido a lluvias intensas y/o el Fenómeno El Niño. Asimismo, estas conclusiones permiten que baje la capacidad de carga admisible del suelo y con ello aumente la probabilidad de generarse mayores amplificaciones y procesos de licuación de suelos. Por lo tanto, es necesaria e indispensable que esta información sea considerada como base para nuevos proyectos de GRD y para toma de decisiones por parte de las autoridades.

4.2. Mapa de Zonificación Sísmica

El mapa de Zonificación sísmica-geotécnica para el área urbana de Castilla, se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos con los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, delimitando zonas cuyos suelos presentan características de respuesta similares ante la ocurrencia de un sismo. Las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas, han permitido identificar en el área de estudio, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S2, S3 y S4. Estos tipos de suelos corresponden a las Zonas II, III y IV respectivamente.

Para el área urbana de Castilla, se propone la siguiente zonificación sísmica-geotécnica (Figura 29).

- **ZONA II:** Conformado por suelos más consolidados del área de estudio, caracterizado por arenas de origen marino (depósitos eólicos). Asimismo, depósitos aluviales y fluviales identificados en la margen izquierda del río Piura hasta el Aeropuerto, constituidos por arenas y limos de origen sedimentario. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte V_s de 210 m/s para la capa superficial hasta 400 m/s a la profundidad investigada de 30 metros (V_s promedio). El periodo de vibración natural varía principalmente entre 0.3 y 0.4 segundos, tiene un comportamiento medianamente rígido y es considerado

como suelos Tipo S2 según la norma sismoresistente peruana. Además presenta suelos con capacidad de carga admisible de 1 a 2 Kg/cm² hasta 1.0 metro de profundidad. Esta zona comprende el 80 % del área de estudio que se emplaza, desde el río Piura hacia el este.

En la Figura 29, las líneas inclinadas de color negro, delimitan áreas de muy baja amplificación presentes en el sector noreste del área de estudio (A.H. Valle la Esperanza), lo que sugiere que los estratos de suelo muestran mayor consistencia en profundidad y por lo tanto, bajos niveles de sacudimiento durante la ocurrencia de un evento sísmico.

Asimismo en la Figura 29, las líneas inclinadas de color verde, delimitan áreas que responden a periodos entre 0.1 a 0.2 segundos; y según el perfil obtenido, se tiene suelos moderadamente rígidos con baja capacidad de carga admisible a un metro de profundidad. En esta área se sugiere realizar una investigación geofísica más detallada.

- **ZONA III:** Conformada por suelos consolidados, y constituidos por estratos de arenas con limos (depósitos eólicos). Presenta, velocidades de ondas de corte Vs de 188 m/s para la capa superficial hasta 275 m/s a la máxima profundidad investigada (30 metros). Tiene un comportamiento medianamente rígido, pero el periodo de vibración natural varía entre 0.5 a 0.8 segundos. Considerando que el nivel freático es superficial, se clasifica como suelos Tipo S3 según la norma sismoresistente peruana. Presenta suelos con capacidad de carga admisible entre 1 a 2 Kg/cm² hasta 1.0 metro de profundidad. Esta zona comprende las áreas entre la Universidad de Piura y el A.H. Miraflores, los sectores próximos al canal de derivación Chira – Piura, al Dren 1308, por el sector Alto El Gallo y al este del A.H. El Indio.

- **ZONA IV:** Esta zona está conformada por suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales; por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4 de la norma sismoresistente peruana y se subdivide en:

- **Zona IVa:** Constituida por depósitos fluviales y aluviales con alto contenido de humedad o saturados y en algunos sectores cubiertos por limos, emplazados próximo al río Piura. Esta zona se extiende desde A.H. Miraflores sobre una franja delgada, que conforme se dirige hacia el suroeste, abarca

mayor área (A.H. Las Montero). Esta zona presenta baja capacidad de carga admisible (1.0 Kg/cm²). Asimismo, pueden generarse procesos geodinámicos externos como inundaciones, procesos de licuación y mayores sacudimientos del suelo durante la ocurrencia de un evento sísmico.

En las Zonas II y III, las líneas inclinadas de color rojo delimitan áreas donde los suelos presentan amplificaciones relativas mayores a 3 veces, lo que sugiere que presentarían mayores sacudimientos a la ocurrencia de un sismo: Universidad de Piura y el A.H. Miraflores, Primavera, por los sectores Víctor Raúl Haya de la Torre y Nuevo Amanecer, de manera local por el sector El Gallo, al este del A.H. El Indio y próximo al río Piura (sector Talarita).

Finalmente, en la Figura 29, se muestra los niveles de inundación pluvial y fluvial originados por el fenómeno El Niño del año 2017 (trazo azul discontinuo): AA.HH. Las Montero, por la Universidad de Piura, el sector Nuevo Amanecer, El Indio, entre otros (Castro et. al. 2018).

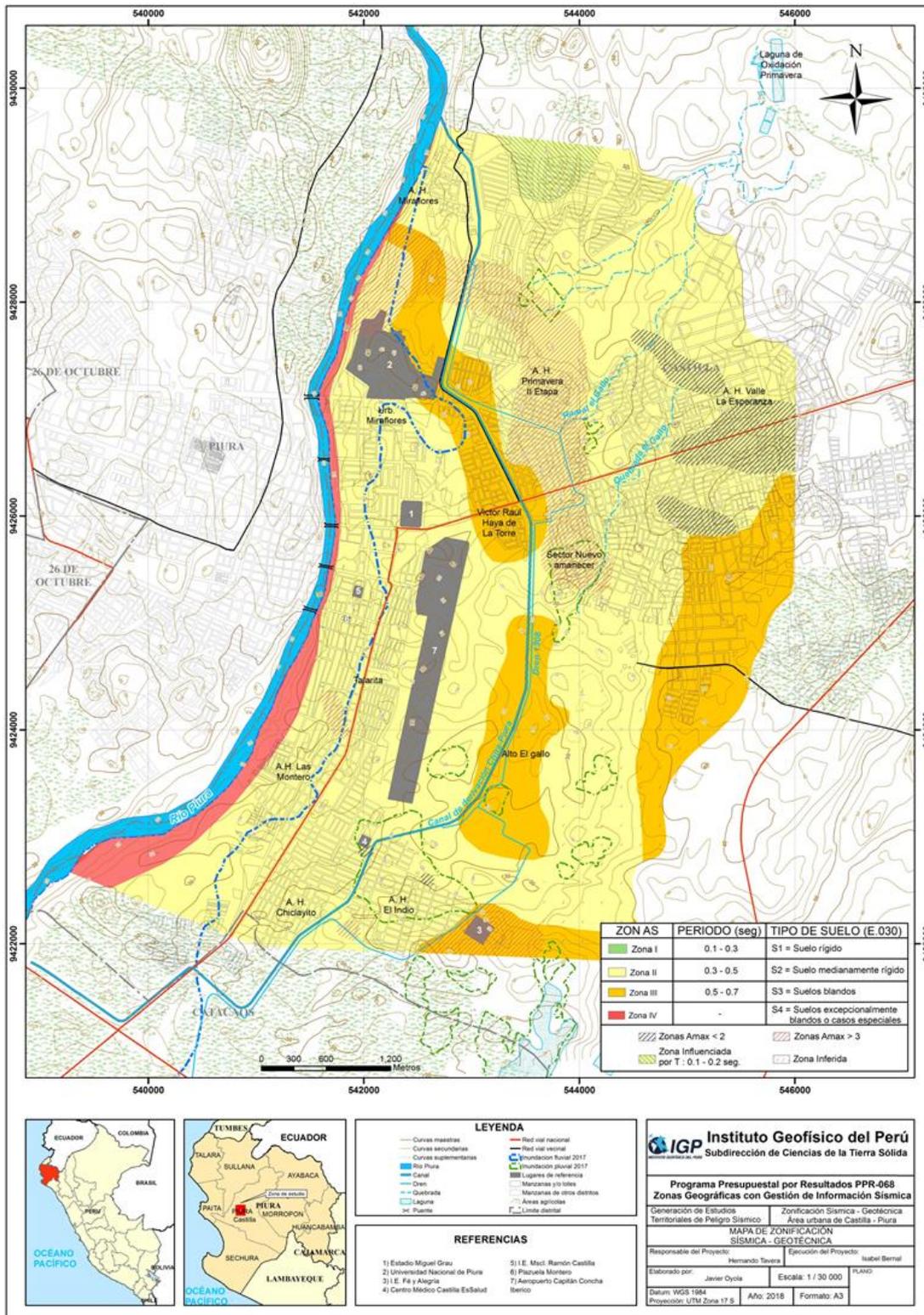


Figura 29: Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Castilla.

CONCLUSIONES

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

-Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permiten mostrar un pico de frecuencia bien definido, que se encuentra en toda el área urbana predominando frecuencias entre 2.0 y 4.5 Hz; además existe áreas con menores valores de frecuencias (1.0 a 1.8 Hz) próximos a la vía de evitamiento y al sur del A.H. Miraflores. Estos valores frecuencias bajas se asocian a depósitos sedimentarios de mayor espesor que domina las zonas indicadas.

-Las mayores amplificaciones relativas del suelo son tres veces en el sector Nuevo Amanecer, el A.H. Primavera II etapa y al norte de la Universidad Nacional de Piura, esto evidencia la existencia de suelos más flexibles en esta área que el resto del área, sin embargo, en el A.H. Valle La Esperanza los suelos presentan amplificaciones mínimas menores a 2 veces. Estas zonas serán más afectadas ante la ocurrencia de sismos.

-Los resultados obtenidos con el método sísmico, en el área de estudio predominan en superficie suelos moderadamente rígidos (V_s 182 a 348 m/s) con grandes espesores que varían entre 15 a 25 metros en promedio que conforme se dirige hacia el sureste presenta espesores mayores a los 30 metros (Sector Alto el Gallo y por la I.E. Fé y Alegría, A.H. El Indio). Por debajo presenta suelos rígidos (V_s 359 a 472 m/s) y se encuentran emplazados en toda el área de estudio. Los valores de velocidad promedio calculados para los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}), según la norma E030-2016, se clasifica el área de estudio en un solo tipo de suelo con rangos de velocidad V_{s30} entre 234 a 364 m/s lo cual sugiere suelos medianamente rígidos emplazados en toda el área de estudio.

-Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de Castilla, están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, donde T_0 es el periodo dominante, H el espesor del estrato y V_s es la velocidad de onda de corte. Asumiendo velocidades de 300 m/s y 350 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 y 0.4 segundos, se estima una

capa superficial con espesores de 25 a 30 metros, evidenciándose los mayores espesores hacia el sur y sur oeste; además se estima esta capa sedimentaria (60 m.) donde hay presencia de periodos largos (0.6 y 0.8s). Estos espesores no han sido confirmados con los modelos de velocidad obtenidos con los arreglos sísmicos, ya que se exploró hasta una profundidad de 30 metros, en las que aún se encuentran velocidades correspondientes a suelos rígidos.

-Al norte del área de estudio presentan de manera local periodos de 0.1 y 0.2 segundos en algunos puntos, sin embargo, los periodos dominantes en la zona de estudio son de 0.3 y 0.4 s, los primeros se distribuyen sobre toda la ciudad y el segundo se identificaron hacia el sur por el A.H. Chiclayito, El Indio y la Urb. Talarita.

-Los periodos de 0.5 segundos se presentan de manera aislada por el A.H. Primavera II etapa. Asimismo, el 20% de la zona de estudio presenta sensibilidad a periodos de 0.6 a 0.8 segundos, ubicados principalmente al este y sureste. Las mayores amplificaciones en ambos grupos de periodos se presentan por el sector Nuevo amanecer, A.H. Primavera II etapa y al norte de la universidad nacional de Piura.

-En los AA.HH. Primavera II etapa, Valle La Esperanza y en las inmediaciones del centro médico Castilla Essalud, predominan medios saturados superficiales y el predominio de suelos constituidos por arenas incrementa la probabilidad de experimentar el fenómeno licuación ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

-La Urb. Miraflores y el A.H. Miraflores, presentan suelos saturados y se debe a la influencia del río Piura y el canal de derivación Chira – Piura. En el frontis del colegio Fe y Alegría, presentan suelos compactos sin saturación en los primeros 10 metros por debajo de esta capa se presenta saturación.

-Los resultados obtenidos para el área urbana de Castilla a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S2, S3 y S4.

BIBLIOGRAFIA

- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 16, 2004 Paper No. 2207
- 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.
- Braja Das, (2011) - Principles of Foundation Engineering, Seven Edition, pág. 139-140.
- Brusi, D., et al (2013) - Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. ISSN: 1132-9157. Pág. 181-194.
- Cahill & Isacks (1992) - Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. Journal Geophys. Res., 97, 17503-17529.
- Castro, R., Tavera, H. y Bejarano, E. (2019). Análisis y evaluación histórica del Fenómeno El Niño en la Región Piura 2017. Informe Técnico, Instituto GEofísico del Peru, 65 pag
- Crespo V., C., (2004) - Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 5ta edición.
- CISMID, (2016) - Densidad de campo. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Laboratorio Geotécnico.
- Comité Interinstitucional, (2007) - Plan de Defensa Ribereñas y Encauzamiento de Ríos. Resumen del Diagnóstico Situacional. Autoridad Autónoma Cuenca Hidrográfica Chira – Piura.
- CONIDA, (2017) – Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial. Mapa de Estimación de Zonas Inundables.
- Chow, V., T., Maidment, D., R., & Mays, L., W., (1994) - Hidrología Aplicada Bogotá, McGrawHill, pág. 584.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. Bull. Seismol. Soc. Am., 80 (30), 551-576.

- ENFEN, (2017) - Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño”.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). “Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC”, *Geophysics*, Vol. 24, Nº 3, 438-445
- GITS-Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos.
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(1): 74-77.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Harvey, A., M., 1987. Patterns of Quaternary aggradational and dissectional landform development in the Almeria region, southeast Spain: a dry-region tectonically-active landscape. *Die Erde* 118, 193-215.
- Hutchinson, J., N., (1968) - Mass Movement. In the *Encyclopedia of Geomorphology* (Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York). 668-696 p.
- Hutchinson, J., N., (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides*, (Ed: Bonnard, C.). 1, 3-35 p. Rotterdam: Balkema.
- INDECI, (2017) – Instituto Nacional de Defensa Civil. Estado Situacional de la Emergencia.
- Gobierno Regional De Piura, (2005-2010) - Plan Regional de Prevención y Atención de Desastres de la Región Piura.
- Ingeniería Mecánica de Suelos, (2017) – Estudio Geológico-Geotécnico para el expediente Técnico para el Proyecto denominado: Mejoramiento de los servicios deportivos en el A.H. Túpac Amaru – sector II, Distrito Veintiséis de Octubre-Piura, Piura.
- JNCL Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos-Municipalidad Distrital de Veintiséis de Octubre, (2016) – Estudio de Mecánica de Suelos para el proyecto: Mejoramiento del servicio de transitabilidad vehicular y peatonal en los AA.HH. Las Dalías del Distrito Veintiséis de Octubre-Piura, Piura.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a). Are microtemors useful in site response evaluation, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b). Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtemors records, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.

- Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.
- Norma Técnica de edificaciones E.030. 2016. Aprobada por Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA, modificada por Decreto Supremo N° 003-2016-VIVIENDA.
- Meyerhof, G., G., (1956) – Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. Journal of the Soils Mechanics and Foundations División, ASCE, Vol 82 N°SM1, Proc. Paper 886, Jan. 1956, pp-19.
- Ministerio de Economía y Finanzas, (2017) - Informe de seguimiento y Gestión a la Inversión Pública.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015).
<http://renac.mtc.gob.pe/inventariovial/default2.aspx>.
- Municipalidad distrital de Veintiséis de Octubre-Piura, (2015) –Estudio de suelos con fines de mejoramiento del parque infantil UPIS Villa Hermosa del distrito Veintiséis de Octubre, provincia de Piura, departamento de Piura.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Park, C.B. (2014). MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, 32(6):656-662.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. The Leading Edge, 26 (1), 60–64.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves Geophysics 64 800-8.
- Palomino, L; Matos E. (2009). Estudio mapa de peligros de la ciudad de Piura –OEA-INDECI.
- Perez, A.; Parra, E. (2011). Plan de gestión del riesgo de desastres de ciudad de Piura – OEA-INDECI.
- Pachon et al. (2000) - Implicaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá en el estudio de Microzonificación Sísmica. INGEOMINAS
- Palacios, O, (1994) - Geología de los cuadrángulos Paita 11-a, Piura11-b, Talara 10-a Sullana 10-b, Lobitos 9-a, Quebrada Seca 9-b, Zorritos 8-b, Tumbes 8-c y

Zarumilla 7-c. Serie A: Carta Geológica Nacional. Boletín N° 54. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico- INGEMMET.

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.*, 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.

Roman, F., Jaimes, E., Moreno, M., Cuisano, V., Gallo, M., Yaipen, J. y Flores, M. (2017). Informe de evaluación del riesgo por desastre del río Piura e inundación pluvial en el centro poblado de Castilla, distrito de Castilla, provincia y departamento de Piura. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. p. 70.

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.

Sieberg, A. (1930). Los Terremotos en el Perú. Capítulo VI, *Geología del Perú* de G. Steinmann, Heidelberg Carl Winster Universitat-Shuchhan-Lunc, p. 406.

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 - 1974). INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 3, 130 p.

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.

Tavera, H., Agüero, C y Fernández, E. (2016). Catálogo general de isosistas para sismos peruano. Instituto Geofísico del Perú. Pag. 196

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

1. Información Geológica Geotécnica:

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

2. Información Geofísica

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